


Учреждение образования
«Брестский государственный технический университет»

Машиностроительный факультет

Кафедра автоматизации технологических процессов и производств

СОГЛАСОВАНО


Заведующий кафедрой

 О.Н.Прокопеня

« 30 » 10 2022 г.



СОГЛАСОВАНО
Машина-
буда Декан факультета

 С.Р.Онысько

2022 г.

ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ
«ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ»

для специальности

1-39 03 02 «Программируемые мобильные системы»

Составитель: Ярошевич А.В., кандидат технических наук, доцент

Рассмотрено и утверждено на заседании научно-методического совета
университета 29.11.2022 , протокол № 2 .

Брест, 2022

рег. N УМК 22/23 - 27
25.11.2022

Оглавление

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА	4
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	7
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ	7
1.1. <i>Электрическая цепь и ее элементы</i>	7
1.2. <i>Структура электрической цепи</i>	11
1.3. <i>Законы Кирхгофа</i>	12
1.4. <i>Преобразование линейных пассивных электрических цепей</i>	13
1.5. <i>Баланс мощности</i>	16
2. РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА	18
2.1. <i>Расчет неразветвленных цепей</i>	18
2.2. <i>Расчет разветвленных цепей с одним источником</i>	18
2.3. <i>Расчет разветвленных цепей с несколькими источниками</i>	21
2.3.1. <i>Метод уравнений Кирхгофа</i>	21
2.3.2. <i>Метод контурных токов</i>	23
2.3.3. <i>Метод наложения</i>	27
3. ЦЕПИ С ИСТОЧНИКАМИ ГАРМОНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ 29	
3.1. <i>Основные характеристики гармонических сигналов</i>	29
3.2. <i>Элементы цепей гармонического тока</i>	31
3.2.2. <i>Гармонический ток в индуктивности</i>	33
3.2.3. <i>Гармонический ток в емкости</i>	35
3.2.4. <i>Последовательное соединение R, L, C</i>	36
ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	39
1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ	39
2. Лабораторная работа № 1. Основы безопасности и измерений в электрических цепях	40
2.1. <i>Изучить основные положения по безопасности работ с электрическими цепями</i>	40
2.2. <i>Изучить устройство мультиметра и основные приёмы измерений электрических параметров</i>	51
2.3. <i>Провести измерения мультиметром сопротивления всех резисторов, напряжения на источнике и токов ветвей цепи</i>	54
2.4. <i>Содержание отчёта</i>	55
3. Лабораторная работа № 2. Анализ разветвлённых цепей постоянного тока	56
3.1. <i>Исследование разветвлённой цепи с одним источником</i>	56
3.2. <i>Исследование разветвлённой цепи с двумя источниками</i>	57
3.3. <i>Теоретические сведения</i>	57
3.4. <i>Содержание отчёта</i>	61
4. Лабораторная работа №3. Методы наложения и эквивалентного генератора для линейных цепей	62
4.1. <i>Проверка метода наложения</i>	62
4.2. <i>Проверка метода эквивалентного генератора</i>	63
4.3. <i>Теоретические сведения</i>	64
4.4. <i>Содержание отчёта</i>	66
5. Лабораторная работа №4. Амплитудные и фазовые соотношения для элементов цепей гармонического тока	67
5.1. <i>Резистор на переменном токе</i>	67
5.2. <i>Конденсатор на переменном токе</i>	68
5.3. <i>Катушка индуктивности на переменном токе</i>	69
5.4. <i>Последовательная RLC цепь в установившемся синусоидальном режиме</i>	70
5.5. <i>Теоретические сведения</i>	72
5.6. <i>Содержание отчёта</i>	75

6. Лабораторная работа № 5. Исследование резонанса напряжений в последовательной RLC цепи	76
6.1. <i>Построение АЧХ контура и определение частоты резонанса.</i>	77
6.2. <i>Исследование амплитудно–фазовых соотношений колебательного контура.</i>	78
6.3. <i>Исследование амплитудно – фазовых соотношений на реактивных элементах контура.</i> 78	
6.4. <i>Теоретические сведения:</i>	80
6.5. <i>Содержание отчёта:</i>	83
РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ	84
1. Обозначения элементов и параметров (с единицами измерения) в схемах электрических цепей.	85
2. Порядок изображения схемы цепи, заданной тройками чисел 86	
3. Тема 1. Расчёт разветвлённых цепей постоянного тока с одним источником.	87
3.1. <i>Основные теоретические сведения</i>	87
3.2. <i>Преобразование линейных электрических цепей</i>	88
3.3. <i>Варианты задач для расчёта разветвлённых цепей постоянного тока с одним источником.</i> 92	
4. Тема 2. Расчёт разветвлённых цепей постоянного тока с несколькими источниками методом уравнений Кирхгофа	93
4.1. <i>Пример расчёта по уравнениям Кирхгофа</i>	94
4.2. <i>Варианты задач для расчёта разветвлённых цепей постоянного тока с несколькими источниками методом уравнений Кирхгофа</i>	95
5. Тема 3. Расчёт разветвлённых цепей постоянного тока с несколькими источниками методом контурных токов и методом узловых потенциалов	96
5.1. <i>Метод контурных токов</i>	96
5.2. <i>Пример расчёта методом контурных токов</i>	97
5.3. <i>Метод узловых потенциалов</i>	97
5.4. <i>Пример расчёта методом узловых потенциалов</i>	99
5.5. <i>Пример расчёта методом двух узлов</i>	99
5.6. <i>Варианты задач для расчёта разветвлённых цепей постоянного тока с несколькими источниками методом контурных токов и методом узловых потенциалов.</i>	100
6. Тема 4. Параметры синусоидальных сигналов во временной и комплексной форме	102
6.1. <i>Мгновенные значения напряжений и токов</i>	102
6.2. <i>Комплексы напряжения и тока</i>	103
6.3. <i>Варианты задач для определения параметров мгновенных значений и комплексов</i> 104	
ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ	106
Вопросы к зачету	106
Учебная программа дисциплины	107
ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА	110
1. СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА	111
2. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ	112
3. ИНФОРМАЦИОННО МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	113

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

В подготовке инженеров–системотехников и инженеров по информационным технологиям курс «Теория электрических цепей» (ТЭЦ) относится к основным общетеоретическим курсам, определяющим базовую подготовку к изучению специальных дисциплин. Деятельность названных инженеров связана с построением и обслуживанием автоматизированных информационных систем. Основой технического обеспечения таких систем являются компьютеры, которые по существу построены на принципах и элементах, являющихся предметом теории электрических цепей. Данный электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) включает в себя все материалы необходимые и достаточные для освоения дисциплины «Теория электрических цепей» для специальности 1-39 03 02 «Программируемые мобильные системы» в объеме определенном учебной программой.

Цель преподавания учебной дисциплины - освоение терминологии, принципов описания, методов анализа и синтеза структуры и параметров электротехнических элементов и устройств. Предмет курса обобщается понятием электрической цепи.

Электрическая цепь представляет собой совокупность связанных определенным образом источников, потребителей и преобразователей электрической энергии.

Задачи учебной дисциплины:

- изучение основных теоретических законов, принципов, методов описания, анализа и синтеза электрических цепей
- закрепление теоретических знаний решением задач анализа для цепей с конкретными схемами и параметрами элементов;
- получение практических навыков исследования цепей на реальных физических установках;
- изучение возможностей компьютерных пакетов для анализа и проектирования электрических устройств;
- получение навыков самостоятельной исследовательской работы при получении описания процессов в цепях с использованием специальных математических методов и компьютерных пакетов.

В результате изучения учебной дисциплины «Теория электрических цепей» формируются следующие компетенции

СК-9 Осуществлять расчёт электрических цепей, составлять и анализировать схемы замещения электротехнических устройств для решения инженерных задач.

В результате изучения учебной дисциплины студент должен

знать:

- теоретические основы цепей постоянного и переменного тока;
- основные законы теории электрических цепей.

уметь:

- использовать на практике методы анализа и расчёта электрических цепей;

- выполнять экспериментальные исследования процессов в электрических цепях.

владеть:

- базовыми знаниями теории электрических цепей;
- навыками выполнения измерений в электрических цепях.

Связи с другими учебными дисциплинами:

Изучение курса ТЭЦ базируется на знании дифференциального исчисления, линейной алгебры, функций комплексного переменного, преобразований Фурье и Лапласа в высшей математике, а также знании электромагнитных явлений и основных законов сохранения энергии и материи в физике.

Курс ТЭЦ является базой для изучения электроники, микропроцессорной техники, автоматики и электронно-вычислительных машин.

Цели ЭУМК:

– обеспечение качественного методического сопровождения процесса обучения;

– организация эффективной самостоятельной работы студентов.

Содержание и объем ЭУМК полностью соответствуют образовательному стандарту высшего образования специальности 1-39 03 02 «Программируемые мобильные системы», а также учебно-программной документации по дисциплине. Материал представлен на требуемом методическом уровне и адаптирован к современным образовательным технологиям.

Структура электронного учебно-методического комплекса по дисциплине «Теория электрических цепей»:

Теоретический раздел ЭУМК представлен: А.В.Ярошевич. «Теория электрических цепей». Конспект лекций. 40 с.

Практический раздел ЭУМК содержит:

1. О.Н.Прокопеня, А.В.Ярошевич. Методические указания к лабораторным работам по теории электрических цепей. Брест: БрГТУ, 2018 – 75 с.

2. Ярошевич А.В. Лабораторный практикум по теории электрических цепей «Исследование линейных цепей на компьютерных моделях». – Брест: УО «БрГТУ», 2014 – 82 с.

Раздел контроля знаний ЭУМК содержит: Сборник задач по расчёту электрических цепей с теорией, алгоритмами и примерами для студентов технических специальностей университетов. Составители: Богдан Я.В., Ярошевич А.В - 31с.

Вспомогательный раздел включает вопросы для подготовки к зачету учебную программу по дисциплине.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

«Теория электрических цепей»

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

1.1. Электрическая цепь и ее элементы

Реальной электрической цепью называется совокупность устройств, предназначенных для передачи, распределения и преобразования энергии. В общем случае электрическая цепь содержит источники электрической энергии, приемники электрической энергии, измерительные приборы, коммутационную аппаратуру, соединительные линии и провода.

Электрическая цепь представляет собой совокупность связанных определенным образом источников, потребителей (или соответственно активных и пассивных элементов) и преобразователей электрической энергии.

Цепь называют *пассивной*, если она состоит только из пассивных элементов, и *активной*, если в ней также содержатся активные элементы.

Источником электрической энергии называют элемент электрической цепи, осуществляющий преобразование энергии неэлектрического вида в электрическую. Например: гальванические элементы и аккумуляторы преобразуют химическую энергию, термоэлементы – тепловую, электромеханические генераторы – механическую.

Потребителем электрической энергии называют элемент электрической цепи, преобразующий электрическую энергию в неэлектрическую. Например: лампы накаливания – в световую и тепловую, нагревательные приборы – в тепловую, электродвигатель – в механическую.

Преобразователем электрической энергии называют устройство, изменяющее величину и форму электрической энергии. Например: трансформаторы, инверторы - преобразуют постоянный ток в переменный, выпрямители – переменный ток в постоянный, устройства для преобразования частоты.

Для того чтобы выполнить расчет, необходимо каждое электротехническое устройство представить его *схемой замещения*. Схема замещения электрической цепи состоит из совокупности идеализированных элементов, отображающих отдельные свойства физически существующих устройств. Так, идеализированный резистор (сопротивление R) учитывает преобразование электромагнитной энергии в тепло, механическую работу или ее излучение. Идеализированный конденсатор (емкость C) и катушка

индуктивности (индуктивность L) характеризуются способностью накапливать энергию соответственно электрического и магнитного поля.

Объединение источников, потребителей и соединительных проводов образует электрическую цепь, на каждом участке которой может действовать *электрическое напряжение* и протекать *электрический ток*. Эти напряжения и токи в общем случае могут быть постоянными и переменными во времени и зависеть от свойств элементов цепи. В данном разделе будут рассматриваться постоянные токи и напряжения.

Реальные электрические цепи изучаются на моделях, которые изображаются с помощью условных обозначение в виде *электрических схем*.

Напряжение U на элементе электрической цепи обозначается на схеме (рис. 1.1.) знаками «+» и «-», имеющими смысл только при совместном рассмотрении, т.к. знак «+» указывает на точку с относительно более высоким потенциалом.

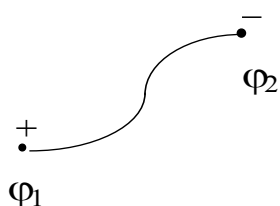


Рис. 1.1.

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (1.1)$$

$$[U] = B(\text{Вольт Ы})$$

Ток I в элементе электрической цепи обозначается стрелкой на схеме (рис. 1.2.) и указывает направление упорядоченного перемещения положительных электрических зарядов, если ток I выражается положительным числом.

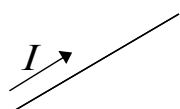


Рис. 1.2.

$$I = \frac{q}{t} \quad [I] = A(\text{Амперы}) \quad (1.2)$$

Зависимость между током и напряжением на элементе цепи называется *вольт-амперной характеристикой (ВАХ)* элемента, которая обычно изображается графически. На рис. 1.3. показаны ВАХ потребителей различного типа.

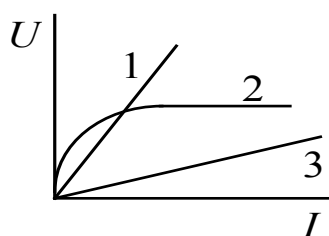


Рис. 1.3.

Прямолинейные ВАХ (1) и (3) соответствуют линейным элементам, а криволинейная ВАХ (2) – нелинейным элементам. Мы изучаем в рамках этого пособия только линейные цепи, для которых отношение $\frac{U}{I} = const = k$ или его отклонение от постоянной величины невелико. В данном случае, когда ВАХ изображается линией, близкой к прямой, считают, что потребитель подчиняется *закону Ома*, согласно которому напряжение и ток пропорциональны друг другу.

Этот коэффициент пропорциональности k называют *электрическим сопротивлением* элемента R , которое измеряется в Омах (Ом).

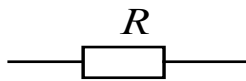


Рис. 1.4.

В качестве потребителя в теории электрических цепей постоянного тока выступает резистор, характеризующийся сопротивлением (R), для которого справедлив закон Ома:

$$\frac{U}{I} = R \text{ или } U = I \cdot R, I = \frac{U}{R} \quad (1.3)$$

Обозначение резистора на электрических схемах изображено на рис. 1.4.

Величину, обратную сопротивлению $G = \frac{1}{R}$, называют *проводимостью*, которая измеряется в Сименсах (См).

Закон Ома можно представить через проводимость:

$$\frac{I}{U} = G \quad U = \frac{I}{G} \quad I = U \cdot G \quad (1.4)$$

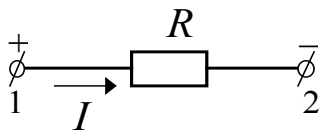


Рис. 1.5.

В пассивных элементах ток течет от точек с относительно большим потенциалом к точкам, имеющим относительно меньший потенциал. Поэтому на рис. 1.5. стрелка тока направлена от «+» к «-», что соответствует закону Ома в форме:

(1.5)

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = I \cdot R$$

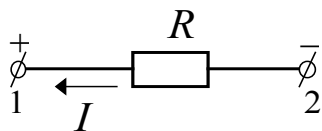


Рис. 1.6.

Для обозначений, принятых на рис. 1.6., закон Ома должен быть записан в следующей форме: $U_{12} = - I \cdot R$.

Таким образом, в ТОЭ потребитель моделируется идеальным потребителем, свойства которого определяются значением единственного параметра (R или G).

Источники энергии моделируются с помощью источника ЭДС (E), или источника напряжения, и источника тока (J). ВАХ источников энергии – это внешние характеристики, обычно имеющие ниспадающий характер, т.к. в большинстве случаев с увеличением тока напряжение источника уменьшается.

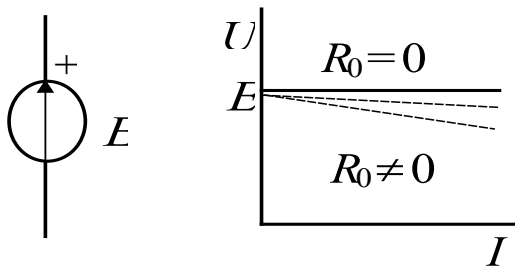


Рис. 1.7.

Идеализированный источник напряжения – это элемент цепи, напряжение которого не зависит от тока и является заданной постоянной величиной, ему соответствует на рис. 1.7. сплошная ВАХ. В действительности мы имеем дело с реальными источниками напряжения, которые отличаются от идеальных источников тем, что их напряжение с ростом

потребляемого тока уменьшается. ВАХ реального источника напряжения представлена на рис. 1.7. пунктирной линией, тангенс угла наклона которой равен внутреннему сопротивлению источника напряжения R_0 . Любой реальный источник при сопротивлении нагрузки $R \gg R_0$ может быть приведен к идеализированному следующим образом (рис.1.8.):

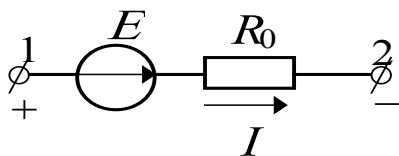


Рис. 1.8.

$$U_{12(\text{реальн.})} = I \cdot R - E$$

$$E_{\text{реальн.}} = E - I \cdot R \quad (1.6)$$

Таким образом, свойства источника ЭДС или реального источника напряжения определяются двумя параметрами – вырабатываемой ЭДС E и внутренним сопротивлением R_0 .

Идеализированный источник тока – это элемент цепи, ток которого не зависит от напряжения и является заданной постоянной величиной, ему соответствует сплошная ВАХ на рис. 1.8а.

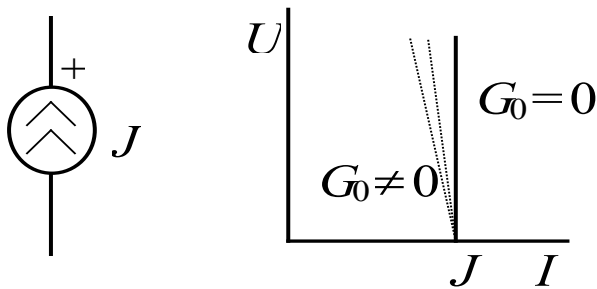


Рис. 1.8.

У реального источника тока с ростом напряжения вырабатываемый ток уменьшается. ВАХ реального источника напряжения представлена на рис. 1.8а. пунктирной линией, тангенс угла наклона которой равен внутренней проводимости источника тока G_0 . Любой реальный источник тока может быть приведен к идеализированному следующим образом (рис. 1.9.):

идеализированному следующим образом (рис. 1.9.):

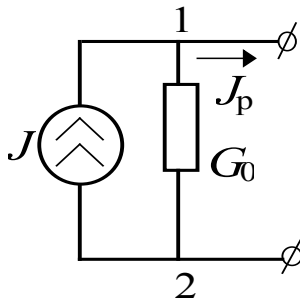


Рис. 1.9.

$$J_p = J - U_{12} \cdot G_0, \quad (1.7)$$

где J, G_0 – постоянные параметры.

Таким образом, свойства источника задающего тока определяются двумя параметрами: задающим током J и внутренней проводимостью G_0 . Чем меньше G_0 , тем ближе характеристика реального источника тока к идеализированному.

Поскольку внутренние сопротивления реальных источников всегда можно отнести к потребителям цепи далее рассматриваются только идеализированные источники напряжения и тока.

Провода, связывающие потребители и источники, по своей сущности также относятся к потребителям энергии. Однако, часто провода наделяют лишь соединительными функциями и считают, что они служат лишь для того, чтобы показать, как связаны между собой отдельные элементы цепи. Сопротивления проводов, если ими нельзя пренебречь, учитываются включением в соответствующих местах цепи дополнительных потребителей.

Таким образом, в теории линейных электрических цепей объектом изучения является *расчетная модель*, состоящая из потребителей и идеализированных источников, конфигурация и свойства элементов которой определены условиями задачи.

1.2. Структура электрической цепи

К структурным или топологическим свойствам цепи относятся такие ее особенности, которые не связаны с характеристиками входящих в нее активных и пассивных элементов. К ним относятся следующие понятия: ветвь, узел, контур.

Ветвью электрической цепи называют участок, элементы которого включены последовательно друг за другом и обтекаются одним и тем же током.

Узлом электрической цепи называют место соединения нескольких ветвей. Узел связывает не менее трех ветвей и является точкой разветвления.

Ветви считаются соединенными *последовательно*, если они обтекаются одним и тем же током. Ветви считаются соединенными *параллельно*, если они присоединены к одной и той же паре узлов. Таким образом, при последовательном соединении элементов общим параметром для них является ток, при параллельном – напряжение между узлами.

Контуром электрической цепи называется совокупность следующих друг за другом ветвей. Узлы, в которых эти ветви соединяются, являются

точками разветвления. При обходе *замкнутого* контура начальная и конечная точки совпадают. В дальнейшем под контуром понимается замкнутый контур.

Цепь, в которой отсутствуют разветвления, называют *одноконтурной*, при наличии разветвлений – *многоконтурной*. Многоконтурная цепь характеризуется числом независимых контуров. Совокупность независимых контуров определяется тем, что каждый из последующих контуров, начиная от элементарного, отличается по меньшей мере одной новой ветвью. Число независимых контуров может быть определено по формуле Эйлера:

$$p = n - m + 1, \quad (1.8)$$

где n – количество ветвей,

m – количество узлов, причем $n > m$ всегда.

Пример.

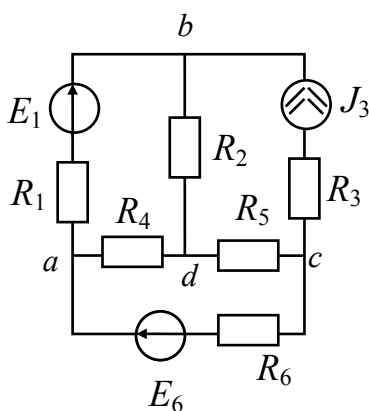


Рис. 1.10.

В цепи на рис. 1.10. четыре узла: a, b, c, d; шесть ветвей: ab, bd, bc, ad, dc, ac. Т.о., количество независимых контуров по формуле Эйлера определится следующим образом:

$$p = 6 - 4 + 1 = 3.$$

Это могут быть следующие контуры: abcd, dbc, adc или abd, dbca, adc и другие.

1.3. Законы Кирхгофа

Законы Кирхгофа являются основой теории линейных цепей и представляют собой так же, как и закон Ома, обобщение опытных данных.

I закон Кирхгофа (для токов): алгебраическая сумма токов в узле равна нулю, или сумма притекающих и сумма истекающих токов одинаковы. Как правило, при суммировании притекающие токи берутся со знаком «+», а истекающие – со знаком «-».

$$\sum I = 0 \quad \text{или} \quad \sum I_{\text{прит. эк.}} = \sum I_{\text{ист. эк.}} \quad (1.8)$$

II закон Кирхгофа (для напряжений): алгебраическая сумма ЭДС всех источников, встречающихся при обходе контура, равна алгебраической сумме напряжений на всех потребителях. В алгебраической форме

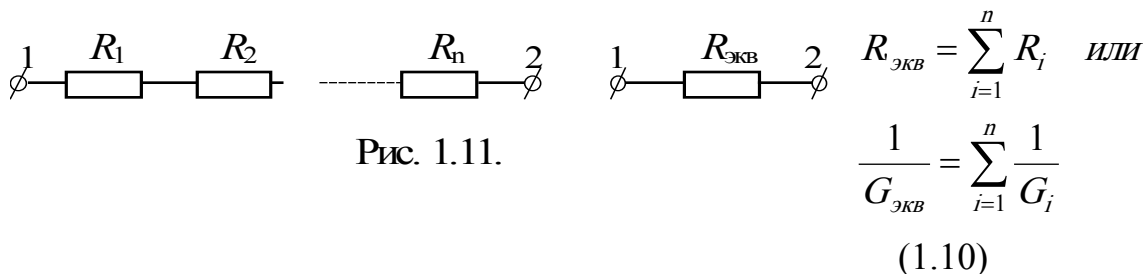
$$\sum U_{\text{потребителей}} = \sum E_{\text{источников}} \quad (1.9)$$

В сумму со знаком «+» входят ЭДС содействующих источников (т.е. тех источников, которые действуют в направлении, согласном с обходом контура) и со знаком «-» ЭДС противодействующих источников. При суммировании напряжений потребителей со знаком «+» берутся напряжения на всех потребителях, токи которых направлены согласно с обходом контура, и со знаком «-» берутся напряжения всех остальных потребителей. Направление обхода контура выбирается произвольно.

1.4. Преобразование линейных пассивных электрических цепей

Эквивалентное преобразование части пассивной электрической цепи состоит в такой ее замене другой пассивной цепью, при которой остаются неизменными токи и напряжения остальной цепи, не подвергшейся преобразованию. К простейшим преобразованиям относятся замена последовательно и параллельно соединенных потребителей эквивалентным потребителем.

При *последовательном* соединении роль эквивалентного сопротивления (или сопротивления эквивалентного потребителя) играет сумма сопротивлений всех потребителей (рис. 1.11.).



Это следует из II закона Кирхгофа:

$$U_{12} = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + \dots + I \cdot R_n = I \cdot \sum_{i=1}^n R_i = I \cdot R_{\text{экв}} \quad (1.11)$$

При двух последовательно соединенных потребителях:

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_2 \quad \text{ИЛИ} \quad \frac{1}{G_{\text{экв}}} = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \Rightarrow G_{\text{экв}} = \frac{G_1 \cdot G_2}{G_1 + G_2} \quad (1.12)$$

При *параллельном* соединении роль эквивалентной проводимости (или проводимости эквивалентного потребителя) играет сумма проводимостей всех потребителей (рис. 1.12.).

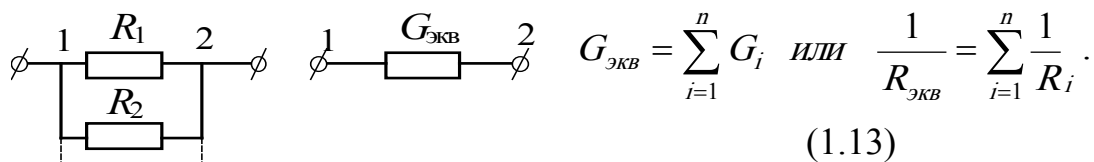


Рис. 1.12.

Это следует из I закона Кирхгофа:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n = U_{12} \cdot G_1 + U_{12} \cdot G_2 + \dots + U_{12} \cdot G_n = U_{12} \cdot \sum_{i=1}^n G_i = U_{12} \cdot G_{\text{эKB}}.$$

При двух параллельно соединенных потребителях:

$$G_{\text{эKB}} = G_1 + G_2 \quad \text{или} \quad \frac{1}{R_{\text{эKB}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1.14)$$

$$R_{\text{эKB}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Таким образом, для расчета цепей с последовательно включенными потребителями целесообразно их свойства выражать значениями сопротивлений, а для параллельно включенных – значениями проводимостей.

Пример.

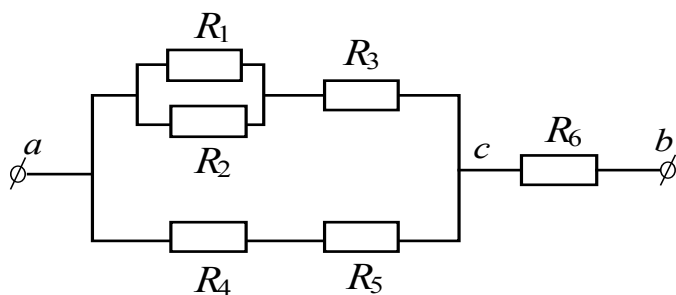


Рис. 1.13.

1. Параллельное соединение R_1 и R_2 :

$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

2. Последовательное соединение R_{12} и R_3 : $R_{123} = R_{12} + R_3$

3. Последовательное соединение R_4 и R_5 :

$$R_{45} = R_4 + R_5$$

4. Параллельное соединение R_{123} и R_{45} :

$$R_{ac} = \frac{R_{123} \cdot R_{45}}{R_{123} + R_{45}}$$

5. Последовательное соединение R_{ac} и R_6 : $R_{ab} = R_{ac} + R_6$.

Таким образом, эквивалентное сопротивление

$$R_{ab} = \frac{\left(\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + R_3 \right) \cdot (R_4 + R_5)}{\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + R_4 + R_5} + R_6$$

Более сложными являются взаимные преобразования потребителей, соединенных звездой или треугольником. К таким преобразованиям следует обращаться в тех случаях, когда в цепи, подлежащей упрощению, нельзя выделить параллельное или последовательное соединения потребителей.

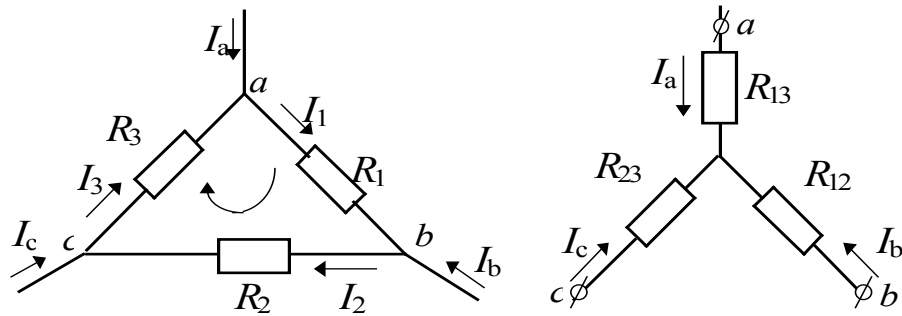


Рис. 1.14.

В узлах a , b , c и треугольник, и звезда на рис. 1.14. соединяются с остальной частью схемы. Преобразование треугольника в звезду должно быть таким, чтобы при одинаковых значениях потенциалов одноименных точек треугольника и звезды притекающие к этим точкам токи были одинаковы, тогда вся внешняя схема «не заметит» произведенной замены.

Выразим U_{ab} треугольника через параметры потребителей и притекающие к этим узлам токи. Запишем уравнения Кирхгофа для контура и узлов a и b .

$$I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3 = 0$$

$$\text{узла } a: I_a - I_1 + I_3 = 0 \Rightarrow I_3 = I_1 - I_a$$

$$\text{узла } b: I_b + I_1 - I_2 = 0 \Rightarrow I_2 = I_b + I_1$$

Заменим в первом уравнении токи I_3 и I_2 на соответствующие выражения:

$$I_1 \cdot R_1 + I_b \cdot R_2 + I_1 \cdot R_2 + I_1 \cdot R_3 - I_a \cdot R_3 = 0$$

$$I_1 \cdot (R_1 + R_2 + R_3) + I_b \cdot R_2 - I_a \cdot R_3 = 0 \Rightarrow I_1 = \frac{I_a \cdot R_3 - I_b \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

По закону Ома напряжение U_{ab} для соединения потребителей треугольником:

$$U_{ab} = I_1 \cdot R_1 = I_a \cdot \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} - I_b \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (1.15)$$

Теперь получим выражение для этого же напряжения при соединении потребителей звездой:

$$U_{ab} = I_a \cdot R_{13} - I_b \cdot R_{12}. \quad (1.16)$$

Для эквивалентности данных цепей при произвольных значениях токов I_a и I_b необходимо равенство напряжений U_{ab} для соединения потребителей

треугольником и звездой. Это возможно только при одинаковых коэффициентах уравнений (1.15) и (1.16), т.е.

$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \quad R_{13} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (1.17)$$

Аналогично можно получить выражения для определения R_{23} :

$$R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (1.18)$$

Таким образом, *сопротивление луча звезды равно произведению сопротивлений прилегающих сторон треугольника, деленному на сумму сопротивлений трех сторон треугольника.*

Формулы обратного преобразования можно вывести независимо, либо как следствие соотношений (1.17) и (1.18) через проводимости:

$$G_1 = \frac{G_{12} \cdot G_{13}}{G_{21} + G_{23} + G_{13}} \quad G_2 = \frac{G_{12} \cdot G_{23}}{G_{12} + G_{23} + G_{13}} \quad G_3 = \frac{G_{13} \cdot G_{23}}{G_{12} + G_{23} + G_{13}} \quad (1.19)$$

или через сопротивления:

$$R_1 = R_{12} + R_{13} + \frac{R_{12} \cdot R_{13}}{R_{23}} \quad R_2 = R_{12} + R_{23} + \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{13}} \quad (1.20)$$

$$R_3 = R_{13} + R_{23} + \frac{R_{13} \cdot R_{23}}{R_{12}}$$

Следовательно, *сопротивление стороны треугольника равно сумме сопротивлений прилегающих лучей звезды и произведения их, деленного на сопротивление третьего луча.*

1.5. Баланс мощности

Прохождение электрического тока по проводнику сопровождается выделением тепла. Согласно закону Джоуля-Ленца, вся электрическая энергия, сообщаемая проводнику в результате работы сил электрического поля, превращается в тепловую энергию. С помощью закона Ома можно записать для потребителя с сопротивлением R :

$$W_{т\text{ епл}} = UI t = U^2 G t = I^2 R t \quad (1.21)$$

Обычно под законом Джоуля-Ленца понимают уравнение, определяющее не энергию, а мощность тепловых потерь

$$P_{т\text{ епл}} = UI = U^2 G = I^2 R \quad (1.22)$$

В приведенных выражениях тепловая энергия и мощность выражаются в *Джоулях* [Дж] и *Ваттах* [Вт] соответственно.

Сформулированный закон распространяется на ветви, содержащие как пассивные, так и активные элементы. С этой целью пользуются обобщенным законом Ома (1.24)

$$W = U_{ab} I t = (I r m E) I t = I^2 R t m E I t$$

$$P = \frac{W}{t} = U_{ab} I = (I r m E) I = I^2 R m E I \quad (1.23)$$

Выражения (1.29), записанные для ветви с источником напряжения, справедливы и для ветви с источником тока, если произвести подстановку $J^2 R$ вместо $I^2 R$ и $U_J J$ вместо $E I$.

Отсюда следует закон сохранения энергии, согласно которому алгебраическая сумма мощностей, подводимых ко всем ветвям разветвленной электрической цепи, равна нулю:

$$\sum_{k=1}^m P_k = \sum I_k^2 \cdot R_k m \sum E_k \cdot I_k = 0. \quad (1.24)$$

Существует еще одна форма записи баланса мощности:

$$P_{ист\ о-ников} = P_{пот\ ребит\ елей} \quad или \quad \pm \sum E \cdot I \pm \sum U_J \cdot J = \sum I^2 \cdot R. \quad (1.31)$$

В левой части суммируются мощности источников энергии, а в правой – мощности, преобразованные в потребителях в тепло. Мощности источников, отдающих энергию, берутся со знаком «+», а работающих в режиме потребителей – со знаком «-» (рис. 1.15).

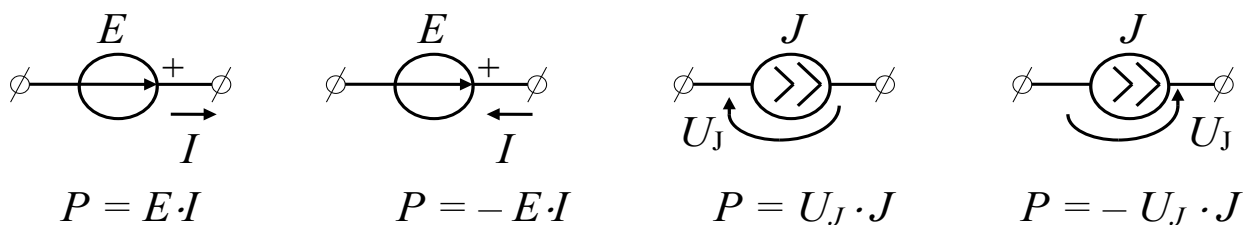


Рис. 1.15.

2. РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1. Расчет неразветвленных цепей

Основой расчета одноконтурных (неразветвленных) электрических цепей, содержащих источники обоих видов и потребители, служат рассмотренные ранее законы Ома и Кирхгофа.

Если в цепи нет источников тока, а параметры потребителей (R) и источников напряжения (E) заданы, то задача обычно состоит в определении тока контура. Положительное направление искомого тока выбирается произвольно и составляется уравнение:

$$I = \frac{\sum E}{\sum R}. \quad (2.1)$$

При этом необходимо помнить, что со знаком «+» берутся ЭДС источников, которые действуют в направлении выбранного тока. Истинное направление совпадает с выбранным, если в результате расчета ток оказывается положительной величиной, и противоположно выбранному, если ток оказывается отрицательным.

Если в цепи, кроме потребителя (R) и источников ЭДС (E), имеется источник тока (J), то задача обычно сводится к определению напряжения на источнике тока U_J , т.к. ток контура I совпадает с заданным током источника J . Положительная полярность U_J выбирается произвольно, но предпочтительно у острей стрелки ставить знак «+» (такой полярности соответствует формула: $U_J = J \cdot \sum R - \sum E$). Истинная полярность U_J совпадает с выбранной, если при расчете U_J выражается положительным числом, и противоположна выбранной, если $U_J < 0$. Искомое падение напряжения на источнике тока U_J при отсутствии источников ЭДС определяется по формуле $U_J = J \cdot \sum R$.

2.2. Расчет разветвленных цепей с одним источником

Разветвленную цепь с одним источником обычно упрощают, преобразуя в неразветвленную (рис. 2.1.), и решают методами, изложенными выше. Основная проблема состоит в нахождении токов и напряжений ветвей исходной схемы, поскольку в результате преобразования такие ветви не сохраняются.

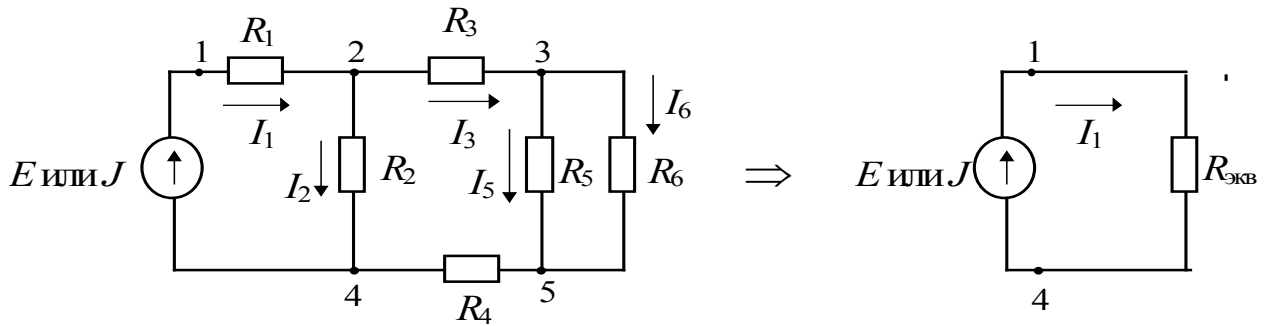


Рис. 2.1.

Для определения токов и напряжений в схеме рис. 2.1. сначала определяется $R_{экв}$ смешанного соединения потребителей относительно зажимов источника (точки 1 и 4 на рис. 2.1.). Затем, если цепь питается источником напряжения, то определяется ток по формуле:

$$I = \frac{E}{R_{экв}}$$

Если цепь питается источником тока, то определяется напряжение

$$U_J = J \cdot R_{экв}$$

Порядок дальнейшего расчета одинаков для обоих случаев, т.к. известны E или U_J и I или J неразветвленной части схемы. Рассмотрим порядок расчета для представленной на рис. 2.1 цепи.

Ток в потребителе R_1 совпадает с найденным током неразветвленной части I , а напряжение $U_1 = I_1 \cdot R_1$.

$$U_{24} = E - I_1 \cdot R_1; \quad I_2 = \frac{U_{24}}{R_2} = U_{24} \cdot G_2.$$

Ток I_3 определяется по закону Кирхгофа: $I_3 = I_1 - I_2$.

$$U_{35} = U_{24} - I_3 \cdot (R_3 + R_4); \quad I_5 = \frac{U_{35}}{R_5} = U_{35} \cdot G_5; \quad I_6 = \frac{U_{35}}{R_6} = U_{35} \cdot G_6.$$

Указанный прием используется и в тех случаях, когда для упрощения цепи приходится прибегать к преобразованию «треугольник \rightarrow звезда» или «звезда \rightarrow треугольник». Недостаток заключается в том, что цепь приходится рассчитывать дважды – преобразованную и исходную.

При расчетах удобно пользоваться формулой о токах в двух параллельных пассивных ветвях. Выведем ее на примере схемы рис. 2.1. Напряжение U_{35} по закону Ома определяется по формуле

$$U_{35} = I_3 R_{56} = I_3 \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6}$$

Тогда ток I_5 можно определить

$$I_5 = \frac{U_{35}}{R_5} = I_3 \frac{R_5 R_6}{(R_5 + R_6) R_5} = I_3 \frac{R_6}{R_5 + R_6} \quad (2.2)$$

Аналогично можно определить ток

$$I_6 = I_3 \frac{R_5}{R_5 + R_6} \quad (2.3)$$

Таким образом, ток в одной из двух параллельных ветвей равен току неразветвленной части (общей ветви), умноженному на сопротивление противоположной ветви, деленному на сумму сопротивлений обеих ветвей.

Известен еще один метод расчета таких цепей – *метод пропорциональных величин*. Он применим к «удлиненным» цепям (цепным соединениям).

Суть этого метода состоит в следующем: в ветви наиболее удаленной от источника (R_6) задаются некоторым значением тока или напряжения. Для удобства расчетов обычно это 1А или 1В. Затем перемещаясь к началу цепи определяют поочередно токи и напряжения всех ветвей вплоть до ветви, содержащей источник. Тем самым определяют какие напряжение $U_{вх}$ и ток $I_{вх}$ должен иметь источник для того, чтобы вызвать во всех ветвях токи и напряжения вычисленных значений. Если ЭДС (E) или задающий ток (J) с этими значениями не совпадают, то необходимо пропорционально изменить вычисленные значения токов и напряжений ветвей путем умножения их на отношение $\frac{E}{U_{вх}}$ или $\frac{J}{J_{вх}}$.

$$\text{Для схемы на рис. 2.1. пусть } I_6 = 1. \text{ Тогда } U_{35} = I_6 \cdot R_6 \quad I_5 = \frac{U_{35}}{R_5}.$$

$$I_3 \text{ можно определить по I закону Кирхгофа: } I_3 = I_5 + I_6.$$

$$U_{24} \text{ определяем по II закону Кирхгофа: } U_{24} = I_3 \cdot (R_3 + R_4) + U_{35}.$$

$$\text{По закону Ома: } I_2 = \frac{U_{24}}{R_2}, \text{ по I закону Кирхгофа: } I = I_2 + I_3.$$

$$U_{вх} = U_{24} + I_1 \cdot R_1.$$

$$\text{Коэффициент пересчета определяется следующим образом: } k = \frac{E}{U_{вх}}.$$

Все рассчитанные значения токов и напряжений необходимо умножить на коэффициент k .

2.3. Расчет разветвленных цепей с несколькими источниками

Если известна конфигурация сложной электрической цепи и заданы свойства всех составляющих ее элементов, то расчет такой цепи обычно сводится к определению токов в ветвях и потенциалов узлов. В отличие от рассмотренных выше случаев, разветвленная цепь с несколькими источниками требует специальных методов расчета. Следует отметить, что разветвленные цепи с одним источником так же можно рассчитывать рассмотренными ниже методами.

Число неизвестных токов совпадает с числом m ветвей. Если в некоторых ветвях содержатся источники тока, то неизвестными для этих ветвей являются соответствующие U_j . Таким образом, для расчета цепи в общем случае следует составить систему из m независимых уравнений.

2.3.1. Метод уравнений Кирхгофа

Отыскание неизвестных величин связано с составлением и совместным решением системы уравнений, записанных по I и II законам Кирхгофа. Для того, чтобы записать эти уравнения, необходимо предварительно пронумеровать узлы, присвоив каждому из них соответствующее значение потенциала ($\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$) и ветви, присвоив каждой из них значение тока (I_1, I_2, \dots, I_m).

Прежде чем приступить к составлению уравнений по законам Кирхгофа, необходимо установить, сколько независимых уравнений составляется по каждому из этих законов. Уравнения по I закону Кирхгофа, связывающие m неизвестных токов, могут быть записаны для каждого из узлов цепи. Однако использовать для совместного решения можно только $n-1$ уравнений, т.к. уравнение, записанное для последнего узла, окажется следствием всех предыдущих уравнений. По II закону Кирхгофа составляют число уравнений, равное числу ветвей m за вычетом числа уравнений, составленных по I закону Кирхгофа ($n-1$), т.е. $p = m - (n-1) = m - n + 1$, где p – количество независимых контуров.

Все эти рассуждения справедливы для случая, когда в цепи содержатся источники тока. В этом случае уменьшается количество неизвестных токов, но появляется соответствующее число напряжений U_j , которые войдут в уравнения в качестве неизвестных величин.

Таким образом, методика расчета разветвленной цепи, не содержащей источников тока, методом уравнений Кирхгофа следующая:

1. Обозначить токи ветвей и произвольно выбрать их положительное направление.
2. Произвольно выбрать опорный узел и совокупность $p = m - n + 1$ независимых контуров.

3. Для всех узлов, кроме опорного, составить уравнения по I закону Кирхгофа. Таких уравнений должно быть $(n - 1)$.

4. Для каждого выбранного контура составить уравнения по II закону Кирхгофа. Таких уравнений должно быть p .

5. Система уравнений Кирхгофа с m неизвестными токами решается совместно и определяются численные значения токов.

6. Если необходимо, рассчитать с помощью обобщенного закона Ома напряжения ветвей или разность потенциалов узлов.

7. Проверить правильность расчета с помощью баланса мощности.

Если в цепи есть *источников тока*, то при правильном выборе совокупности независимых контуров количество совместно решаемых уравнений в системе можно сократить на q . Если контуры выбирать таким образом, чтобы каждый источник тока вошел только в один контур, соответствующее U_J войдет только в одно уравнение по II закону Кирхгофа. Поскольку неизвестными являются только токи в $(m - q)$ ветвях, количество уравнений по II закону Кирхгофа можно уменьшить до $m - n + 1 - q$. В результате, вместе с $(n - 1)$ уравнением I закону Кирхгофа, получится система из $m - q$ уравнений относительно неизвестных токов, после совместного решения которых оставшиеся q уравнений используются для определения U_J

Пример.

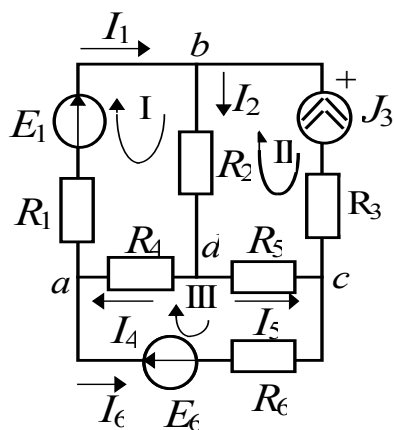


Рис. 2.2.

1. Обозначим токи ветвей.

2. Выбираем совокупность независимых контуров (I, II, III) и опорный узел c .

3. Уравнения по I закону Кирхгофа

$$\text{узел } a: -I_1 + I_4 - I_6 = 0$$

$$\text{узел } b: I_1 - I_2 + J_3 = 0$$

$$\text{узел } d: I_2 - I_4 - I_5 = 0$$

4. Уравнения по II закону Кирхгофа

$$I \text{ контур: } I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 + I_4 \cdot R_4 = E_1$$

$$II \text{ контур: } -I_2 \cdot R_2 - I_5 \cdot R_5 - J_3 \cdot R_3 = -U_J$$

$$III \text{ контур: } -I_4 \cdot R_4 + I_5 \cdot R_5 - I_6 \cdot R_6 = E_6$$

5. Совместно решаем систему из $m - q = 5$ уравнений относительно неизвестных токов I_1, I_2, I_4, I_5, I_6 , в которую не войдет уравнение. Составленное для II контура.

6. Определяем U_J .

7. Правильность расчетов проверяем с помощью баланса мощности

$$P_{ист} = P_{потр} \Rightarrow$$

$$E_1 \cdot I_1 - E_6 \cdot I_6 + U_J \cdot J_3 = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + J_3^2 \cdot R_3 + I_4^2 \cdot R_4 + I_5^2 \cdot R_5 + I_6^2 \cdot R_6$$

2.3.2. Метод контурных токов

Метод контурных токов является одним из основных методов расчета сложных электрических цепей, которым широко пользуются на практике.

При расчете методом контурных токов полагают, что в каждом независимом контуре течет свой контурный ток. Уравнения составляют относительно контурных токов, после чего определяют токи ветвей через контурные токи.

Таким образом, метод контурных токов можно определить как метод расчета, в котором за искомые принимают контурные токи. Число неизвестных в этом методе равно числу уравнений, которые необходимо было бы составить для схемы по II закону Кирхгофа, т.е. $p = m - n + 1$. Следовательно, этот метод более экономичен при вычислениях, чем метод уравнений Кирхгофа.

Разработаем алгоритм расчета цепей методом контурных токов на примере приведенной на рис. 2.3. схемы, в которой три независимых контура. Предположим, что в каждом контуре протекает свой контурный ток в указанном направлении. Для каждого из контуров составим уравнения по II закону Кирхгофа. При этом учтем, что по смежной ветви для контурных токов I_{11} и I_{22} (ветвь bd , содержащая сопротивление R_2) протекает ток $I_{11} - I_{22}$, по смежной ветви для контурных токов I_{33} и I_{22} (ветвь dc , содержащая сопротивление R_5) протекает ток $I_{33} - I_{22}$, по смежной ветви для контурных токов I_{11} и I_{33} (ветвь ad , содержащая сопротивление R_4) протекает ток $I_{11} - I_{33}$.

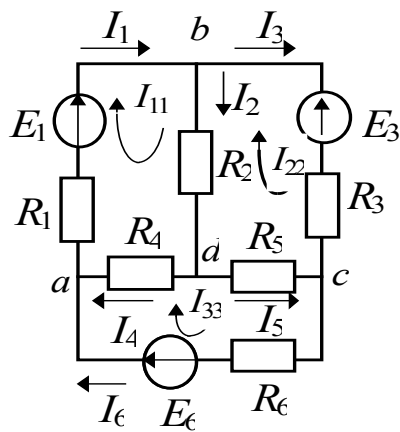


Рис. 2.3.

Тогда уравнения по II закону Кирхгофа для каждого контура принимают следующий вид:

$$\begin{cases} R_1 I_{11} + R_2 (I_{11} - I_{22}) + R_4 (I_{11} - I_{33}) = E_1 \\ -R_2 (I_{11} - I_{22}) + R_3 I_{22} - R_5 (I_{33} - I_{22}) = -E_3 \\ -R_4 (I_{11} - I_{33}) + R_5 (I_{33} - I_{22}) + R_6 I_{33} = E_6 \end{cases} \quad (2.4)$$

Сгруппируем слагаемые при одноименных токах:

$$\begin{cases} I_{11} \cdot (R_1 + R_2 + R_4) + I_{22} \cdot (-R_2) + I_{33} \cdot (-R_4) = E_1 \\ I_{11} \cdot (-R_2) + I_{22} \cdot (R_2 + R_3 + R_6) + I_{33} \cdot (-R_5) = -E_3 \\ I_{11} \cdot (-R_4) + I_{22} \cdot (-R_5) + I_{33} \cdot (R_4 + R_5 + R_6) = E_6 \end{cases} \quad (2.5)$$

Введем обозначения:

$$\left. \begin{aligned} R_{11} &= R_1 + R_2 + R_4 \\ R_{22} &= R_2 + R_3 + R_6 \\ R_{33} &= R_4 + R_5 + R_6 \end{aligned} \right\} \text{собственные сопротивления контуров}$$

$$\left. \begin{aligned} R_{12} &= R_{21} = -R_2 \\ R_{13} &= R_{31} = -R_4 \\ R_{23} &= R_{32} = -R_6 \end{aligned} \right\} \text{общие сопротивления контуров}$$

$$\left. \begin{aligned} E_{11} &= E_1 \\ E_{22} &= -E_3 \\ E_{33} &= E_6 \end{aligned} \right\} \text{контурные ЭДС}$$

В окончательном виде система уравнений для контурных токов приобретает следующий вид:

$$\begin{cases} I_{11} \cdot R_{11} + I_{22} \cdot R_{12} + I_{33} \cdot R_{13} = E_{11} \\ I_{11} \cdot R_{21} + I_{22} \cdot R_{22} + I_{33} \cdot R_{23} = E_{22} \\ I_{11} \cdot R_{31} + I_{22} \cdot R_{32} + I_{33} \cdot R_{33} = E_{33} \end{cases} \quad (2.6)$$

в матричной форме

$$\begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ I_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Собственное сопротивление контура (R_{ij}) представляет собой арифметическую сумму сопротивлений всех потребителей, находящихся в i -ом контуре.

Общее сопротивление контура ($R_{ij} = R_{ji}$) представляет собой алгебраическую сумму сопротивлений потребителей ветви (нескольких ветвей), одновременно принадлежащих i -ому и j -ому контурам. В эту сумму сопротивление входит со знаком «+», если контурные токи протекают через данное сопротивление в одном направлении (согласно), и знак «-», если они протекают встречно.

Контурные ЭДС представляют собой алгебраическую сумму ЭДС источников, входящих в контур. Со знаком «+» в эту сумму входят ЭДС источников, действующих согласно с обходом контура, со знаком «-» входят ЭДС источников, действующих встречно.

Решение полученной системы удобно выполнить методом Крамера

$$I_{11} = \frac{\Delta_1}{\Delta} \quad I_{22} = \frac{\Delta_2}{\Delta} \quad I_{33} = \frac{\Delta_3}{\Delta}, \quad (2.8)$$

где $\Delta, \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$, – соответственно определители матриц:

$$\Delta = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{vmatrix}; \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} E_{11} & R_{12} & R_{13} \\ E_{22} & R_{22} & R_{23} \\ E_{33} & R_{32} & R_{33} \end{vmatrix}; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} R_{11} & E_{11} & R_{13} \\ R_{21} & E_{22} & R_{23} \\ R_{31} & E_{33} & R_{33} \end{vmatrix} \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & E_{11} \\ R_{21} & R_{22} & E_{22} \\ R_{31} & R_{32} & E_{33} \end{vmatrix}. \quad (2.9)$$

По найденным контурным токам при помощи I закона Кирхгофа определяются токи ветвей.

Таким образом, методика расчета цепи постоянного тока методом контурных токов следующая:

1. Обозначить все токи ветвей и их положительное направление.

2. Произвольно выбрать совокупность p независимых контуров, нанести на схему положительное направление контурных токов, протекающих в выбранных контурах.

3. Определить собственные, общие сопротивления и контурные ЭДС и подставить их в систему уравнений вида (2.3).

4. Разрешить полученную систему уравнений относительно контурных токов, используя метод Крамера.

5. Определить токи ветвей через контурные токи по I закону Кирхгофа.

6. В случае необходимости, с помощью обобщенного закона Ома определить потенциалы узлов.

7. Проверить правильность расчетов при помощи баланса мощности.

Если в цепи содержится *источников тока*, количество совместно рассматриваемых уравнений сокращается на q и становится равным $p - q$, поскольку токи в таких ветвях известны (для контуров с $I_{ii} = J$ уравнение можно не записывать). В этом случае следует выбирать такую совокупность независимых контурных токов, чтобы часть из них стала известными. Для этого необходимо, чтобы каждый источник тока входил только в один контур. Напряжения U_J источников войдут в качестве неизвестных в правые части уравнений, т.е. в состав контурных ЭДС.

Пример.

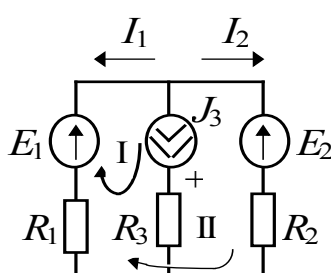


Рис. 2.4.

$$R_{11} = R_1 + R_3; \quad R_{22} = R_1 + R_2; \quad R_{12} = R_{21} = R_1;$$

$$E_{11} = E_1 + U_J; \quad E_{22} = E_1 - E_2$$

Тогда система уравнений по методу контурных токов примет следующий вид:

$$\begin{cases} (R_1 + R_2) \cdot I_{11} + R_1 \cdot I_{22} = E_1 - E_2 \\ R_1 \cdot I_{11} + (R_1 + R_3) \cdot I_{22} = E_1 + U_J \end{cases}$$

Причем, $I_{11} = J$, решив первое уравнение, можно получить I_{22} . Далее $I_1 = -(I_{11} + I_{22})$; $I_2 = I_{22}$.

U_J можно определить из второго уравнения системы или, составив уравнение по II закону Кирхгофа для любого контура, в который входит источник тока.

Баланс мощности:

$$P_{ист} = -E_1 \cdot I_1 - E_2 \cdot I_2 + J_2 \cdot U_J, \quad P_{потр} = I_1^2 \cdot R_1 + J_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3.$$

2.3.3. Метод наложения

Линейная электрическая цепь описывается системой линейных уравнений Кирхгофа. Это означает, что она подчиняется *принципу наложения (суперпозиции)*, согласно которому *совместное действие всех источников в электрической цепи совпадает с суммой действий каждого из них в отдельности*.

Так как принцип наложения следует из общих свойств линейных уравнений, то его можно применять для определения любых физических величин, которые связаны между собой линейной зависимостью. В применении к электрическим цепям можно определить не только токи при заданных сопротивлениях, ЭДС и токах источников, но и напряжения при заданных токах и известных сопротивлениях. Методом нельзя пользоваться для определения мощности, так как мощность *квадратичная* функция тока или напряжения и принципу суперпозиции не подчиняется.

Метод наложения опирается на принцип наложения и заключается в следующем: ток или напряжение произвольной ветви или участка разветвленной электрической цепи постоянного тока определяется как алгебраическая сумма токов или напряжений, вызванных каждым из источников в отдельности.

При использовании этого метода задача расчета разветвленной электрической цепи с источниками сводится к совместному решению цепей с одним источником.

Методика расчета линейной электрической цепи методом наложения:

1. Произвольно задать направление токов в ветвях исследуемой цепи.
2. Исходную цепь, содержащую источники, преобразовать в n подсхем, каждая из которых содержит только один из источников, прочие источники исключаются следующим образом: источники напряжения замыкаются накоротко, а ветви с источниками тока обрываются. При этом необходимо помнить, что внутренние сопротивления реальных источников играют роль потребителей и поэтому они должны оставаться в подсхемах.
3. Определить токи каждой из подсхем, задавшись их направлением в соответствии с полярностью источника, любым из известных методом. В большинстве случаев расчет ведется по закону Ома с использованием метода эквивалентных преобразований пассивных цепей.
4. Полный ток в любой ветви исходной цепи определяется как алгебраическая сумма токов вспомогательных подсхем, причем при суммировании со знаком «+» берутся токи подсхем, направление

которых совпадает с направлением тока в исходной цепи, со знаком «←» – остальные.

К достоинствам метода относят то обстоятельство, что расчет производится по частям, где составляющие тока и напряжения определяются довольно просто. Однако, поскольку решение предполагает произведение множества преобразований, метод не рекомендуется применять для схем, содержащих большое количество источников.

Пример. Определить ток I_2 в цепи, изображенной на рис. 2.8, а.

Для данной цепи должны быть изображены две расчетные подсхемы (рис. 2.8, б и в). С помощью подсхемы 1 (рис. 2.8, б) найдем составляющую I_2^J по формуле о токах в двух параллельных ветвях

$$I_2^J = J \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2 + \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4}}$$

Направление тока в подсхеме 1 совпадает с направлением искомого тока.

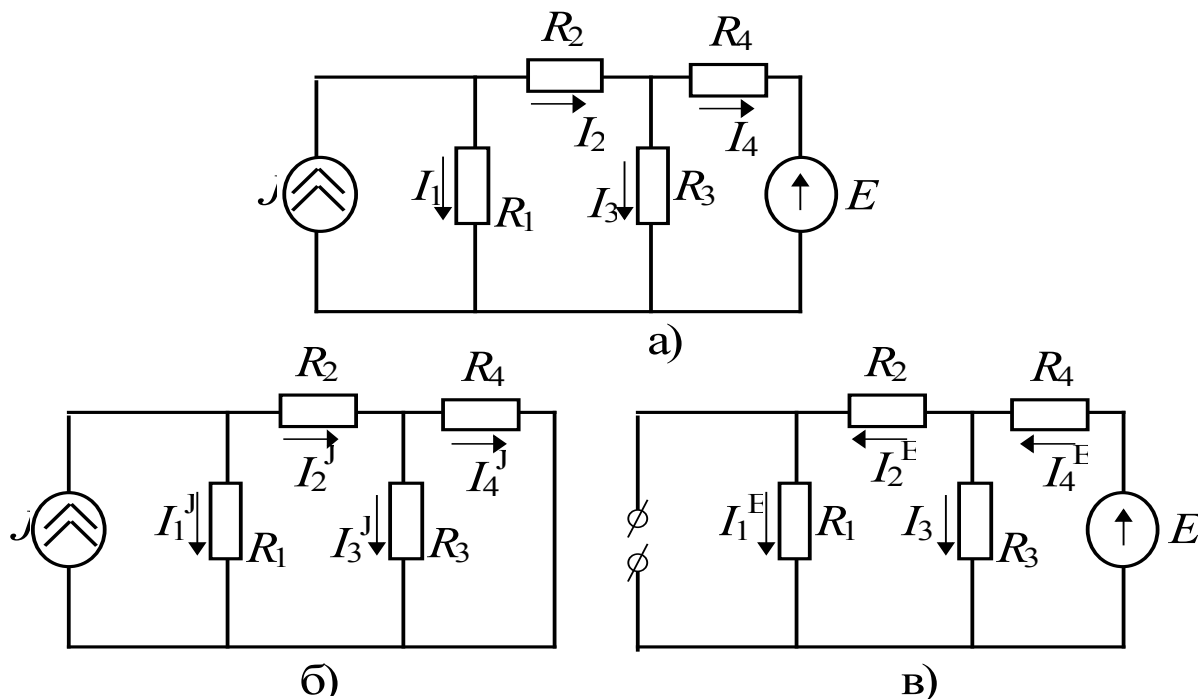


Рис. 2.8.

С помощью подсхемы 2 (рис. 2.8, в) найдем составляющую I_2^E .

$$I_2^E = \frac{E}{\frac{(R_1 + R_2) \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} + R_4} \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Направление тока в подсхеме 2 противоположно направлению искомого тока. Ток в исходной цепи определится следующим образом:

$$I_2 = I_2^J - I_2^E.$$

3. ЦЕПИ С ИСТОЧНИКАМИ ГАРМОНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

3.1. Основные характеристики гармонических сигналов

Переменным током $i(t)$ и напряжением $u(t)$ называют токи и напряжения, изменяющиеся во времени.

Сигналы, мгновенные значения которых повторяются через определенный фиксированный промежуток времени, называются *периодическими*, а этот промежуток времени – *периодом*. Такие сигналы описываются следующим образом:

$$i = F(t) = F(t \pm T), \quad (3.1)$$

где T – период, с.

Величина, обратная периоду, называется *частотой* f :

$$f = \frac{1}{T} \quad [f] = c^{-1} = \text{Гц}. \quad (3.2)$$

Также существует понятие *угловой (циклической) частоты*:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad [\omega] = \text{рад/с}. \quad (3.3)$$

В электроэнергетике нашли широкое применение синусоидальные сигналы. Для передачи информации в технике связи и радиотехнике используют различные модуляции синусоидальных сигналов: амплитудную, частотную, фазовую. В общем случае любой несинусоидальный сигнал может быть представлен в виде суммы синусоидальных сигналов различной частоты с помощью разложения в ряд Фурье. И, таким образом, расчет подобных цепей может быть сведен к расчету цепей синусоидального тока и напряжения.

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad (3.4)$$

где $u(t)$, $i(t)$ – мгновенное значение;

U_m , I_m – амплитуда переменного сигнала – максимальная по модулю его величина;

$\omega t + \psi_u, \omega t + \psi_i$ – фаза гармонического сигнала – аргумент при синусе в каждый момент времени;

ψ_u, ψ_i – начальная фаза – значение аргумента в начальный момент времени ($t = 0$). Фаза измеряется в радианах или градусах.

В дальнейшем под переменным сигналом будем понимать гармонический (синусоидальный) сигнал (рис. 3.1).

О значениях периодических токов и напряжений обычно судят по их среднеквадратических значениях за период, которые называют действующим значением тока и напряжения и обозначают I, U :

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}, \quad I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}. \quad (3.5)$$

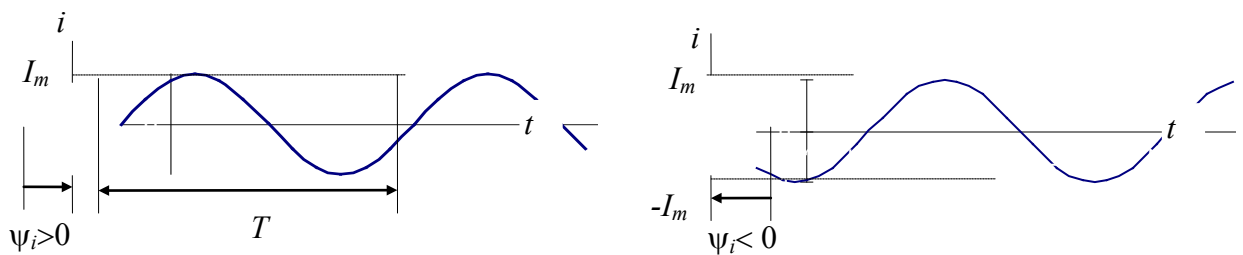


Рис. 3.1.

За период T на резисторе с сопротивлением R при синусоидальном изменении тока выделится тепловая энергия:

$$W_T = \int_0^T Ri^2 dt = R \int_0^T \frac{T}{T} i^2 dt = RT \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = RI^2 T. \quad (3.6)$$

Таким образом, действующий ток численно равен такому постоянному току, который за время $t = T$ выделяет в том же сопротивлении такое же количество тепла, что и переменный.

В действующих величинах градуируются (тарируются) амперметры и вольтметры электродинамической и электромагнитной системы. Приборы магнитоэлектрической системы показывают постоянную составляющую тока или напряжения, или среднее значение за период:

$$U_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt, \quad I_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt. \quad (3.7)$$

Связь между действующим и амплитудным значением гармонического сигнала на примере тока.

Если ток изменяется по закону $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, то

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2(\omega t + \psi) dt = \frac{I_m^2}{T} \int_0^T \sin^2(\omega t + \psi) dt =$$

$$= \frac{I_m^2}{2T} \int_0^T (1 - \cos(2\omega t + 2\psi)) dt = \frac{I_m^2}{2T} \int_0^T dt - \frac{I_m^2}{2T} \int_0^T \cos(2\omega t + 2\psi) dt = \frac{I_m^2}{2T} T = \frac{I_m^2}{2},$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (3.8)$$

Аналогично для сигнала напряжения

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (3.9)$$

Введем понятие *мощности переменного тока*. Мгновенная мощность вычисляется как произведение мгновенных значений напряжения и тока $p(t) = u(t) \cdot i(t)$. Тогда

$$p(t) = I_m U_m \sin(\omega t + \psi_u) \sin(\omega t + \psi_i) =$$

$$= I_m U_m \frac{1}{2} [\cos(\omega t + \psi_u - \omega t - \psi_i) - \cos(\omega t + \psi_u + \omega t + \psi_i)] =$$

$$= \frac{I_m U_m \cos \varphi}{2} - \frac{I_m U_m \cos(2\omega t + \psi_u + \psi_i)}{2} = IU \cos \varphi - IU \cos(2\omega t + \psi_u + \psi_i),$$

(3.10)

где φ – сдвиг фазы тока по отношению к напряжению, $\varphi = \psi_u - \psi_i$;

$IU \cos \varphi$ – постоянная составляющая мгновенной мощности;

$IU \cos(2\omega t + \psi_u + \psi_i)$ – гармоническая составляющая, которая изменяется с двойной угловой частотой.

Средняя мощность за период называется *активной мощностью*:

$$P = P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = UI \cos \varphi. \quad (3.11)$$

3.2. Элементы цепей гармонического тока

Электрическая цепь синусоидального тока кроме электротехнических устройств, назначение которых совпадает с назначением функционально аналогичных устройств цепи постоянного тока (источники энергии, измерительные приборы, коммутационные аппараты и др.), содержит также устройства, присущие только цепям синусоидального тока: конденсаторы и катушки индуктивности.

Для расчета режима работы электротехнических устройств необходимо перейти от принципиальной схемы цепи к ее схеме замещения (математической модели).

Элементами схем замещения цепей синусоидального тока являются источники синусоидальных тока и ЭДС ($j(t), e(t)$), резистивные (R), индуктивные (L) и емкостные (C) элементы.

Рассмотрим картину распределения тока и напряжения на реальных элементах.

3.2.1. Гармонический ток в сопротивлении

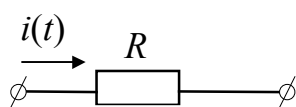


Рис. 3.3

Пусть $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$.

Тогда ток в сопротивлении R (рис. 3.3) можно определить по закону Ома: $i(t) = \frac{u(t)}{R}$,

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u) = e(t), \quad i(t) = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t + \psi_u) = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

$$\text{Отсюда } I_m = \frac{U_m}{R}; \quad \psi_i = \psi_u = \psi.$$

Сдвиг фаз между напряжением и током $\psi_u - \psi_i = \varphi = 0$, т.е. ток и напряжение на сопротивлении совпадают по фазе.

Поскольку $U_m = U\sqrt{2}$, то для действующих значений справедливо

$$\frac{U_m}{I_m} = \frac{U\sqrt{2}}{I\sqrt{2}} = \frac{U}{I} = Z, \quad (3.11)$$

где Z – полное сопротивление цепи (импеданс), равное отношению действующих значений напряжения и тока.

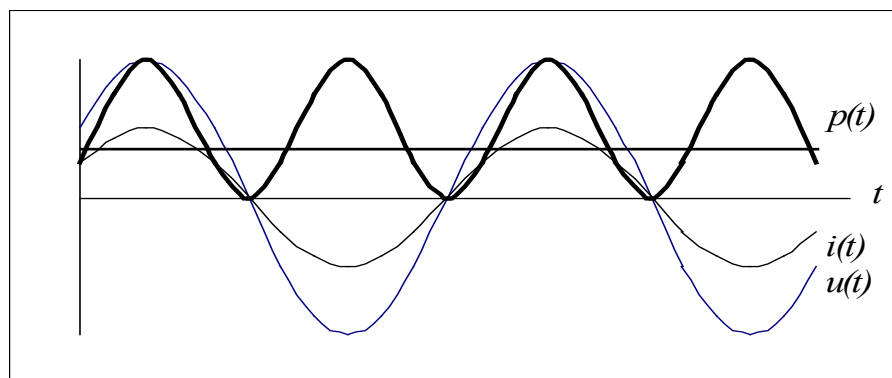
Для цепи, представленной на рис. 3.3, полное сопротивление $Z = R$.

Для определения мгновенной мощности, поступающей в сопротивление, воспользуемся полученным выше соотношением для мгновенной мощности:

$$\begin{aligned} p(t) &= UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \psi_u + \psi_i) = \\ &= UI \cos 0 - UI \cos(2\omega t + 2\psi) = I^2 R - I^2 R \cos(2\omega t + 2\psi). \end{aligned} \quad (3.12)$$

Активная мощность, равная средней мощности за период,

$$P = P_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = I^2 R. \quad (3.13)$$



Таким образом, в резистивном элементе с сопротивлением R электромагнитная энергия преобразуется в тепловую при мощности преобразования $P_{\text{ср}} = I^2 R$. Резистивные элементы вводят в схему также и для учета необратимого преобразования электромагнитной энергии в другие формы энергии (например, в механическую) и для учета излучаемой энергии.

3.2.2. Гармонический ток в индуктивности

Рис. 3.5

Индуктивность – элемент цепи, который учитывает энергию магнитного поля $W_M = \frac{Li^2}{2}$. При увеличении (уменьшении) тока энергия магнитного поля увеличивается (уменьшается). Следовательно, индуктивные элементы можно рассматривать как аккумуляторы (накопители энергии).

При изменении тока в индуктивности возникает ЭДС самоиндукции e_L . По закону Ленца e_L препятствует изменению тока. Поэтому при традиционном выборе одинаковых положительных направлений для тока i_L и ЭДС e_L , как показано на рис. 3.5, знаки e_L и $\frac{di}{dt}$ противоположны и $e_L = -L \frac{di}{dt}$. Чтобы через индуктивность проходил переменный ток, к ее выводам надо приложить напряжение u_L , равное по величине и противоположное по направлению ЭДС e_L :

$$u_L = -e_L = L \frac{di}{dt} = Li', \quad (3.14)$$

где L – коэффициент пропорциональности, называемый *индуктивностью*. Единица измерения индуктивности – *генри* (Гн).

Так как электрическому току всегда сопутствует магнитное поле, любой обтекаемый ток участок цепи, представляющий электротехническое устройство, должен характеризоваться индуктивностью.

Если $i_L = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, тогда

$$u_L = Li' = L\omega I_m \cos(\omega t + \psi_i) = \underbrace{L\omega I_m}_{U_m} \sin\left(\omega t + \underbrace{\psi_i + \frac{\pi}{2}}_{\psi_u}\right) = U_m \sin(\omega t + \psi_u).$$

(3.15)

Закон Ома для цепи с индуктивным элементом $\frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I} = \omega L = X_L$.

$\omega L = X_L$ – индуктивное сопротивление, имеет размерность сопротивления. Полное сопротивление Z также равно X_L .

Начальная фаза напряжения $\psi_u = \psi_i + \frac{\pi}{2}$, сдвиг фаз $\varphi = \psi_u - \psi_i = \frac{\pi}{2}$.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Амплитуда и действующее значение напряжения и тока на индуктивности связаны законом Ома.

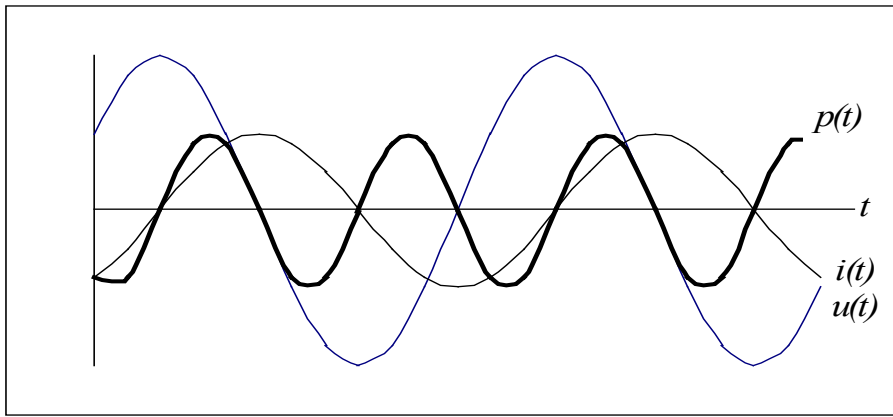
2. Напряжение u_L опережает по фазе ток i_L на $\frac{\pi}{2}$.

Мгновенная мощность

$$\begin{aligned} p(t) &= i(t) \cdot u(t) = U_m I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \sin \omega t = \\ &= \frac{1}{2} U_m I_m \left[\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \omega t\right) - \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \omega t\right) \right] = \\ &= -\frac{1}{2} U_m I_m \cos\left(2\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2} U_m I_m \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t = \\ &= \omega L I^2 \sin 2\omega t = X_L I^2 \sin 2\omega t. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Из выражения (3.16) следует, что средняя мощность за период, а следовательно, и активная мощность равны нулю. Индуктивность – реактивный элемент.

Мгновенная мощность может быть положительной, отрицательной и равной нулю (рис. 3.6). Если $p(t) > 0$, индуктивность заряжается энергией



в виде энергии магнитного поля; если $p(t) < 0$, индуктивность возвращает энергию источнику. Средняя мощность за период $P_{cp} = 0$ (мгновенная мощность колеблется относительно нуля).

Индуктивная проводимость

$$B_L = \frac{I_m}{U_m} = \frac{I}{U} = \frac{1}{\omega L} = \frac{1}{X_L}. \quad (3.17)$$

3.2.3. Гармонический ток в емкости

Емкостный элемент цепи с емкостью C учитывает энергию электрического поля $W_{эл} = \frac{Cu_c^2}{2}$.

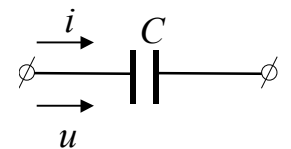


Рис. 3.7

Ток в ветви с емкостью равен скорости изменения заряда на электродах, и при указанном положительном направлении тока знак тока совпадает со знаком производной по времени от заряда q .

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} = Cu'_c. \quad (3.18)$$

Единица измерения емкости – фарада (Ф).

Пусть $u_c(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$, тогда

$$i_c = Cu'_c = CU_m \omega \cos(\omega t + \psi_u) = \underbrace{U_m C \omega}_{I_m} \sin\left(\omega t + \underbrace{\psi_u + \frac{\pi}{2}}_{\psi_i}\right). \quad (3.19)$$

Отсюда $I_m = U_m C \omega$.

Емкостное сопротивление $X_c = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I} = \frac{U_m}{U_m C \omega} = \frac{1}{\omega C}$.

Полное сопротивление Z также равно X_c .

Фаза тока $\psi_i = \psi_u + \frac{\pi}{2}$, а сдвиг фаз $\varphi = \psi_u - \psi_i = -\frac{\pi}{2}$.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Амплитуда и действующее значение напряжения и тока на емкости связаны законом Ома.

2. Напряжение u_c отстает по фазе от тока i_c на $\frac{\pi}{2}$.

Мгновенная мощность

$$p(t) = u_c i_c = I_m U_m \sin \omega t \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = UI \sin 2\omega t = \omega C U^2 \sin 2\omega t.$$

Мгновенная мощность может быть положительной, отрицательной и равной нулю (рис. 3.8). Если $p(t) > 0$, емкость заряжается энергией в виде энергии электрического поля; если $p(t) < 0$, емкость возвращает энергию источнику. Средняя мощность за период $P_{cp} = 0$, а, следовательно, и активная мощность равна нулю, что означает, что происходит обмен энергией без потерь, емкость – реактивный элемент.

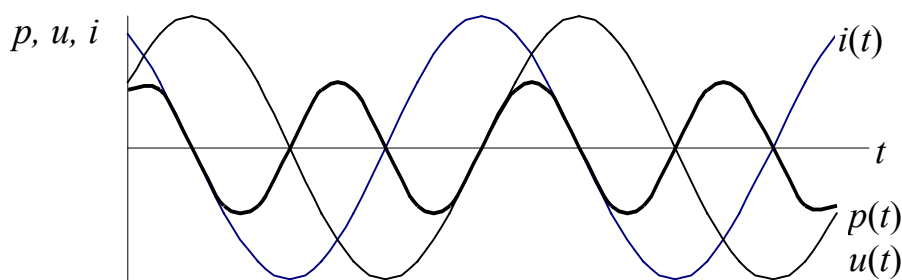


Рис. 3.8

Емкостная проводимость

$$B_c = \frac{I_m}{U_m} = \frac{I}{U} = \omega C = \frac{1}{X_c}. \quad (3.20)$$

3.2.4. Последовательное соединение R, L, C

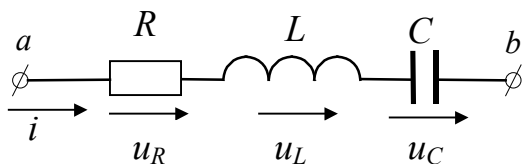


Рис. 3.9

Для мгновенных значений токов и напряжений выполняются I и II законы Кирхгофа.

При прохождении синусоидального тока $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ через

электрическую цепь, состоящую из последовательно соединенных элементов R , L , C (рис. 3.9), на выводах $a - b$ этой цепи создается синусоидальное напряжение, равное по II закону Кирхгофа алгебраической сумме синусоидальных напряжений на отдельных элементах:

$$u_{ab}(t) = u_R + u_L + u_C,$$

$$u_R = iR, \quad u_C = \frac{1}{C} \int i dt, \quad u_L = Li',$$

$$\begin{aligned} u_{ab} &= I_m R \sin(\omega t + \psi_i) + I_m X_L \sin\left(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}\right) + \\ &+ I_m X_C \sin\left(\omega t + \psi_i - \frac{\pi}{2}\right) = I_m R \sin(\omega t + \psi_i) + I_m X_L \cos(\omega t + \psi_i) - (3.21) \\ &- I_m X_C \cos(\omega t + \psi_i) = I_m (R \sin(\omega t + \psi_i) + (X_L - X_C) \cos(\omega t + \psi_i)). \end{aligned}$$

Из тригонометрии известно, что

$$m \sin \alpha + n \cos \alpha = \sqrt{m^2 + n^2} \sin\left(\alpha + \operatorname{arctg} \frac{n}{m}\right). \quad (3.22)$$

Применим формулу (3.22) к выражению (3.21):

$$\begin{aligned} u_{ab} &= I_m \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \sin\left(\omega t + \psi_i + \operatorname{arctg} \frac{X_L - X_C}{R}\right) = \\ &= I_m Z \sin\left(\omega t + \psi_i + \operatorname{arctg} \frac{X_L - X_C}{R}\right) = U_m \sin(\omega t + \psi_u). \end{aligned} \quad (3.23)$$

Реактивное сопротивление последовательной RLC – цепи

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$$

может принимать следующие значения:

$X = 0$ – цепь носит чисто активный характер (в цепи резонанс);

$X > 0$ – цепь носит *индуктивный* характер, т.е. $\omega L > \frac{1}{\omega C}$;

$X < 0$ – цепь носит *емкостный* характер, т.е. $\omega L < \frac{1}{\omega C}$.

Полное сопротивление цепи

$$Z = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2};$$

угол разности фаз

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = \operatorname{arctg} \frac{X}{R} = \operatorname{arctg} \frac{X_L - X_C}{R},$$

определяется по оси ωt от кривой напряжения к кривой тока и бывает острым или прямым: $\varphi < 0$ при емкостном характере цепи (ток опережает напряжение), $\varphi > 0$ при индуктивном характере цепи (ток отстает по фазе от напряжения), $\varphi = 0$ при резистивном характере цепи (индуктивное и емкостное сопротивления равны) – такой режим цепи называют *резонансом напряжений*.

Из выражений $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}$ и $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ следует, что связь активного и реактивного сопротивления с полным сопротивлением выражается следующими формулами:

$$R = Z \cos \varphi; \quad X = Z \sin \varphi, \quad (3.24)$$

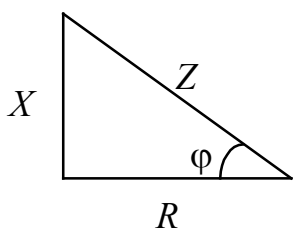


Рис. 3.10

что удобно представлять с помощью треугольника сопротивлений (рис. 3.10).

Умножив левые и правые части выражений для сопротивлений (3.24) на действующее значение тока I , получим соответственно действующие значения напряжений на активном и реактивном сопротивлениях, которые называют *активной и реактивной составляющими напряжения*:

$$U_a = IR = IZ \cos \varphi = U \cos \varphi, \quad U_p = IX = IZ \sin \varphi = U \sin \varphi. \quad (3.25)$$

Тогда действующее значение суммарного напряжения можно определить как $U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}$. Для напряжений также можно построить прямоугольный треугольник напряжений.

ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Лабораторные работы 1,2,3 выполняются с использованием стендов НТС-01/08 со сменными платами для составления электрических цепей, исследуемых при прохождении курса ТЭЦ. В комплекте оборудования имеется шесть сменных плат. Указания по использованию плат при выполнении лабораторных находятся в описании конкретных работ.

При выполнении ряда работ предусмотрено использование мультиметра и осциллографа.

Проведение лабораторных работ по курсу «Теория электрических цепей» при исследовании процессов на физическом оборудовании с проверкой результатов измерений теоретическим расчётом имеет важное методическое значение, как для обоснования положений теории, так и для приобретения навыков работы в электрических цепях.

В лабораторных работах нашли отражение следующие основные разделы курса:

- техника безопасности при работе с электрическими цепями и установками;
- основы электрических измерений;
- основные понятия для цепей постоянного тока;
- анализ цепей постоянного тока;
- основные понятия цепей синусоидального тока;
- анализ цепей синусоидального тока;
- резонанс напряжений;

Курс лабораторных работ предназначен для изучения понятий и методов теории электрических цепей. Каждая работа рассчитана на 2 часа. Работа выполняется бригадами по 3 человека.

Суть работы заключается в четырёх частях:

-изучение теории, сопутствующей исследованиям по теме лабораторной работы, подготовка исходных данных параметров элементов цепей по заданному варианту и при необходимости подготовка таблиц для записи результатов. После подготовки преподаватель может проводить собеседование и принимать решение о допуске студента к выполнению работы ;

-построение цепей на платах, проведение исследований и сохранение результатов;

- выполнение расчёта характеристик исследуемых цепей теоретическими методами и сравнение с результатами моделирования;
- анализ результатов и оформление отчёта.

Третий и четвёртый этапы выполняются в рамках самостоятельной работы, предусмотренной программой курса.

Отчёт о выполнении работы предъявляется каждым студентом преподавателю на следующем занятии. При отсутствии отчёта без уважительных причин студент не допускается к выполнению следующей работы. Отчёт выполняется на двойных листах из тетради в клетку или листах формата А4, скреплённых степлером. Первый лист является титульным и должен содержать:

- наименование университета;
- наименование кафедры;
- тему лабораторной работы;
- номер работы в тексте: «Отчёт о выполнении лабораторной работы №...по курсу ТЭЦ»;
- фамилию и группу студента;
- фамилию преподавателя;
- дату выполнения работы.

Отчёт о работе включает следующие разделы:

- тема работы;
- цель;
- исходные данные;
- результаты измерений;
- теоретические расчёты и построения;
- выводы по цели исследования.

Составители: Прокопеня О.Н., к.т.н., доцент ; Ярошевич А. В., к.т.н., доцент

2. Лабораторная работа № 1. **Основы безопасности и измерений в электрических цепях**

Цель работы: Изучить основные положения безопасности работ с электрическими цепями и освоить методы измерений электрических величин.

Задание на выполнение работы:

2.1. Изучить основные положения по безопасности работ с электрическими цепями .

Действие электрического тока на организм человека

Электротравмы составляют около 1% от общего числа травм на производстве и 20...30% от числа смертельных несчастных случаев. При этом большинство (до 80%) смертельных несчастных случаев приходится на электроустановки напряжением до 1000 В.

Человек попадает под действие электрического тока в следующих случаях:

- при прикосновении к токоведущим частям электроустановки;

- при приближении на недопустимо близкое расстояние к изолированным токоносителям;
- при возникновении в электроустановках аварийного режима;
- при несоответствии параметров электроустановки требованиям нормативных документов;
- при наличии шагового напряжения.

Опасность воздействия электрического тока на человека велика потому, что он незаметен для глаза, не слышим, не чувствуется на расстоянии, не имеет запаха, а воспринимается лишь в момент соприкосновения с незащищенными токонесущими проводами или деталями электроустановок и их корпусами.

Действие электрического тока на человека носит многообразный характер. Проходя через организм человека, электрический ток вызывает термическое, электрическое, электролитическое, биологическое и механическое действие.

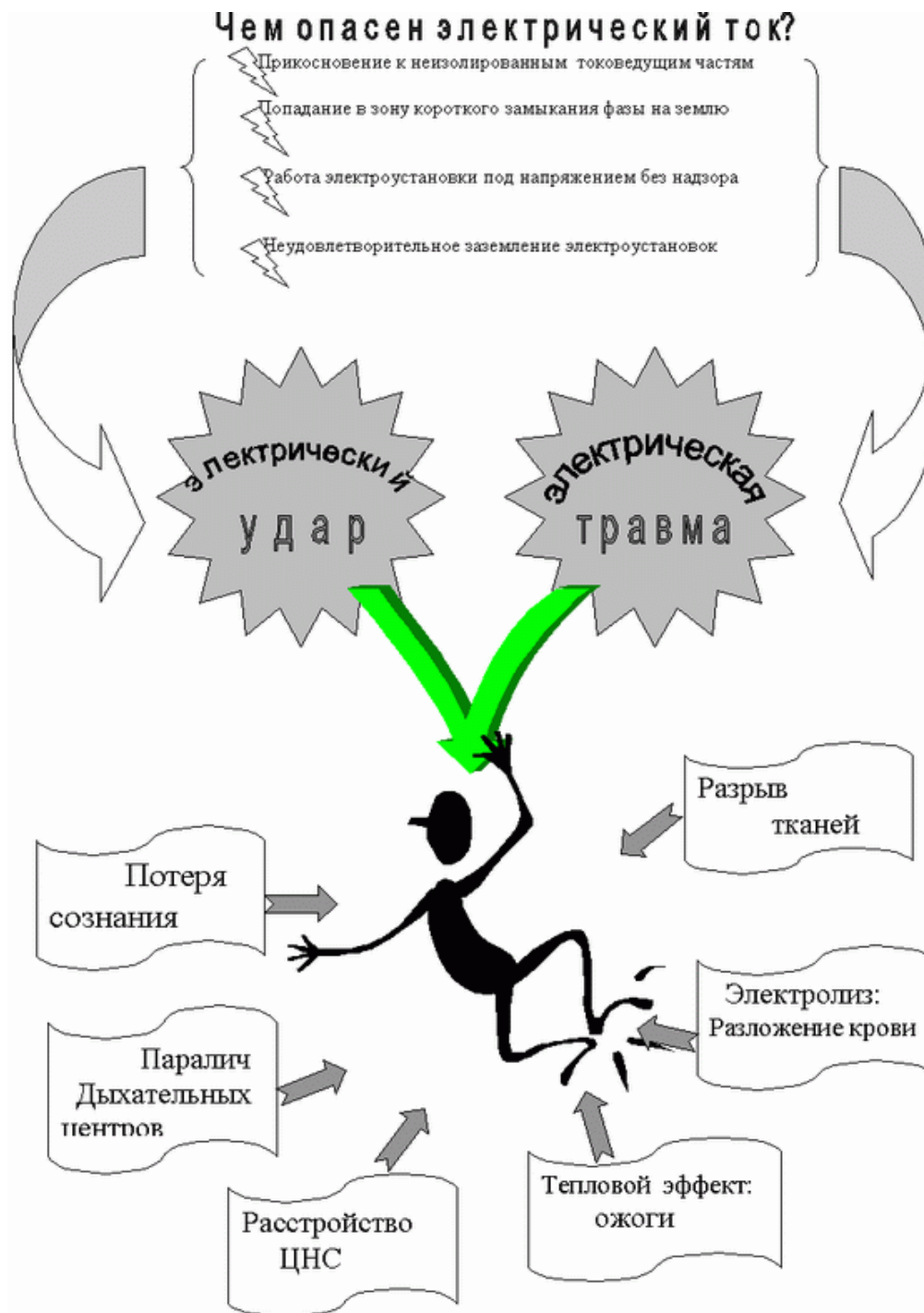
Термическое действие тока проявляется в ожогах отдельных участков тела, нагреве кровеносных сосудов, нервов, мышц сердца, мозга и других органов.

Электролитическое действие тока проявляется в разложении крови и других органических жидкостей организма и вызывает значительные нарушения их физико-химического состава.

Биологическое действие тока проявляется как раздражение и возбуждение живых тканей организма, что сопровождается непроизвольными судорожными сокращениями мышц, в том числе легких и сердца. В результате могут возникнуть различные нарушения и даже полное прекращение деятельности органов кровообращения и дыхания.

Механическое действие тока приводит к разрыву тканей.

Это многообразие действий электрического тока может привести к двум видам поражения: электрическим травмам и электрическим ударам.



Электрические травмы представляют собой четко выраженные местные повреждения тканей организма, вызванные воздействием электрического тока или электрической дуги. В большинстве случаев электротравмы излечиваются, но иногда, при тяжелых ожогах, травмы могут привести к гибели человека.

Различают следующие электрические травмы: электрические ожоги, электрические знаки, металлизация кожи, электроофтальмия и механические повреждения.

Электрический ожог – самая распространенная электротравма. Ожоги бывают двух видов: токовый (контактный) и дуговой.

Токовый ожог обусловлен прохождением тока через тело человека в результате контакта с токоведущей частью и является следствием преобразования электрической энергии в тепловую.

Различают четыре степени ожогов:

I - покраснение кожи;

II - образование пузырей;

III - омертвление всей толщи кожи;

IV - обугливание тканей.

Тяжесть поражения организма обуславливается не степенью ожога, а площадью обожженной поверхности тела.

Токовые ожоги возникают при напряжении не выше 1 ... 2 кВ и являются в большинстве случаев ожогами I и II степени; иногда бывают и тяжелые ожоги.

Дуговой ожог. При более высоких напряжениях между токоведущей частью и телом человека образуется электрическая дуга (температура дуги выше 3500 °С и у нее весьма большая энергия), которая и причиняет дуговой ожог. Дуговые ожоги, как правило, тяжелые III и IV степени.

Электрические знаки (метки тока) возникают при хорошем контакте с токоведущими частями. Они представляют собой припухлость с затвердевшей в виде мозоли кожей серого или желтовато-белого цвета круглой или овальной формы. Края электрического знака резко очерчены белой или серой каймой.

Металлизация кожи – проникновение под поверхность кожи частиц металла вследствие разбрызгивания и испарения его под действием тока, например при горении дуги.

Электророофтальмия – воспаление наружных оболочек глаз – роговицы и конъюнктивы (слизистой оболочки покрывающей глазное яблоко), возникающее в результате воздействия мощного потока ультрафиолетовых лучей, которые энергично поглощаются клетками организма и вызывают в них химические изменения.

Механические повреждения – являются следствием резких произвольных судорожных сокращений мышц под действием тока, проходящего через человека. В результате могут произойти разрывы сухожилий, кожи, кровеносных сосудов и нервной ткани; могут иметь место вывихи суставов и даже переломы костей.

Механические повреждения возникают при относительно длительном нахождении человека под напряжением, и, как правило, являются серьезными травмами.

Под *электрическим ударом* следует понимать возбуждение живых тканей организма протекающим через него электрическим током, сопровождающееся произвольным судорожным сокращением мышц. Степень отрицательного воздействия на организм этих явлений может быть различной. В худшем случае электрический удар приводит к нарушению и даже полному прекращению деятельности жизненно важных органов –

легких и сердца, т.е. к гибели организма. При этом внешних местных повреждений человек может и не иметь.

В зависимости от исхода поражения электрические удары можно условно разделить на следующие четыре степени:

I - судорожное сокращение мышц без потери сознания;

II – судорожное сокращение мышц с потерей сознания, но с сохранившимся дыханием и работой сердца;

III - потеря сознания и нарушение сердечной деятельности или дыхания (либо того и другого вместе);

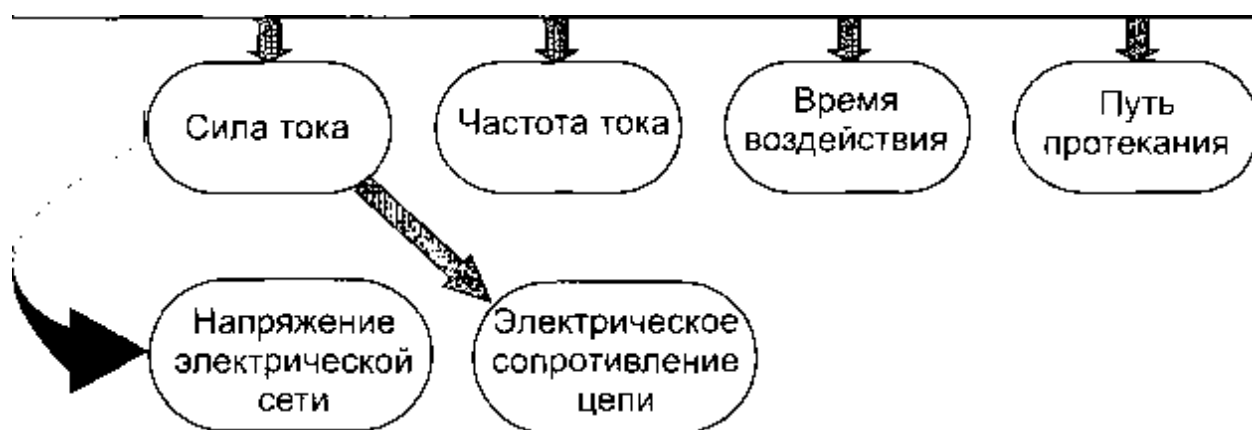
IV – клиническая смерть, т.е. отсутствие дыхания и кровообращения.

Причинами смерти в результате поражения электрическим током могут быть: прекращение работы сердца, прекращение дыхания и электрический шок.

Факторы, определяющие опасность поражения электрическим током

Характер и последствия воздействия на человека электрического тока зависит от следующих факторов:

- электрического сопротивления тела человека;
- величины напряжения и тока;
- продолжительности действия электрического тока;
- пути тока через тело человека;
- рода и частоты электрического тока;
- индивидуальные свойства человека;
- условий внешней среды.



Электрическое сопротивление тела человека. Сила тока I_h , проходящего через какой-либо участок тела человека, зависит от подведенного напряжения U_{np} (напряжения прикосновения) и электрического сопротивления Z_T , оказываемого току данным участком тела:

$$I_h = U_{np} / Z_T \quad (1.1)$$

На участке между двумя электродами электрическое сопротивление тела человека в основном состоит из сопротивлений двух тонких наружных слоев кожи, касающихся электродов, и внутреннего сопротивления остальной части тела.

Плохо проводящий ток наружный слой кожи, прилегающий к электроду, и внутренняя ткань, находящиеся под этим слоем, как бы образуют обкладки конденсатора емкостью C . Из схемы замещения видно, что в наружном слое кожи ток протекает по двум параллельным путям; через активное наружное сопротивление R_n и емкость, электрическое сопротивление которой

$X_c = 1/\omega C$, где $\omega = 2\pi f$, - угловая частота, c^{-1} ; f - частота тока, Гц, Тогда полное сопротивление наружного слоя кожи для переменного тока:

$$Z_n = r_n \cdot X_c / \sqrt{r_n^2 + X_c^2} \quad (1.2)$$

Сопротивление r_n и емкость C зависит от площади электродов (площадь контакта). С ростом площади контакта r_n уменьшается, а емкость C увеличивается. Опыты показали, что внутреннее сопротивление тела r_b можно рассматривать как чисто активное. Таким образом, для пути тока «рука – рука» общее электрическое сопротивление тела может быть представлено схемой замещения, представленной на рисунке 1.1.

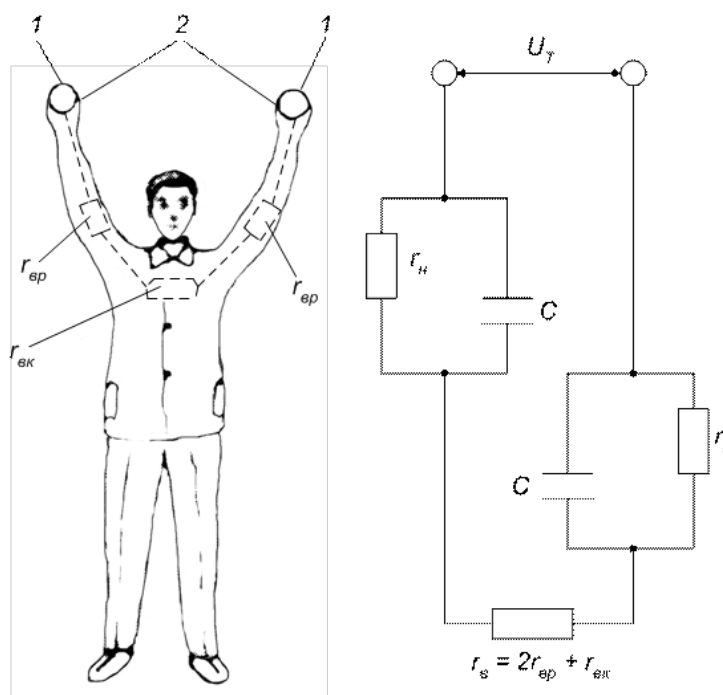


Рис. 1.1. Электрическая схема замещения сопротивления тела человека: 1 – электрод; 2 – наружный слой кожи; $r_{вп}$, $r_{вк}$ - внутреннее сопротивление рук и корпуса.

В качестве расчетной величины при переменном токе промышленной частоты принимают активное сопротивление тела человека равное 1000 Ом.

В действительных условиях сопротивление тела человека не является постоянной величиной. Оно зависит от ряда факторов, в том числе от состояния кожи, состояния окружающей среды, параметров электрической цепи и др.

Повреждение рогового слоя (порезы, царапины, ссадины и др.) снижает сопротивление тела до 500 ... 700 Ом, что увеличивает опасность поражения человека током.

Такое же влияние оказывает увлажнение кожи водой или потом. Т.о., работа с электроустановками влажными руками или в условиях, вызывающих увлажнение кожи, а также при повышенной температуре, вызывающей усиленное потовыделение, усугубляет опасность поражения человека током.

Загрязнение кожи вредными веществами, хорошо проводящими электрический ток (пыль, окалина и т.п.) приводят к снижению ее сопротивления.

Величина напряжения и тока. Основным фактором, обуславливающим исход поражения электрическим током, является сила тока проходящего через тело человека (табл. 1.1)

Напряжение, приложенное к телу человека, также влияет на исход поражения, но лишь, постольку, поскольку оно определяет значение тока, проходящего через человека.

Характер воздействия тока

Ток, проходящий через тело человека, мА	Переменный (50 Гц) ток	Постоянный ток
1	2	3
0,5 ... 1,5	Начало ощущений: слабый зуд, пощипывание кожи	Не ощущается
2 ... 4	Ощущение распространяется на запястье; слегка сводит мышцы.	Не ощущается
5 ... 7	Болевые ощущения усиливаются по всей кисти; судороги; слабые боли во всей руке до предплечья	Начало ощущений; слабый нагрев кожи под электродами
8 ... 10	Сильные боли и судороги во всей руке, включая предплечье. Руки трудно оторвать от электродов.	Усиление ощущения.
10 ... 15	Едва переносимы боли во всей руке. Руки невозможно оторвать от электродов.	Значительный нагрев под электродами и в прилегающей области кожи.
20 ... 25	Сильные боли. Руки парализуются мгновенно, оторвать их от электродов невозможно. Дыхание затруднено.	Ощущение внутреннего нагрева, незначительное сокращение мышц рук.

25 ... 50	Очень сильная боль в руках и в груди. Дыхание крайне затруднено. При длительном воздействии может наступить остановка дыхания или ослабление сердечной деятельности с потерей сознания	Сильный нагрев, боли и судороги в руках. При отрыве рук от электродов возникают сильные боли.
50 ... 80	Дыхание парализуется через несколько секунд, нарушается работа сердца. При длительном воздействии может наступить фибрилляция сердца	Очень сильный поверхностный и внутренний нагрев. Сильные боли в руке и в области груди. Руки невозможно оторвать от электродов.
80 ... 100	Фибрилляция сердца через 2...3 с.; еще через несколько секунд – остановка дыхания.	То же действие выраженное сильнее. При длительном действии остановка дыхания.
300	То же действие за меньшее время.	Фибрилляция сердца через 2...3 с.; еще через несколько секунд остановка дыхания.

Таким образом, величина тока оказывает существенное влияние на степень поражения человека. При одинаковой длительности протекания тока через человека характер воздействия существенно изменяется от ощущения (0,6 ... 1,6 мА) до неотпускания (6 ... 24 мА) и фибрилляции сердца (более 50 мА).

Продолжительность действия электрического тока. Существенное влияние на исход поражения оказывает длительность прохождения тока через тело человека. Продолжительное действие тока приводит к тяжелым, а иногда смертельным поражениям.

При кратковременном воздействии (0,1 ... 0,5 с) ток порядка 100 мА не вызывает фибрилляции сердца. Если увеличить длительность воздействия до 1 с, то этот же ток может привести к смертельному исходу. С уменьшением длительности воздействия значения допустимых для человека токов существенно увеличиваются. Так, при изменении времени воздействия от 1 до 0,1 с допустимый ток возрастет, примерно, в 16 раз.

Пути тока через тело человека. Путь тока в теле человека зависит от того, какими участками тела пострадавший прикасается к токоведущим частям, его влияние на исход поражения проявляется еще и потому, что сопротивление кожи на разных участках тела неодинаково.

Наиболее опасно прохождение тока через дыхательные мышцы и сердце.

Род и частота тока. Установлено, что переменный ток более опасен, чем постоянный.

Исследования показали, что самыми неблагоприятными для человека являются токи промышленной частоты (50 Гц). С уменьшением частоты (от 50 Гц до 0) значения неотпускающего тока возрастают и при частоте равной нулю (постоянный ток – болевой эффект), они становятся больше примерно в 3 раза.

При увеличении частоты (более 50 Гц) значения неотпускающего тока возрастают. Дальнейшее же повышение частоты тока сопровождается снижением опасности поражения, которая полностью исчезает при частоте 45 ... 50 кГц. Но эти токи могут вызвать ожоги как при возникновении электрической дуги, так и при прохождении их непосредственно через тело человека. Снижение опасности поражения током с повышением частоты практически заметно при частоте 1000 ... 2000 Гц.

Индивидуальные свойства человека. Установлено что, физически здоровые и крепкие люди легче переносят электрические удары.

Повышенной восприимчивостью к электрическому току отличаются лица, страдающие болезнями кожи, сердечно-сосудистыми заболеваниями, органов внутренней секреции, легких, нервными болезнями и др.

Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок предусматривают отбор персонала для обслуживания действующих электроустановок по состоянию здоровья. С этой целью проводится медицинское освидетельствование лиц при поступлении на работу и периодически 1 раз в два года в соответствии со списком болезней и расстройств, препятствующих допуску к обслуживанию действующих электроустановок.

Условия внешней среды. Влажность и температура воздуха, наличие заземленных металлических конструкций и полов, токопроводящей пыли оказывают дополнительное влияние на условия электробезопасности.

В зависимости от наличия перечисленных условий, повышающих опасность воздействия тока на человека, все помещения по опасности поражения людей электрическим током подразделяются на следующие классы: без повышенной опасности, с повышенной опасностью, особо опасные.

Помещения без повышенной опасности характеризуются отсутствием условий, создающих повышенную или особую опасность.

Помещения с повышенной опасностью характеризуются наличием в них одного из следующих условий, создающих повышенную опасность:

- сырости (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%) или токопроводящей пыли;
- токопроводящих полов (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и др.);
- высокой температуры (выше +35⁰С);
- возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединения с землей металлоконструкциям зданий, технологическим

аппаратам, механизмам и т. п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования – с другой.

Особо опасные помещения характеризуются наличием одного из следующих условий, создающих особую опасность:

-особой сырости (относительная влажность воздуха близка к 100%: потолок, стены, пол и предметы в помещении покрыты влагой);

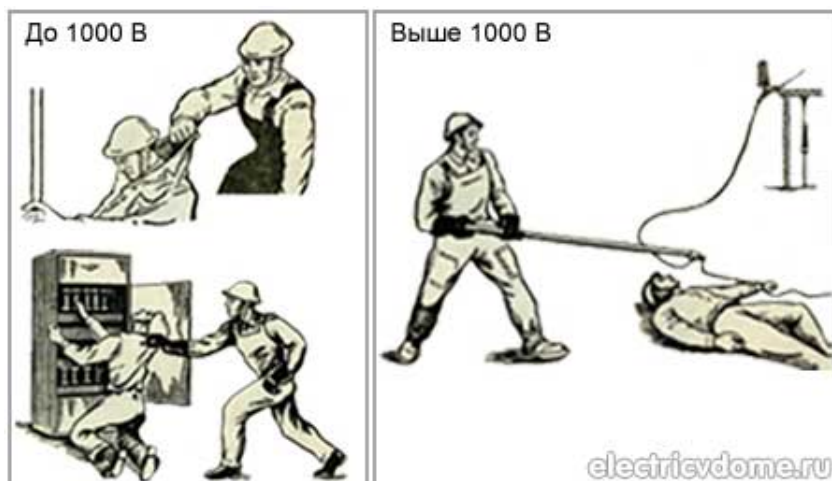
- химически активной или органической среды (разрушающей изоляцию и токоведущие части электрооборудования);

- одновременно двух или более условий повышенной опасности.

Освобождение человека от действия электрического тока

При поражении человека электрическим током необходимо быстро и осторожно, так чтобы самому не попасть под напряжение, освободить его от воздействия тока. Для этого лучше всего отключить установку ближайшим выключателем или разорвать цепь тока (в электроустановках до 1000 В), перерезав провод при помощи инструментов с изолированными ручками (нож, кусачки, топор и др.) В случаях, когда пострадавший в момент поражения находится на высоте, после отключения электроустановки ему угрожает падение. Необходимо принять меры, предупреждающие падение или возможные ушибы пострадавшего.

При невозможности отключения установки для освобождения пострадавшего от воздействия электрического тока необходимо отделить его от токоведущих частей. В установках до 1000 В для этого используют любой непроводящий ток предмет, например, можно встать на сверток сухой одежды или доску, обмотав шарфом руку, взять пострадавшего за сухую одежду и оттащить его от токоведущих частей. Лучше, конечно, использовать для этого диэлектрические средства защиты (перчатки, боты, коврики).



Доврачебная помощь пострадавшим от электрического тока

Оказание первой помощи зависит от состояния, в котором находится пораженный электрическим током. Для определения этого состояния необходимо немедленно:

- уложить пострадавшего на спину на твердую поверхность;
- проверить наличие у пострадавшего дыхания, пульса;
- выяснить состояние зрачка – узкий или расширенный (расширенный зрачок указывает на резкое ухудшение кровоснабжения мозга).

Во всех случаях поражения электрическим током необходимо вызвать врача независимо от состояния пострадавшего.

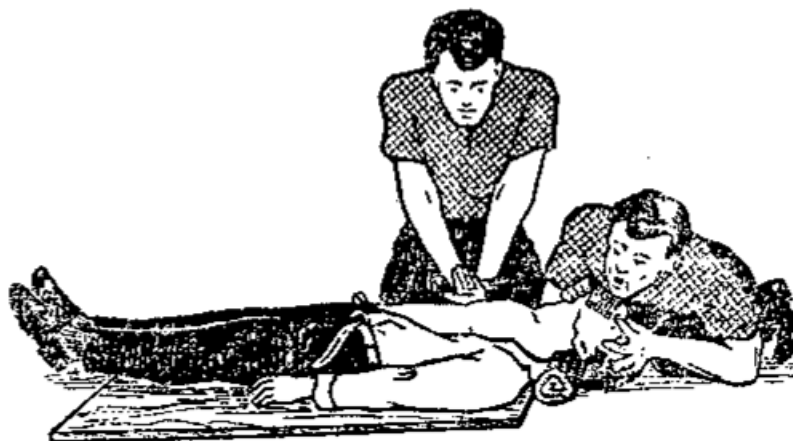
При этом следует немедленно начать оказание соответствующей помощи пострадавшему:

- если пострадавший находится в сознании, но до этого был в состоянии обморока или продолжительное время находился под током, его следует удобно уложить на подстилку, накрыть чем-нибудь (одеждой) и до прибытия врача обеспечить полный покой, непрерывно наблюдая за дыханием и пульсом;

- если сознание отсутствует, но сохранились устойчивые пульс и дыхание, нужно ровно и удобно уложить пострадавшего на подстилку, расстегнуть пояс и одежду, обеспечить приток свежего воздуха и полный покой; давать пострадавшему нюхать нашатырный спирт и обрызгивать его водой;

- если пострадавший плохо дышит (резко, судорожно), делать искусственное дыхание и наружный массаж сердца;

- если отсутствуют признаки жизни (дыхание, сердцебиение, пульс), нельзя считать пострадавшего мертвым. В этом случае надо делать искусственное дыхание и массаж сердца.



Вопросы для самопроверки

1. Какие действия может оказывать электрический ток на человека?
2. Назовите местные электротравмы.
3. На какие степени подразделяются электрические удары?
4. Что влияет на сопротивление тела человека?
5. Назовите три критерия электробезопасности.
6. Как продолжительность тока влияет на степень поражения человека электрическим током?

7. Как путь прохождения тока влияет на степень поражения человека электрическим током?

8. Как можно освободить человека от действия электрического тока?

2.2. Изучить устройство мультиметра и основные приёмы измерений электрических параметров.

Мультиметр - это универсальный комбинированный измерительный прибор, который сочетает в себе функции нескольких измерительных приборов.

Набор функций мультиметра - это измерение величины напряжения, тока, сопротивления. измерение емкости конденсаторов, частоты тока, прозвонка диодов (измерение падения напряжения на р-п переходе), звуковой пробник, измерение температуры и многое другое.

Для примера возьмем широко распространенные мультиметры серии **MS8200G**



Индикатор для отображения значений измеряемых величин

Кнопка POWER – включение питания

Жёлтая кнопка – подсветка индикатора

Н – кнопка сохранения последнего показания

Переключатель видов и диапазонов измерений

Ω – сопротивление (200 Ом...20 Мом)

V === - постоянное напряжение DCV
(200mV...1000V)

V ~ - переменное напряжение ACV(2V...700V)

Hz – частота

TEMP - температура

A~ - переменный ток ACA (2mA...10A)

A=== - постоянный ток DCA(2mA...10A)

F – ёмкость (2nF...20μF)

▶ - проверка диода, прозвонка цепи

Гнёзда для щупов

COM – общий(чёрный провод, -, катод)

V Ω – сигнальный(красный провод, +, анод):
напряжение, сопротивление, температура,
ёмкость, диод

mA - сигнальный(красный): ток (MAX 200mA)

10A - сигнальный(красный): ток(MAX 10A)

Основные функции цифрового

мультиметра и назначение органов управления прибором

Рассмотрим внешнюю панель мультиметра. В верхней части расположен жидкокристаллический индикатор, на котором и будут отображаться измеряемые нами величины.

Под индикатором три кнопки : - питание; - подсветка; - сохранение.

Далее по центру прибора, расположен переключатель величин и пределов измерения. Под переключателем четыре гнезда для измерительных проводов (щупов):

- правое гнездо для общего (минусового) провода во всех режимах и на всех диапазонах;

Далее влево:

- гнездо $V \Omega$ для сигнального (плюсового) провода во всех режимах и на всех диапазонах кроме режима измерения тока ;

- гнездо для сигнального (плюсового) провода в режиме измерения тока до 200 мА;

- гнездо для сигнального (плюсового) провода в режиме измерения тока до 10А.

Установку диапазона измерения тока и открывание гнёзд измерения тока можно выполнить только после извлечения щупа из гнезда $V \Omega$.

Будьте внимательны, при измерении тока больше 200 мА плюсовой провод подключать только крайнее левое гнездо!

Мультиметр питается от 9-вольтовой батарейки типа «Крона» или согласно типоразмеру - 6F22.

Внутри, под задней крышкой мультиметра имеется предохранитель на 250 мА, который защищает прибор в режиме измерения тока на пределах до 200 мА.

Измерение мультиметром электрических величин

Для измерения напряжения на элементе (участке) электрической цепи прибор включается параллельно этому элементу (или участку цепи) Рис.1.5а.

Для измерения тока в цепи прибор **включается в разрыв** измеряемой цепи (то есть последовательно с элементами цепи)Рис.1.5б.

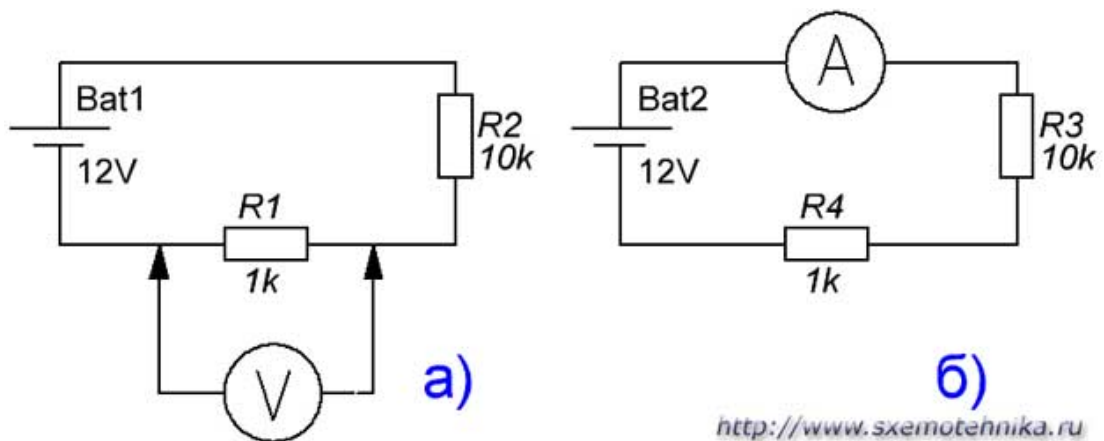


Рис.1.5

Как пользоваться мультиметром при измерении постоянного напряжения.

Первое, что необходимо сделать, это выбрать род измеряемого напряжения и предел измерения. Для измерения постоянного напряжения мультиметр имеет целый диапазон значений постоянного напряжения, которые устанавливаются с помощью переключателя пределов.

Для установки предела измерения сначала определим приблизительно значение напряжения, которое нужно измерить. Если измеряете напряжение элементов питания (батареек, аккумуляторов), то ищите надписи на элементах, если измеряете, напряжение в различных электрических схемах, то оцените величину напряжения расчётом параметров цепи.

Допустим нам необходимо измерить постоянное напряжение на *аккумуляторе*.

1. Изучаем надписи на аккумуляторе, видим, что напряжение АКБ равно 7,4 вольта.

2. Устанавливаем предел измерения **больше** этого напряжения, ближайший к этому значению, тогда измерения будут точнее. Для нашего примера предел измерения 20 вольт.

3. Подключаем мультиметр к клеммам аккумулятора (или параллельно тому участку, где вы проводите измерение напряжения).

- щуп черного цвета один конец к гнезду СОМ мультиметра, другой к минусу измеряемого источника напряжения;

- щуп красного цвета к гнезду $V\Omega$ и к плюсу измеряемого источника напряжения.

4. Снимаем значение постоянного напряжения с ЖК-индикатора.

Примечание: если вам не известно примерная величина измеряемого значения напряжения, то измерение необходимо начинать с установки самого большого предела и последовательно приближаться к пределу наиболее близкому к измеряемому значению напряжения.

Измерение переменного напряжения производится по той же схеме, что и постоянного.

Как пользоваться мультиметром при измерении постоянного тока.

Для измерения тока мультиметр подключается в разрыв ветви цепи, ток которой нужно измерить.

Если значения тока будут меньше 200mA, то выбрав соответствующий предел измерения, красный щуп подключаем к гнезду **mA** и включаем мультиметр в разрыв цепи.

Если значения тока будут больше 200mA, то подключаем красный щуп к гнезду 10A.

Измерение переменного тока производится по той же схеме, что и постоянного.

Как пользоваться мультиметром при измерении сопротивления.

Правила выбора пределов измерения сопротивления следующие:

- если известно значение измеряемого сопротивления и необходимо выполнить проверку, то предел измерения устанавливается ближайшим большим к измеряемой величине. В этом случае погрешность измерений минимальна;

- если значение сопротивления неизвестно, то измерения начинают с диапазона с максимальным значением (20Мом), затем уменьшают пределы, приближаясь к измеряемому значению. Если на дисплее отображается «1», то измеряемое значение больше установленного предела, нужно увеличить диапазон.

Для измерения сопротивление необходимо *отключить от цепи*, разорвав ветвь, в которой оно находится.

Для других видов измерений воспользуйтесь пособиями по технике измерений электрических параметров.

2.3. Провести измерения мультиметром сопротивления всех резисторов, напряжения на источнике и токов ветвей цепи.

Принципиальная схема исследуемой цепи представлена на рис 1.6.

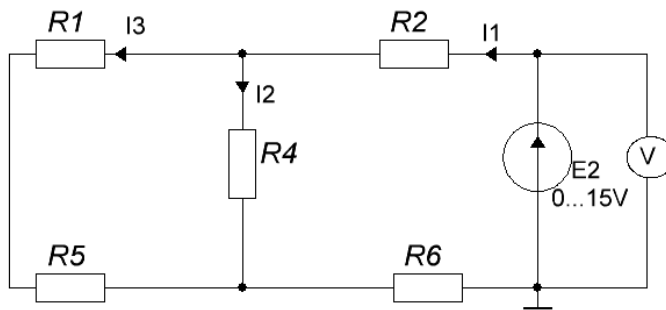


Рис.1.6

3.1 На монтажной плате NTC-01.8/01 измерить мультиметром величину сопротивления резисторов, имеющих в схеме на рис.1.6.

3.2 Собрать цепь по схеме на монтажной плате, установив перемычки в соответствии с фото1.1.

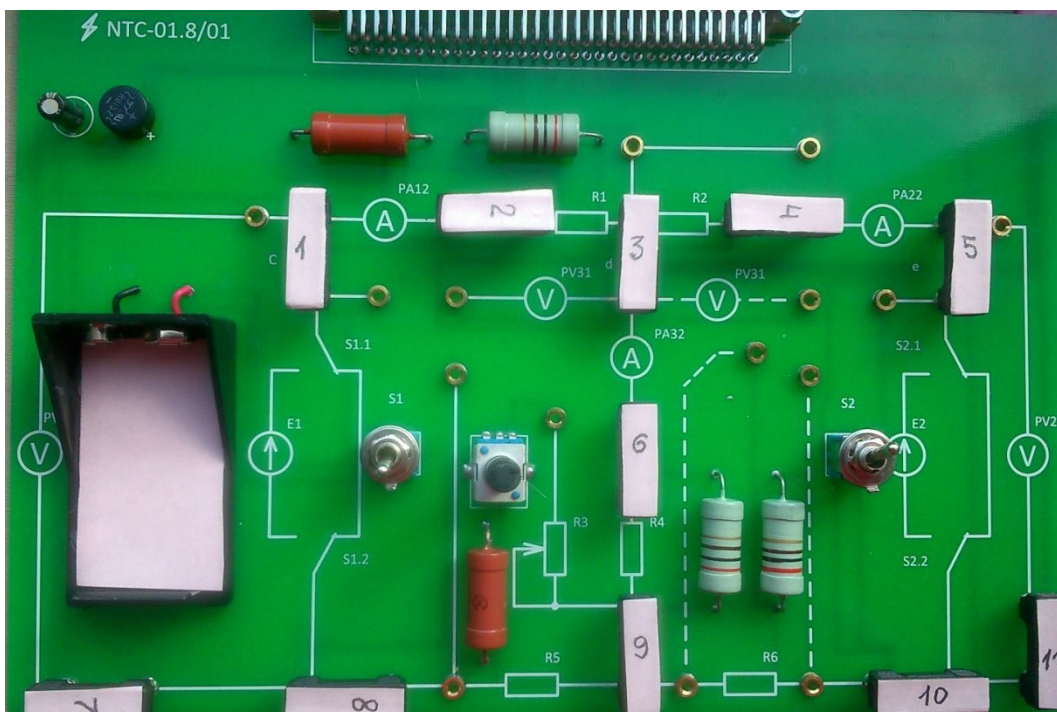


Фото1.1

3.3 Включив питание стенда, установить мультиметр на измерение напряжения на источнике $E2$ и вращением ручки слева внизу стенда установить 12 Вольт. Измерить токи $I1$, $I2$, $I3$. Проверить правильность измерений расчётом цепи.

2.4. Содержание отчёта.

Отчёт по лабораторной работе выполняется каждым студентом на основе экспериментальных данных, полученных при выполнении работы бригадой и расчётов, произведённых самостоятельно. Отчёт выполняется на двойных листах из тетради в клетку, первый лист титульный. В отчёт включаются следующие разделы:

- цель работы;
- краткие ответы на вопросы по технике безопасности;
- принципиальную схему цепи для измерений с обозначением мест подключения мультиметра в режиме амперметра и вольтметра;
- значения всех измеренных параметров;
- проверку измерений расчётом цепи;
- выводы по работе в целом.

3. Лабораторная работа № 2. Анализ разветвлённых цепей постоянного тока

Цель работы: Определить токи в ветвях многоконтурных цепей с одним и двумя источниками напряжения путём измерений в цепи и расчётов, сравнить результаты.

Задание на выполнение работы:

3.1. Исследование разветвлённой цепи с одним источником.

3.1.1. По схеме на рис.2.1 собрать цепь на монтажной плате NTC – 01.8/01 в соответствии с фото 3.

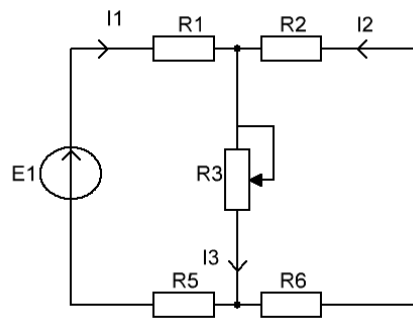


Рис.2.1

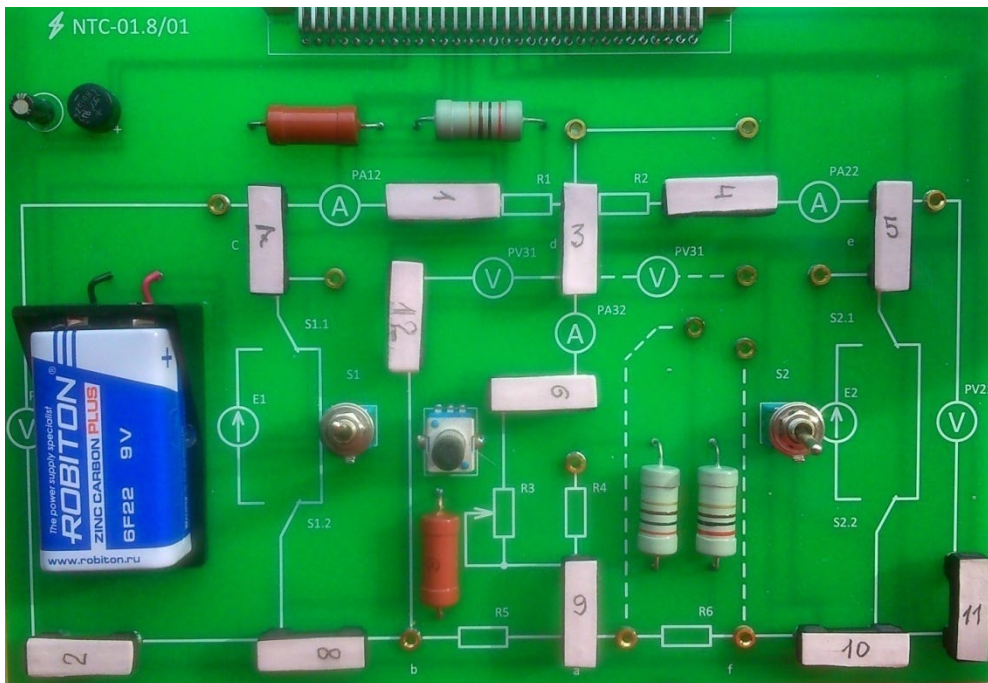


Фото2.

Тумблер источника $E1$ включён (вверх), тумблер источника $E2$ выключен (вниз).

Параметры элементов цепи: $E1 = 9В(PV11)$; $R1 = 51\text{ Ом}$; $R2 = 2000\text{ Ом}$;

$R3 = N \cdot 200 \text{ Ом}$, N – номер бригады; $R5 = 50 \text{ Ом}$, $R6 = 200 \text{ Ом}$. С помощью омметра, удалив перемычку (6), установить заданное для варианта бригады значение $R3$. Измерение сопротивления выполнять мультиметром.

3.1.2. Измерить значения напряжения источника $E1$ ($PV11$) и токи ветвей $I1$ ($PA12$), $I2$ ($PA22$), $I3$ ($PA32$).

При оформлении отчёта рассчитать цепь на рис.2.1 методом пропорциональных величин.

3.2. Исследование разветвлённой цепи с двумя источниками.

3.2.1. Схема цепи на рис.2.2. Цепь на монтажной плате в соответствии с фото2.

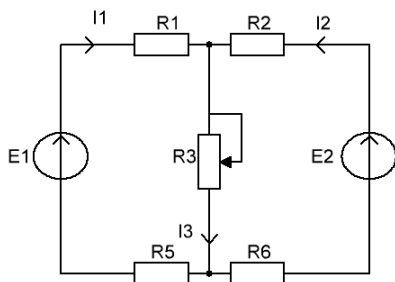


Рис.2.2

Включить источник $E2$. Установить напряжение $U_2 = 10 + N \cdot 0,5 \text{ В}$ ($PV21$) на холостом ходу (разрыв цепи, перемычка 4). N – номер бригады. Остальные параметры из предыдущего задания.

3.2.2. Измерить значения напряжения источников $E1$ ($PV11$), $E2$ ($PV21$) и токи ветвей $I1$ ($PA12$), $I2$ ($PA22$), $I3$ ($PA32$).

При оформлении отчёта рассчитать цепь на рис.2.2 методом узловых потенциалов (методом двух узлов).

3.3. Теоретические сведения

Расчет разветвленных цепей с одним источником

Разветвленную цепь с одним источником обычно упрощают, преобразуя в неразветвленную (рис. 2.3). Основная проблема состоит в нахождении токов и напряжений ветвей исходной схемы, поскольку в результате преобразования такие ветви не сохраняются.

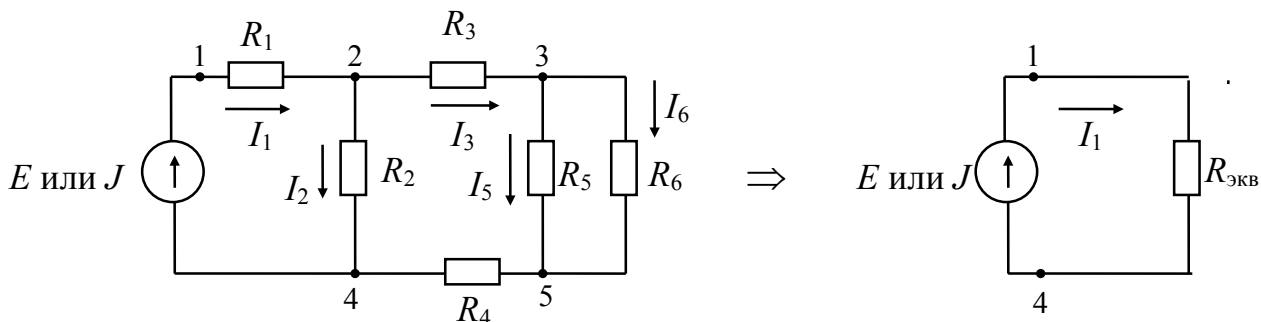


Рис.2.3

Для определения токов и напряжений в схеме рис. 2.1. сначала определяется $R_{экв}$ смешанного соединения потребителей относительно зажимов источника (точки 1 и 4 на рис. 2.3.). Затем, если цепь питается источником напряжения, то определяется ток по формуле:

$$I = \frac{E}{R_{экв}}$$

Если цепь питается источником тока, то определяется напряжение

$$U_J = J \cdot R_{экв}$$

Порядок дальнейшего расчета одинаков для обоих случаев, т.к. известны E или U_J и I или J неразветвленной части схемы. Рассмотрим порядок расчета для представленной на рис.2.3 цепи.

Ток в потребителе R_1 совпадает с найденным током неразветвленной части I , а напряжение $U_1 = I_1 \cdot R_1$.

$$U_{24} = E - I_1 \cdot R_1; \quad I_2 = \frac{U_{24}}{R_2} = U_{24} \cdot G_2.$$

Ток I_3 определяется по закону Кирхгофа: $I_3 = I_1 - I_2$.

$$U_{35} = U_{24} - I_3 \cdot (R_3 + R_4); \quad I_5 = \frac{U_{35}}{R_5} = U_{35} \cdot G_5; \quad I_6 = \frac{U_{35}}{R_6} = U_{35} \cdot G_6.$$

Недостаток заключается в том, что цепь приходится рассчитывать дважды – преобразованную и исходную.

При расчетах удобно пользоваться *формулой о токах в двух параллельных пассивных ветвях*. Выведем ее на примере схемы рис. 2.3. Напряжение U_{35} по закону Ома определяется по формуле

$$U_{35} = I_3 R_{56} = I_3 \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6}$$

Тогда ток I_5 можно определить

$$I_5 = \frac{U_{35}}{R_5} = I_3 \frac{R_5 R_6}{(R_5 + R_6) R_5} = I_3 \frac{R_6}{R_5 + R_6}$$

Аналогично можно определить ток

$$I_6 = I_3 \frac{R_5}{R_5 + R_6}$$

Таким образом, ток в одной из двух параллельных ветвей равен току неразветвленной части (общей ветви), умноженному на сопротивление противоположной ветви, деленному на сумму сопротивлений обеих ветвей.

Известен еще один метод расчета таких цепей – *метод пропорциональных величин*. Он применим к «удлиненным» цепям (цепным соединениям).

Суть этого метода состоит в следующем: в ветви наиболее удаленной от источника (R_6) задаются некоторым значением тока или напряжения. Для удобства расчетов обычно это 1А или 1В. Затем перемещаясь к началу цепи определяют поочередно токи и напряжения всех ветвей вплоть до ветви, содержащей источник. Тем самым определяют какие напряжение U_{BX} и ток I_{BX} должен иметь источник для того, чтобы вызвать во всех ветвях токи и напряжения вычисленных значений. Если ЭДС (E) или задающий ток (J) с этими значениями не совпадают, то необходимо пропорционально изменить вычисленные значения токов и напряжений ветвей путем умножения их на отношение $\frac{E}{U_{BX}}$ или $\frac{J}{I_{BX}}$.

Для схемы на рис. 3.3. пусть $I_6 = 1$. Тогда $U_{35} = I_6 \cdot R_6$ $I_5 = \frac{U_{35}}{R_5}$.

I_3 можно определить по I закону Кирхгофа: $I_3 = I_5 + I_6$.

U_{24} определяем по II закону Кирхгофа: $U_{24} = I_3 \cdot (R_3 + R_4) + U_{35}$.

По закону Ома: $I_2 = \frac{U_{24}}{R_2}$, по I закону Кирхгофа: $I = I_2 + I_3$.

$U_{BX} = U_{24} + I_1 \cdot R_1$.

Коэффициент пересчета определяется следующим образом: $k = \frac{E}{U_{BX}}$. Все

рассчитанные значения токов и напряжений необходимо умножить на коэффициент k .

Расчет разветвленных цепей с несколькими источниками

Метод расчета электрических цепей, в котором за неизвестные принимают потенциалы узлов схемы, называют *методом узловых потенциалов*. Число неизвестных в методе узловых потенциалов равно числу уравнений, которые необходимо составить для схемы по I закону Кирхгофа.

Методика расчета цепи постоянного тока методом узловых потенциалов следующая:

1. Обозначить все токи ветвей и их положительное направление.
2. Произвольно выбрать опорный узел и пронумеровать все остальные узлы.
3. Определить собственные и общие проводимости узлов, а также узловые токи, т.е. рассчитать коэффициенты в системе уравнений.
4. Записать систему уравнений в виде

$$\begin{cases} G_{11}\varphi_1 + G_{12}\varphi_2 + \dots + G_{1k}\varphi_k = J_{11} \\ G_{21}\varphi_1 + G_{22}\varphi_2 + \dots + G_{2k}\varphi_k = J_{22} \\ \dots \\ G_{k1}\varphi_1 + G_{k2}\varphi_2 + \dots + G_{kk}\varphi_k = J_{kk} \end{cases} \quad \text{L} \quad \begin{cases} \text{для 1-го узла} \\ \text{для 2-го узла} \\ \dots \\ \text{для } n\text{-го узла} \end{cases}$$

Собственная проводимость узла (G_{ii}) представляет собой арифметическую сумму проводимостей всех ветвей, соединенных в i -ом узле.

Общая проводимость i -ого и j -ого узлов ($G_{ij} = G_{ji}$) представляет собой взятую со знаком « \rightarrow » сумму проводимостей ветвей, присоединенных одновременно к i -ому и j -ому узлам.

Проводимости ветвей с источниками тока полагаются равными нулю и в собственные и общие проводимости не входят!

Узловой ток (J_{ii}) состоит из двух алгебраических сумм: первая содержит токи источников тока, содержащиеся в ветвях, соединенных в i -ом узле; вторая представляет собой произведение ЭДС источников напряжения на проводимости соответствующих ветвей, соединенных в i -ом узле. Со знаком « $+$ » в эту сумму входят E_i источников, действие которых направлено к узлу, со знаком « \rightarrow » остальные.

В этой системе каждому узлу соответствует отдельное уравнение.

5. Полученную систему уравнений решить относительно неизвестных ($n - 1$) потенциалов.

6. С помощью обобщенного закона Ома рассчитать неизвестные токи.

Для разветвленной цепи, имеющей только два узла и произвольное количество ветвей, метод узловых потенциалов вырождается в *метод двух узлов*. Решение сводится к отысканию значения потенциала одного из узлов, т.к. потенциал другого узла может быть принятым равным нулю.

Система уравнений превращается в одно уравнение:

$$\varphi_1 \cdot G_{11} = J_{11} \Rightarrow U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{J_{11}}{G_{11}} = \frac{\pm \sum E \cdot G \pm \sum J}{\sum G}$$

при условии, что $\varphi_2 = 0$.

После определения U_{12} токи ветвей и напряжения источников тока находят при помощи обобщенного закона Ома.

Пример.

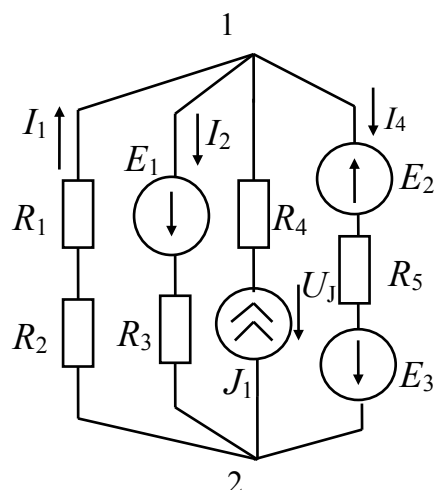


Рис. 2.4.

5.

3.4. Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе выполняется каждым студентом на основе экспериментальных данных, полученных при выполнении работы бригадой и теоретических расчётов и построений, произведённых самостоятельно. Отчёт выполняется на двойных листах из тетради в клетку,

первый лист титульный. В отчёт включаются следующие разделы:

- тема работы;
- цель работы;
- содержание работы. Содержание работы включает наименование опыта, схемы электрических цепей, значения параметров элементов и исходные данные для опытов, результаты измерений, построенные характеристики, расчётные параметры и выводы по каждому опыту;
- выводы по работе в целом.

Пусть $\varphi_2 = 0$, тогда

$$U_{12} = \varphi_1 = \frac{-\frac{E_1}{R_3} + J + \frac{E_2 - E_3}{R_5}}{\frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5}}$$

По обобщенному закону Ома:

$$I_1 = \frac{U_{21}}{R_1 + R_2} = \frac{-U_{12}}{R_1 + R_2} \quad I_2 = \frac{U_{12} + E_1}{R_3}$$

4. Лабораторная работа №3. Методы наложения и эквивалентного генератора для линейных цепей

Цель работы : выполнить экспериментальную проверку методов наложения и эквивалентного генератора при анализе разветвлённой цепи с двумя источниками.

Задание на выполнение работы:

4.1. Проверка метода наложения.

Для проверки метода наложения провести измерения тока ветви R_3 цепи с двумя источниками и подтвердить правильность метода измерением токов во вспомогательных схемах с одним источником. Определить ток ветви R_3 методом эквивалентного генератора.

4.1.1. По схеме на рис.3.1 собрать цепь на монтажной плате NTC – 01.8/01 в соответствии с фото 3.

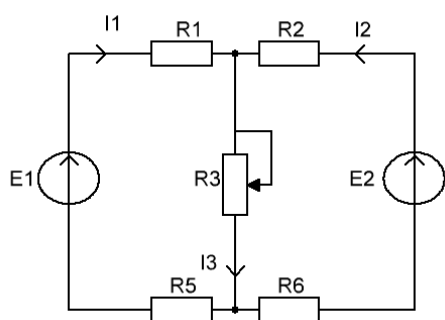


Рис.3.1

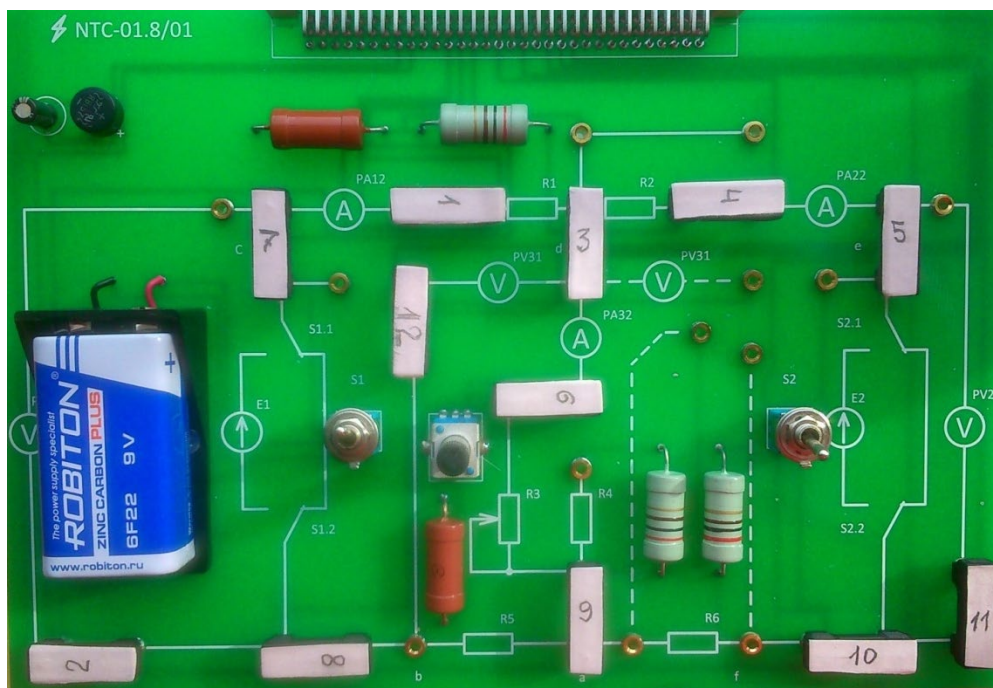


Фото 3.

Тумблер источника $E1$ включён(вверх), тумблер источника $E2$ включён(вверх).

Параметры элементов цепи: $R1 = 51 \text{ Ом}$; $R2 = 200 \text{ Ом}$;
 $R3 = N \cdot 200 \text{ Ом}$, N – номер бригады; $R5 = 51 \text{ Ом}$; $R6 = 200 \text{ Ом}$. С
 помощью омметра, удалив перемычку (6), установить заданное для варианта
 бригады значение $R3$. Измерение сопротивления выполнять мультиметром.
 Повернуть регулятор напряжения $E2$ вправо на *max*, включить питание
 стенда. Измерить значения напряжения источника $E1$ (PV11) и $E2$ (PV21),
 ток ветви $I3$ (PA32).

4.1.2. Удалить из цепи источник $E1$ в соответствии со схемой на
 рис.3.2.

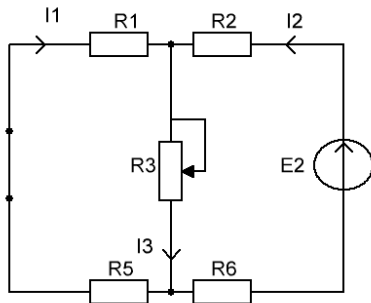


Рис.3.2

Для удаления $E1$ выключить (вниз) тумблер на плате.
 Измерить ток $I3$ ветви $R3$.

4.1.3. Удалить из цепи источник $E2$ в соответствии со схемой на
 рис.3.3, для
 этого включить $E1$ и выключить $E2$.

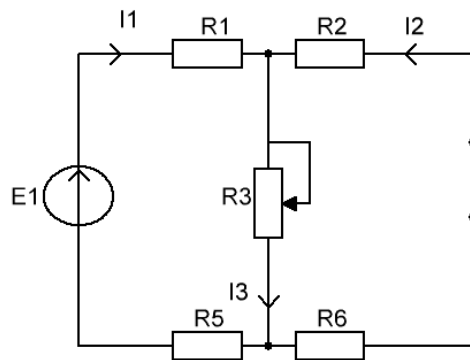


Рис.3.3

Измерить ток $I3''$ ветви $R3$.

Проверить выполнение теоремы наложения.

$$I_3 = I_3' + I_3''$$

4.2. Проверка метода эквивалентного генератора.

4.2.1. Изъять из цепи по схеме на рис.4.4 резистор $R3$ и в
 образовавшейся цепи измерить напряжение холостого хода U_{xx} (PV31).

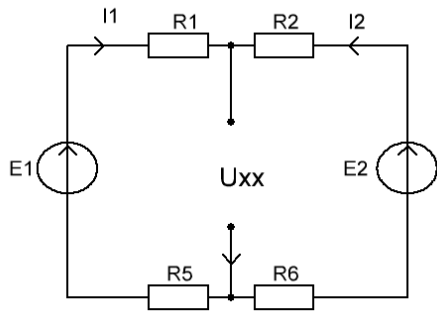


Рис.3.4

4.2.2. По схеме на рис.3.5 рассчитать эквивалентное сопротивление R_o .

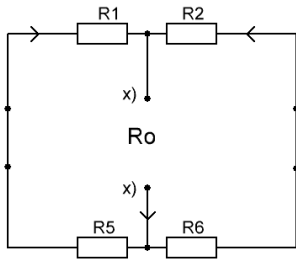


Рис.3.5

4.2.3. Рассчитать ток ветви I_3 по схеме с эквивалентным источником напряжения по схеме на рис.3.6.

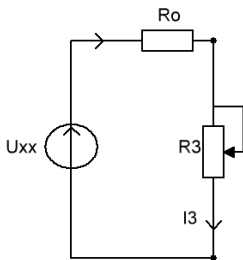


Рис.3.6

4.2.4. Сравнить рассчитанное значение тока с током I_3 , измеренным в методе наложения и сделать вывод по теореме об эквивалентном генераторе.

4.2.5. Провести расчёт цепи на рис.3.1 методом двух узлов и сравнить параметры с результатами измерений.

4.3. Теоретические сведения:

Теорема наложения.

Метод наложения заключается в следующем: ток или напряжение произвольной ветви или участка разветвленной электрической цепи постоянного тока определяется как алгебраическая сумма токов или напряжений, вызванных каждым из источников в отдельности.

При использовании этого метода задача расчета разветвленной электрической цепи с n источниками сводится к совместному решению цепей с одним источником.

Методика расчета линейной электрической цепи методом наложения:

5. Произвольно задать направление токов в ветвях исследуемой цепи.

6. Исходную цепь, содержащую n источников, преобразовать в n подсхем, каждая из которых содержит только один из источников, прочие источники исключаются следующим образом: источники напряжения замыкаются накоротко, а ветви с источниками тока обрываются. При этом необходимо помнить, что внутренние сопротивления реальных источников играют роль потребителей и поэтому они должны оставаться в подсхемах.

7. Определить токи каждой из подсхем любым из известных методов. В большинстве случаев расчет ведется по закону Ома с использованием метода эквивалентных преобразований пассивных цепей.

8. Полный ток в любой ветви исходной цепи определяется как алгебраическая сумма токов вспомогательных подсхем.

Теорема об эквивалентном генераторе.

Линейную цепь по отношению к любой из её ветвей можно заменить эквивалентным источником напряжения U_{xx} с последовательно включённым сопротивлением R_o .

Например, цепь на рис.3.1 по отношению к ветви R_3 можно заменить цепью на рис.4.6.

Напряжение эквивалентного источника U_{xx} определяется как напряжение на полюсах $x) - x)$ ветви, ток которой необходимо рассчитать. Для расчёта U_{xx} используется цепь с исключённым потребителем в этой ветви (рис.4.4). Напряжение U_{xx} можно определить из уравнения баланса напряжений любого контура упрощённой цепи, замыкающегося через полюса $x) - x)$.

Для расчёта R_o используется цепь с заменой источников напряжения коротким замыканием, а источников тока – разрывом ветви (рис.3.5).

Методика расчета линейной электрической цепи методом эквивалентного генератора:

1. Отключается потребитель в ветви с искомым током и на зажимах обозначается U_{xx} по направлению тока.

2. В образовавшейся более простой цепи находится U_{xx} с помощью закона напряжений Кирхгофа, записанного для любого контура, содержащего U_{xx} . Токи в ветвях упрощенной схемы определяются любым способом.

3. Определяется R_o на зажимах разомкнутой ветви при условии $E=0$ и $J=0$ пассивной цепи пользуются правилами эквивалентных преобразований для потребителей.

По найденным U_{xx} и R_o определяется ток в искомой ветви

$$I = U_{xx} / (R_o + R_3).$$

4.4. Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе выполняется каждым студентом на основе экспериментальных данных, полученных при выполнении работы бригадой и теоретических расчётов и построений, произведённых самостоятельно. Отчёт выполняется на двойных листах из тетради в клетку, первый лист титульный. В отчёт включаются следующие разделы:

- тема работы;
- цель работы;
- содержание работы. Содержание работы включает наименование опыта, схемы электрических цепей, значения параметров элементов и исходные данные для опытов, результаты измерений, построенные характеристики, расчётные параметры и выводы по каждому опыту;
- выводы по работе в целом.

Лабораторные работы 4,5 выполняются с использованием пакета «*ElectronicsWorkbench*» на компьютерных моделях.

Проведение лабораторных работ по курсу «Теория электрических цепей» с исследованием процессов на компьютерных моделях имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными измерениями на электрических цепях. Во-первых, компьютерная среда для современного студента – «родная стихия», позволяющая сосредоточиться на изучаемых понятиях и законах. Во-вторых, набор элементов для построения цепей ограничен только библиотеками пакетов. В-третьих, сохранение результатов, проведение сопутствующих расчётов в математических пакетах и формирование отчётов по лабораторным работам значительно упрощаются, проводятся современными способами и экономят время. В-четвёртых, студенты получают навыки построения и исследования моделей электрических цепей в пакетах, имеющих самостоятельное значение как системы проектирования.

В-пятых, выполнение работы не привязано к лабораторному оборудованию, что предоставляет возможности для самостоятельной работы студентов различных форм обучения.

Составитель: Ярошевич А. В., к.т.н., доцент

5. Лабораторная работа №4. Амплитудные и фазовые соотношения для элементов цепей гармонического тока.

Цель работы: анализ амплитудно–фазовых соотношений для резистора, конденсатора, индуктивности и RLC цепи в установившемся синусоидальном режиме.

Задание на выполнение работы:

5.1. Резистор на переменном токе.

Соберите в программе *ElectronicsWorkbench (EWB)* схему цепи (рис.4.1). Параметры цепи: $U_g = 120$ В, $f_g = 50$ Гц, $R = N \cdot 110$ Ом, $r = 0,1$ Ом, N – номер бригады. Параметры элементов в схемах методички приведены для примера.

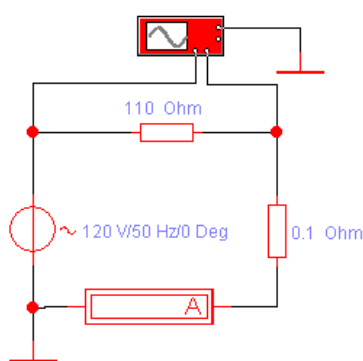


Рис.4.1

Двойным щелчком левой кнопки мыши раскройте осциллограф и щелчком по клавише *Expand* установите расширенный экран. В поле настроек развёртки *Timebase* установите масштаб 5.00 ms/div, режим *Y/T*. В поле режима синхронизации *Trigger* установите *Auto*. В поле *Channel A*, на который подключено напряжение генератора, практически совпадающее с напряжением на резисторе $R = 110$ Ом, установите режим переменного тока *AC* и масштаб 100 V/div. В поле *Channel B*, на который подключено **напряжение резистора $r = 0.1$ Ом, совпадающее по фазе с током цепи**, установите режим переменного тока *AC* и масштаб 200 mV/div. Установите амперметр в режим измерения на переменном токе *AC*.

Щелчком по клавише в правом верхнем углу окна программы включите режим моделирования процессов в цепи. Повторным щелчком остановите процесс, при этом амперметр покажет действующее значение тока, осциллограф зафиксирует мгновенное значение напряжения на резисторе R (*Channel A*) и напряжения на резисторе r , совпадающего по фазе с током цепи (*Channel B*). Если синусоиды напряжений невелики по амплитуде, разверните их регулировкой масштабов *Channel A* и *Channel B*.

Подводом красного $T1$ и синего $T2$ визиров на экране осциллографа на максимум напряжения синусоидального сигнала в двух соседних колебаниях

измерьте амплитудное значение напряжения V_{A1} и период гармонического сигнала $T_2 - T_1$. Сохраните схему для отчёта в файл *Word* щелчком по функции *Edit* затем *Copy as Bitmap* в панели программы и выделением поля со схемой цепи. Сохраните аналогично поле панели осциллографа.

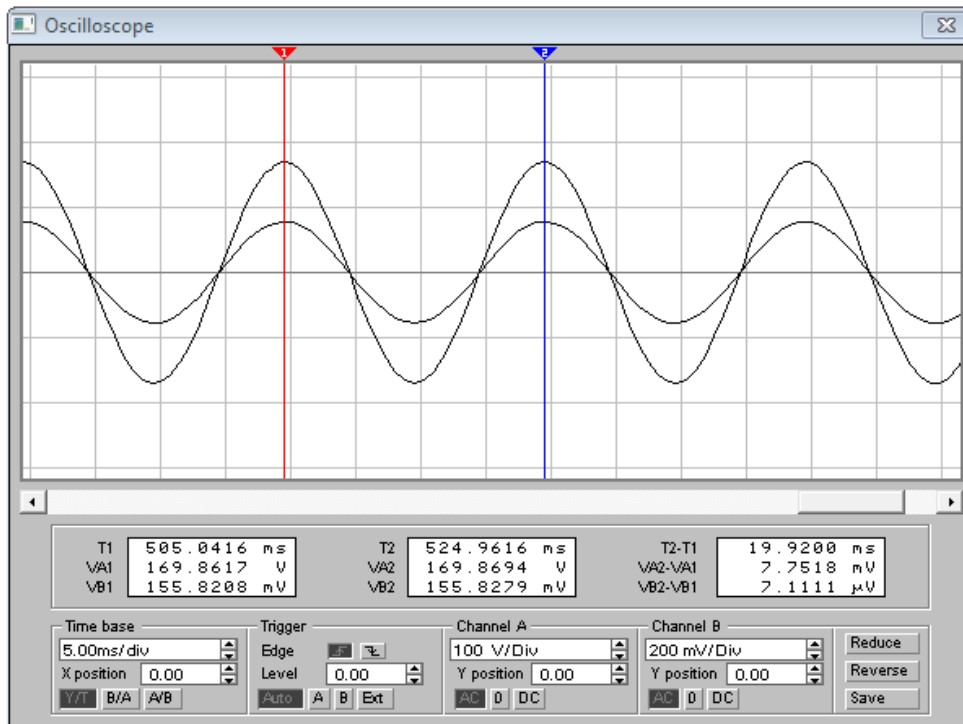


Рис.4.2

5.2. Конденсатор на переменном токе.

Соберите в программе *Electronics Workbench (EWB)* схему цепи на рис.4.3, заменив в предыдущей схеме резистор R на конденсатор C .

Параметры цепи: $U_g = 120$ В, $f_g = 50$ Гц, $C = N \cdot 50$ μ F, $r = 0,1$ Ом, N – номер бригады.

Запустите процесс моделирования и прервите его. Установите красный визир T_1 осциллографа на максимум синусоиды канала B , на который подключено **напряжение резистора $r = 0,1$ Ом, совпадающее по фазе с током цепи**, синий визир T_2 на ближайший справа максимум канала A и сохраните схему цепи и панель осциллографа для отчёта.

Установите частоту генератора $f_g = 100$ Гц и запустив моделирование запишите показание амперметра.

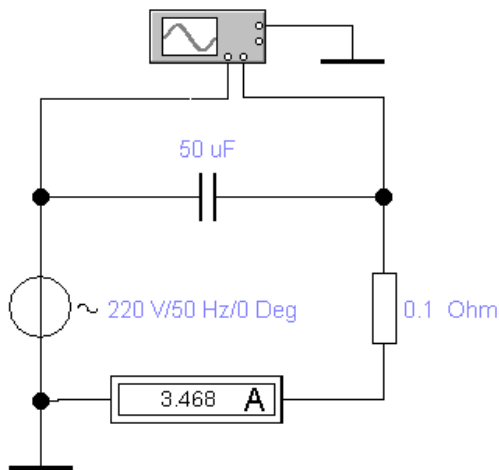


Рис.4.3

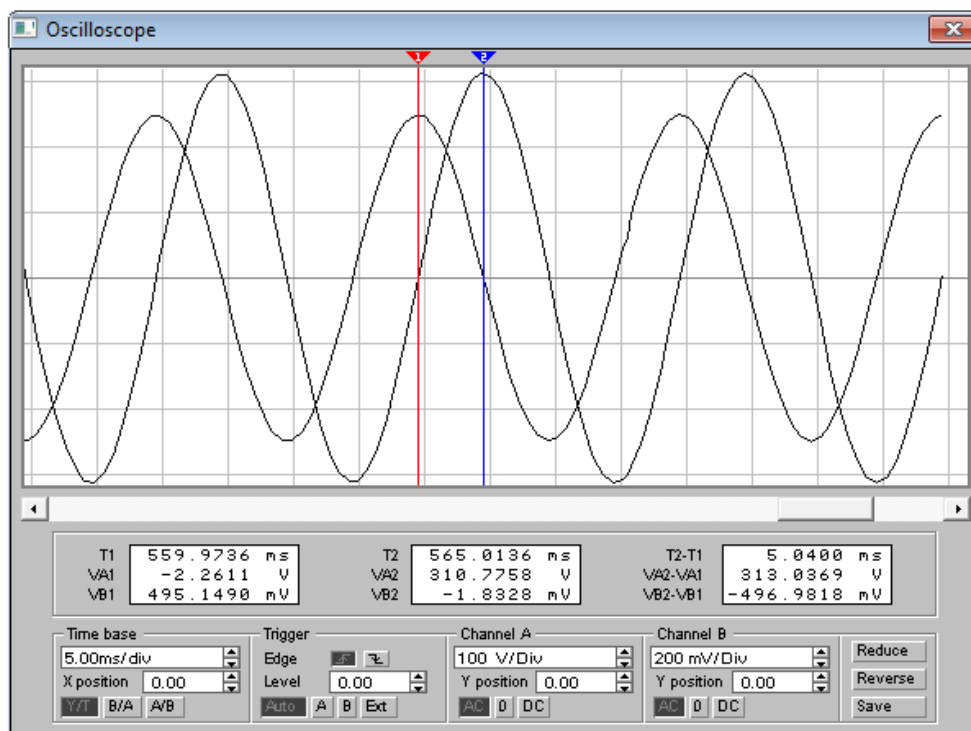


Рис.4.4

5.3. Катушка индуктивности на переменном токе.

Соберите в программе *ElectronicsWorkbench (EWB)* схему цепи на рис.4.5, заменив в предыдущей схеме конденсатор C индуктивностью $L = N \cdot 50 \text{ мГн}$ и установите частоту генератора $f_g = 50 \text{ Гц}$. Запустите процесс моделирования и прервите его. Установите красный визир $T1$ осциллографа на максимум синусоиды канала A , синий визир $T2$ на ближайший справа максимум канала B , на который подключено **напряжение резистора $r = 0.1 \text{ Ом}$, совпадающее по фазе с током цепи** и сохраните схему цепи и панель осциллографа для отчёта. Установите частоту генератора $f_g = 100 \text{ Гц}$ и запустив моделирование запишите показание амперметра.

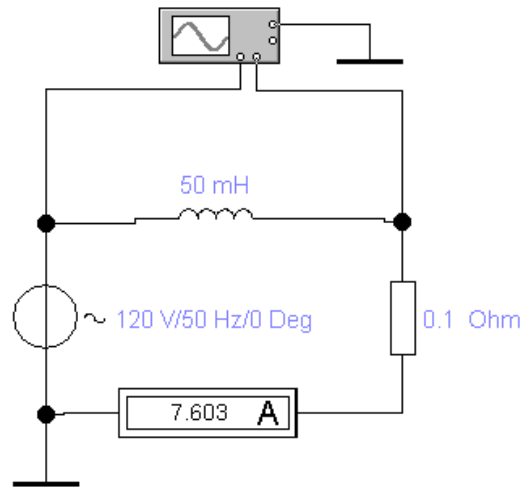


Рис.4.5

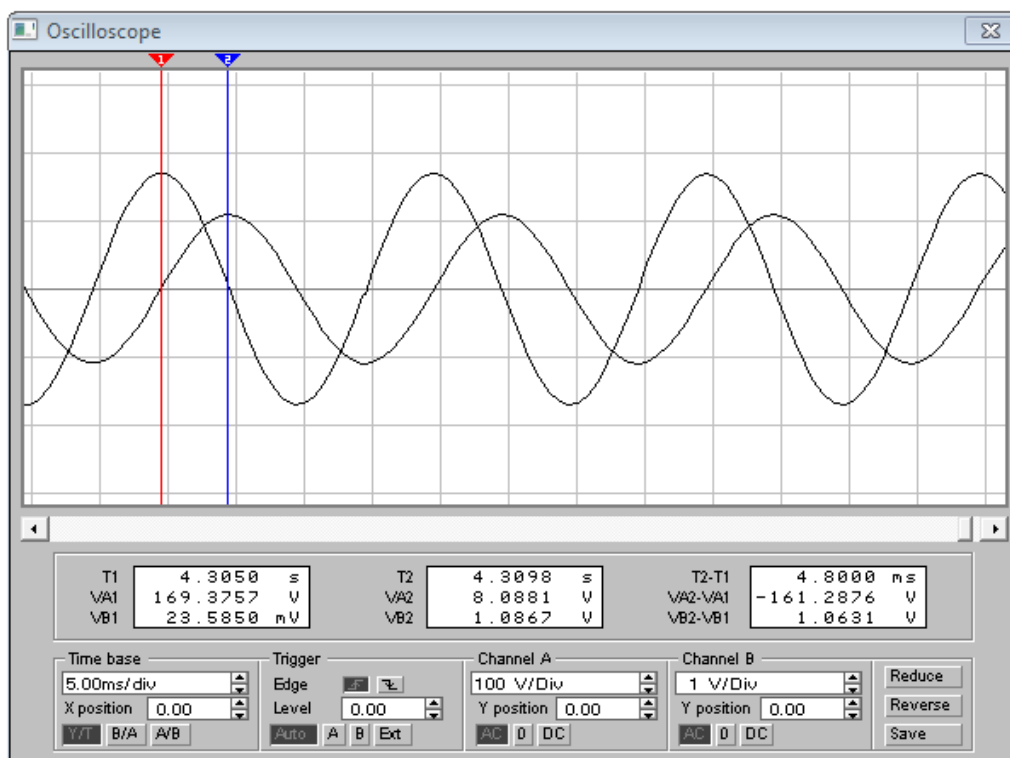


Рис.4.6

5.4. Последовательная RLC цепь в установившемся синусоидальном режиме.

Соберите в программе *Electronics Workbench (EWB)* схему цепи (рис.4.7).
 Параметры цепи: $U_g = 120$ В, $f_g = 20$ Гц, $R = 110$ Ом, $C = N \cdot 25$ μ F,
 $L = N \cdot 2.5$ мГн, N – номер бригады.

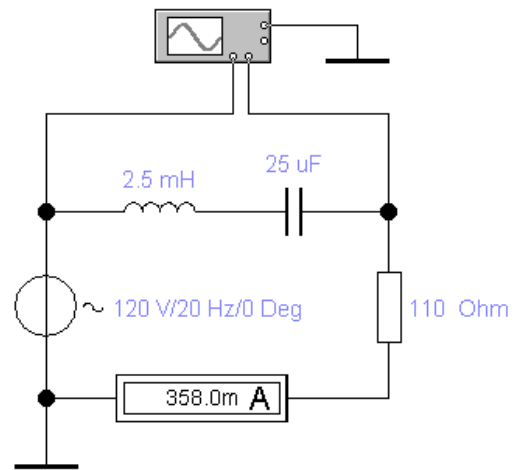


Рис.4.7

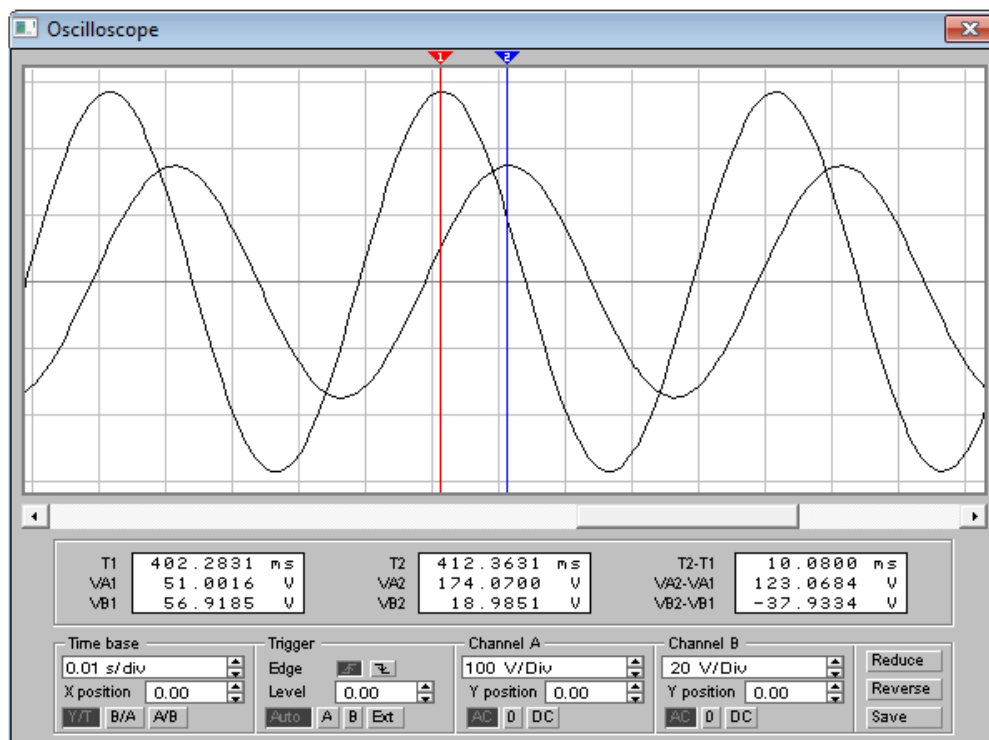


Рис.4.8

Запустите процесс моделирования и прервите его. Установите красный визир $T1$ осциллографа на максимум синусоиды канала B , на который подключено *напряжение резистора $r = 0.1$ Ом, совпадающее по фазе с током цепи*, синий визир $T2$ на ближайший справа максимум канала A и сохраните схему цепи и панель осциллографа для отчёта.

Установите частоту генератора $f_g = 2000$ Гц. Запустите процесс моделирования и прервите его. Установите красный визир $T1$ осциллографа на максимум синусоиды канала A , синий визир $T2$ на ближайший справа максимум канала B и сохраните панель осциллографа для отчёта. Запишите показание амперметра.

5.5. Теоретические сведения:

Переменным током $i(t)$ и напряжением $u(t)$ называют токи и напряжения, изменяющиеся во времени.

Сигналы, мгновенные значения которых повторяются через определенный фиксированный промежуток времени, называются *периодическими*, а этот промежуток времени T – *периодом*.

Величина, обратная периоду, называется *частотой* f :

$$f = \frac{1}{T} \quad [f] = c^{-1} = \text{Гц}.$$

Также существует понятие *угловой частоты*:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad [\omega] = \text{рад/с}.$$

В электроэнергетике нашли широкое применение синусоидальные сигналы.

$u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$, $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, где $u(t)$, $i(t)$ – *мгновенное значение*

U_m , I_m – *амплитуда* переменного сигнала – максимальная по модулю его величина;

$\omega t + \psi_u$, $\omega t + \psi_i$ – *фаза* гармонического сигнала – аргумент при синусе в каждый момент времени;

ψ_u , ψ_i – *начальная фаза* – значение аргумента в начальный момент времени ($t=0$). Фаза измеряется в радианах или градусах.

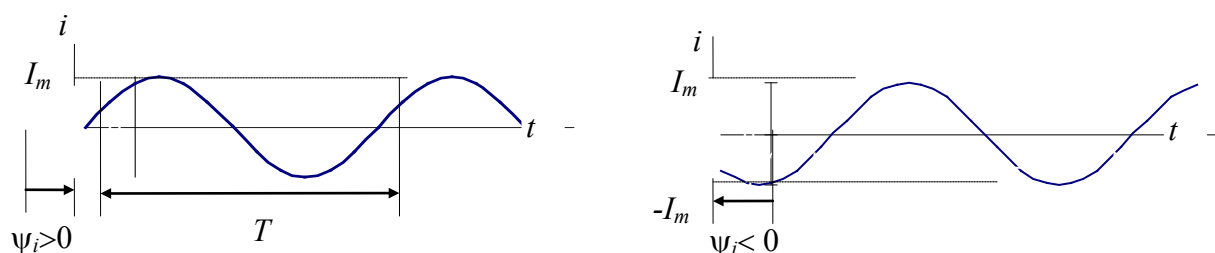


Рис.4.9

О значениях периодических токов и напряжений обычно судят по их среднеквадратическим значениям за период, которые называют *действующим значением* тока и напряжения и обозначают I , U .

В действующих величинах градуируются (тарифицируются) амперметры и вольтметры электродинамической и электромагнитной системы

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

При анализе цепей синусоидального тока применяют главным образом *комплексные действующие значения*, сокращенно их называют *комплексными значениями*, а соответствующие им векторы на комплексной плоскости – *векторами комплексных значений*. Связь между комплексом амплитуды и комплексом действующего значения устанавливается по формуле:

$$\underline{I} = I e^{j\psi_i} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_i}; \quad I_m = \sqrt{2} \underline{I}.$$

Пример символического представления функции времени

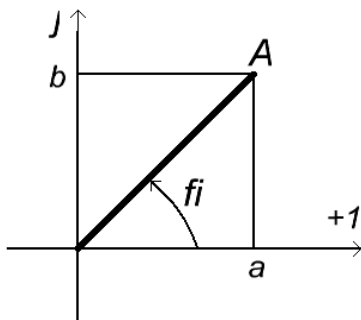
$$i = 10 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right).$$

$$\underline{I}_m = 10 e^{j\frac{\pi}{3}} \text{ – комплекс амплитуды;}$$

$$\underline{I}(t) = 10 e^{j\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right)} \text{ – комплекс мгновенного значения;}$$

$$\underline{I} = \frac{10}{\sqrt{2}} e^{j\frac{\pi}{3}} \text{ – комплекс действующего значения или комплекс.}$$

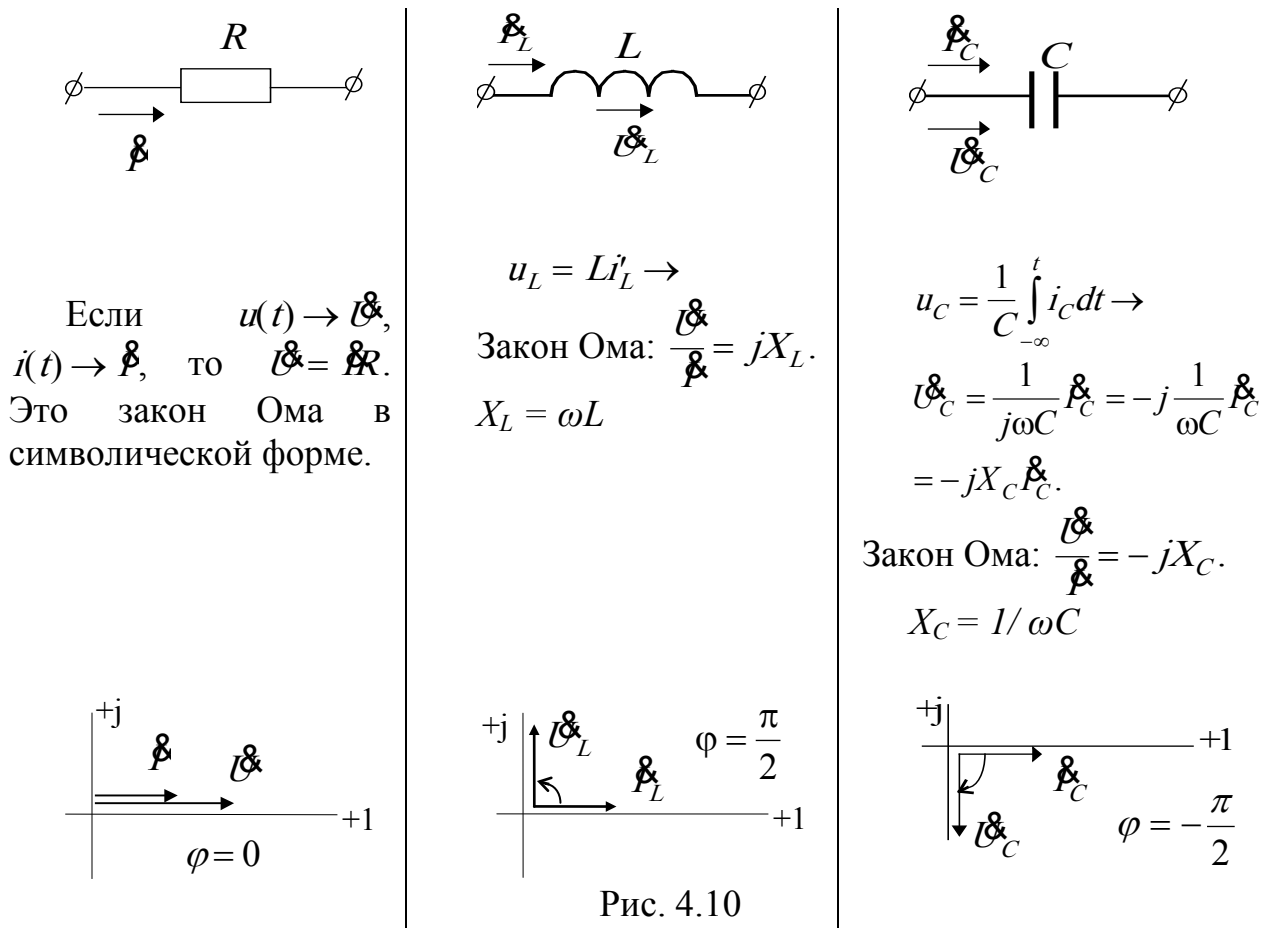
Совокупность векторов комплексных значений синусоидальных величин *одной частоты*, изображенных на комплексной плоскости, называют *векторной диаграммой*.



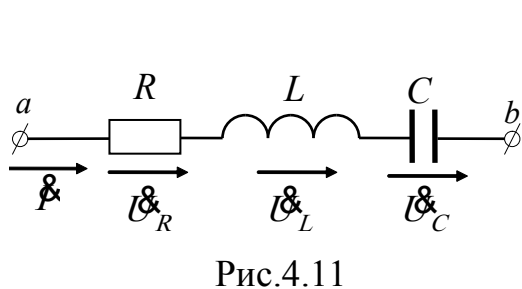
$$\underline{A} = A \angle \varphi = A e^{j\varphi} = A \cos \varphi + j A \sin \varphi = a + jb,$$

$$\text{где } a = \operatorname{Re}(\underline{A}) = A \cos \varphi \text{ и } b = \operatorname{Im}(\underline{A}) = A \sin \varphi \quad A = \sqrt{a^2 + b^2}; \quad \varphi(\varphi) = \operatorname{arctg} \frac{b}{a}.$$

Рассмотрим закон Ома в символической форме записи для элементов цепи гармонического тока



На рис. 4.10 приведены векторные диаграммы напряжений и токов соответственно для сопротивления, индуктивности и емкости.



Последовательное соединение R, L, C

По II закону Кирхгофа

$$u_{ab}(t) = u_R + u_L + u_C.$$

$$u_R \rightarrow \dot{U}_R = \dot{I}R; \quad u_L \rightarrow \dot{U}_L = \dot{I}jX_L;$$

$$u_C \rightarrow \dot{U}_C = -j\dot{I}X_C.$$

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{I}(R + jX_L - jX_C) = \dot{I}(R + j(X_L - X_C)) = \dot{I}\underline{Z},$$

где \underline{Z} – комплексное сопротивление цепи.

На основании теоремы Эйлера

$$\dot{U}_{ab} = \dot{I}Z e^{j\varphi} = \dot{I} \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} e^{j \arctg \frac{X_L - X_C}{R}}.$$

Полное сопротивление равно модулю полного комплексного сопротивления $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$,

аргумент полного комплексного сопротивления равен разности фаз напряжения и тока $\varphi = \psi_u - \psi_i = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}$.

Комплексное сопротивление можно представить в виде

$$\underline{Z} = Ze^{j\varphi} = Z \cos \varphi + jZ \sin \varphi = R + jX,$$

где R – действительная часть комплексного сопротивления, называется *активным сопротивлением*, $R = Z \cos \varphi$;

X – мнимая часть комплексного сопротивления, называется *реактивным сопротивлением*, $X = Z \sin \varphi = X_L - X_C$.

Таким образом, закон Ома в общем виде $\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}}$, где \underline{Z} может представлять, в частности, следующее: для сопротивления $\underline{Z} = R$, для индуктивности $\underline{Z} = jX_L = X_L e^{j90^\circ}$, для емкости $\underline{Z} = -jX_C = X_C e^{-j90^\circ}$.

Для рассматриваемой цепи построим векторную диаграмму токов и напряжений. Поскольку для всех элементов общим является ток, вектор тока и выберем в качестве исходного вектора, направив его по действительной оси (рис.4.12).

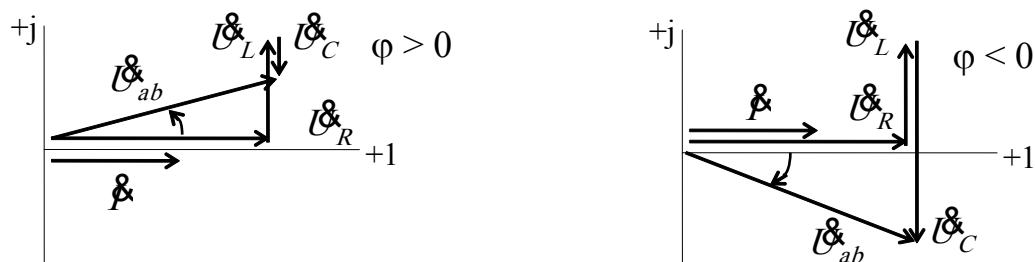


Рис. 4.1

Возможны три режима работы такой цепи:

$X_L > X_C$ – индуктивный режим, $\varphi > 0$;

$X_L = X_C$ – резонанс напряжений, $\varphi = 0$;

$X_L < X_C$ – емкостный режим, $\varphi < 0$.

Угол φ (разность начальных фаз напряжения и тока) определяется углом поворота вектора тока к вектору напряжения по кратчайшему пути: если поворот определяется против часовой стрелки, то $\varphi > 0$ (отстающий ток), иначе – $\varphi < 0$ (опережающий ток). Как видно из приведенных выше формул, характер цепи определяет большее реактивное сопротивление.

5.6. Содержание отчёта.

Отчёт по лабораторной работе должен содержать

а) цель работы;

б) результаты моделирования цепи с резистором R (схему цепи, осциллограмму напряжений, действующее значение тока в цепи, амплитудное и действующее значения напряжения генератора, сдвиг фаз напряжения и тока в цепи);

- расчёт действующего и амплитудного значений тока, сопротивления цепи;

- векторную диаграмму напряжения и тока в цепи;

- выводы о соотношении амплитуд и фаз в цепи с резистором;

в) результаты моделирования цепи с конденсатором C (схему цепи, осциллограмму напряжений, действующее значение тока в цепи при частоте генератора $f_g = 50$ Гц, амплитудное и действующее значения напряжения генератора, сдвиг фаз напряжения и тока в цепи, действующее значение тока в цепи при частоте генератора $f_g = 100$ Гц);

- расчёт действующего и амплитудного значений тока, реактивного сопротивления конденсатора для двух значений частоты (сопротивлением r при расчётах пренебречь);

- векторную диаграмму напряжения и тока в цепи;

- выводы о соотношении амплитуд и фаз в цепи с конденсатором;

г) результаты моделирования цепи с индуктивностью L (схему цепи, осциллограмму напряжений, действующее значение тока в цепи при частоте генератора $f_g = 50$ Гц, амплитудное и действующее значения напряжения генератора, сдвиг фаз напряжения и тока в цепи, действующее значение тока в цепи при частоте генератора $f_g = 100$ Гц);

- расчёт действующего и амплитудного значений тока, реактивного сопротивления индуктивности для двух значений частоты (сопротивлением r при расчётах пренебречь);

- векторную диаграмму напряжения и тока в цепи;

- выводы о соотношении амплитуд и фаз в цепи с индуктивностью;

д) результаты моделирования RLC цепи (схему цепи, осциллограмму напряжений, действующее значение тока в цепи при частоте генератора

$f_g = 50$ Гц и при частоте $f_g = 200$ Гц, амплитудное и действующее значения напряжения генератора, сдвиг фаз напряжения и тока в цепи при частоте генератора $f_g = 50$ Гц и $f_g = 200$ Гц);

- расчёт действующего и амплитудного значений тока, активного, реактивного и модуля комплексного сопротивления цепи для двух значений частоты;

- векторные диаграммы напряжений и токов в цепи;

- выводы о соотношении амплитуд и фаз в RLC цепи в зависимости от частоты

6. Лабораторная работа № 5. Исследование резонанса напряжений в последовательной RLC цепи

Цель работы: исследование параметров последовательной RLC цепи в режиме резонанса напряжений и построение амплитудно – частотных характеристик (АЧХ) колебательного контура.

Задание на выполнение работы:

6.1. Построение АЧХ контура и определение частоты резонанса.

Соберите в программе *ElectronicsWorkbench (EWB)* схему цепи(рис.5.1а). Параметры цепи: $U_g = 120$ В, $f_g = 20$ Гц, $R = 10$ Ом, $C = N*25$ μ F, $L = N*2.5$ мГн, N – номер бригады.

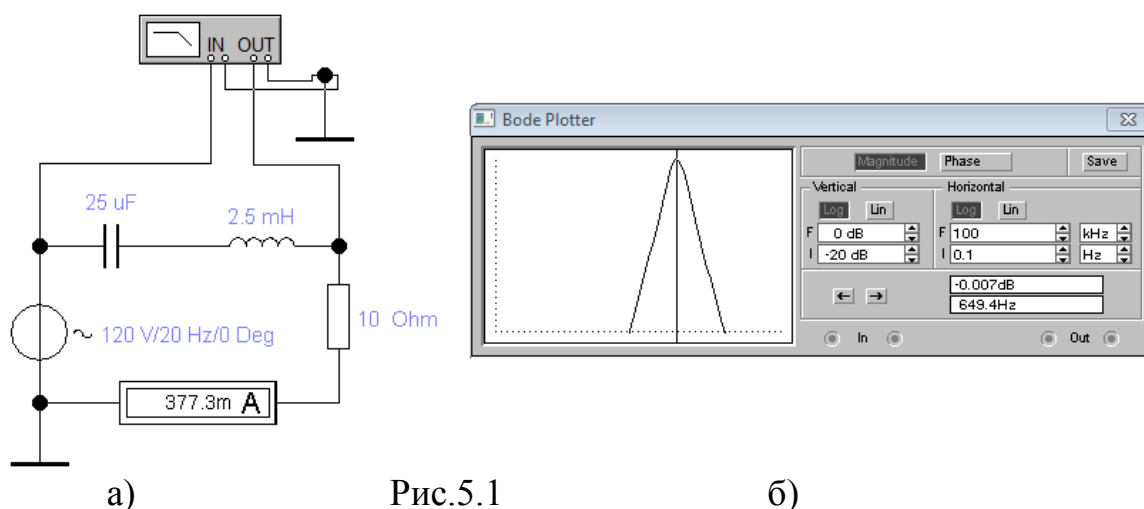


Рис.5.1

Двойным щелчком левой кнопки мыши раскройте BodePlotter, предназначенный в режиме *Magnitude* для построения графика отношения напряжения U_R , отображающего ток цепи I , на входе *Outk* напряжению U_g на входе *In*. Этот график характеризует АЧХ контура. Установите на плоттере параметры вертикальной оси: *Log* для построения графика в логарифмическом масштабе, $I = -20$ dB, $F = 0$ dB; горизонтальной оси:

Log для логарифмического масштаба оси частоты, $I = 0,1$ Гц, $F = 100$ кГц.

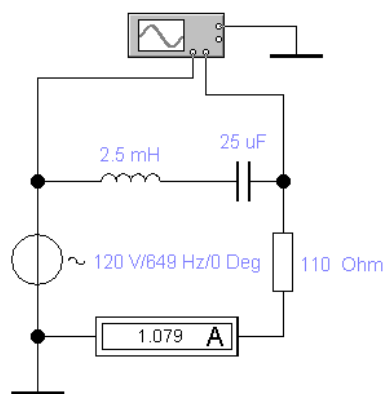
Щелчком по клавише в правом верхнем углу окна программы включите режим моделирования процессов в цепи. Повторным щелчком остановите процесс, при этом амперметр покажет действующее значение тока, плоттер зафиксирует АЧХ контура. Подводом визира на экране плоттера на максимум АЧХ определите резонансную частоту $f_{рез}$, отображённую координатой оси частот в нижнем окошке плоттера.

Сохраните поле программы EWB для отчёта в файл *Word* щелчком по функции *Edit* затем *Copy as Bitmap* в панели программы и выделением поля аналогично рис.5.1.

Измените величину сопротивления резистора на $R = 110$ Ом. Включите и остановите процесс моделирования. Установите визир на максимум АЧХ и сохраните поле программы для отчёта.

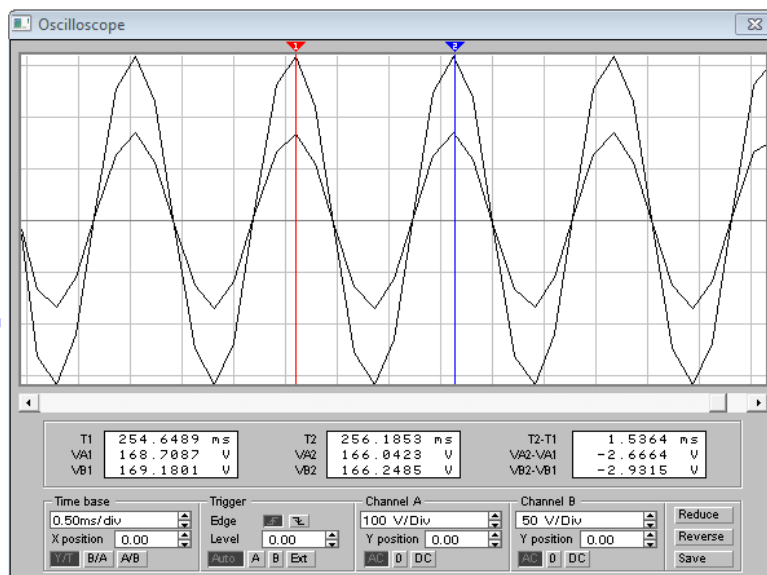
6.2. Исследование амплитудно–фазовых соотношений колебательного контура.

Соберите в программе *ElectronicsWorkbench (EWB)* схему цепи (рис.5.2а). Параметры цепи: $U_g = 120$ В, $f_g = f_{рез}$, $R = 110$ Ом, $C = N*25$ μ F, $L = N*2.5$ мГн, N – номер бригады.



а)

Рис.5.2



б)

Запустите и остановите процесс моделирования и сохраните для отчёта поле EWB аналогично рис.5.2.

Установите частоту генератора $f_g = f_m = 20$ Гц. Запустите процесс моделирования и прервите его. Установите красный визир $T1$ осциллографа на максимум синусоиды канала B , синий визир $T2$ на ближайший справа максимум канала A и сохраните схему цепи и панель осциллографа для отчёта.

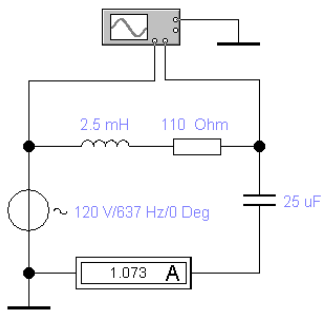
Установите частоту генератора $f_g = f_0 = 2000$ Гц. Запустите процесс моделирования и прервите его. Установите красный визир $T1$ осциллографа на максимум синусоиды канала A , синий визир $T2$ на ближайший справа максимум канала B и сохраните панель программы для отчёта.

6.3. Исследование амплитудно – фазовых соотношений на реактивных элементах контура.

Поменяйте в предыдущей схеме местами элементы R и C в соответствии со схемой на рис.5.3а. Параметры цепи: $U_g = 120$ В, $f_g = f_{рез}$, $R = 110$ Ом, $C = N*25$ μ F, $L = N*2.5$ мГн, N – номер бригады.

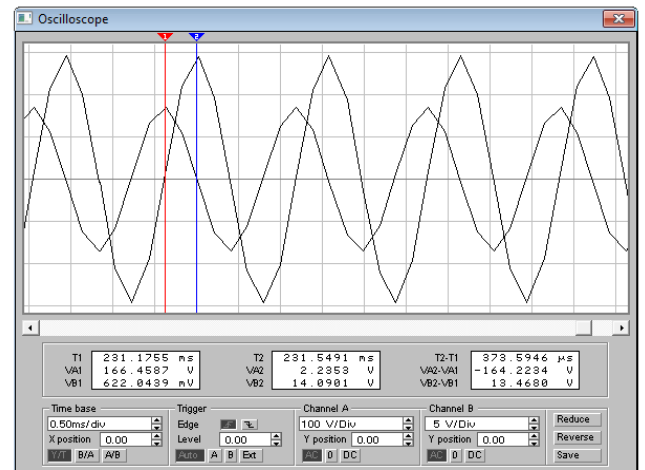
Запустите и остановите процесс моделирования, установите визиры на экране осциллографа и сохраните для отчёта поле EWB аналогично рис.5.3.

Канал В (визир T2) отображает мгновенное значение напряжения на конденсаторе $u_c(t)$.



а)

Рис.5.3

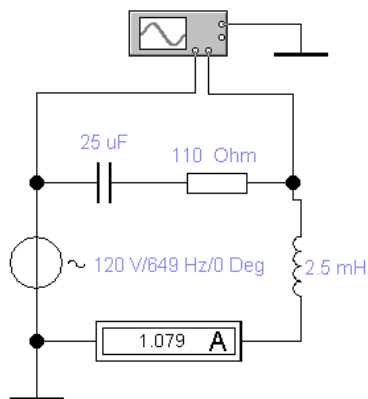


б)

Поменяйте в предыдущей схеме местами элементы LiC в соответствии со схемой на рис 5.4а. Параметры цепи: $U_g = 120$ В, $f_g = f_{рез}$, $R = 110$ Ом, $C = N \cdot 25$ μ F, $L = N \cdot 2.5$ мГн, N – номер бригады.

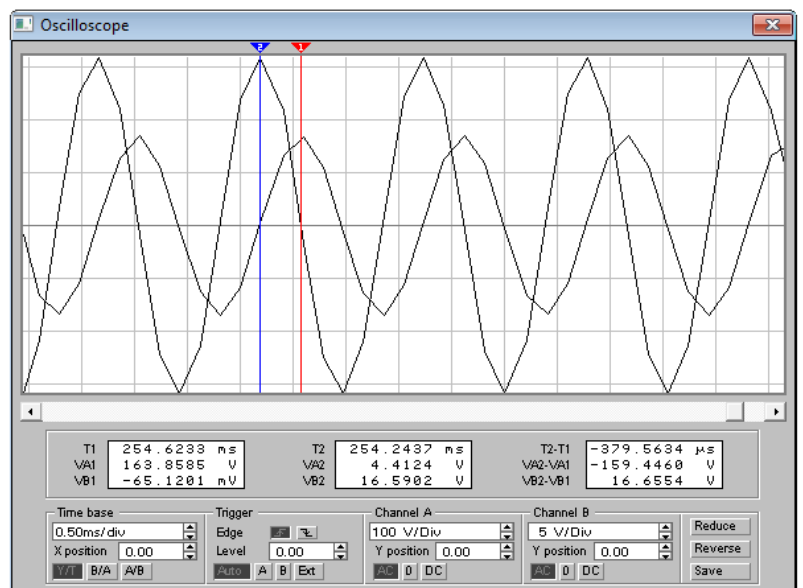
Запустите и остановите процесс моделирования, установите визирь на экране осциллографа и сохраните для отчёта поле EWB аналогично рис.5.4.

Канал В (визир T2) отображает мгновенное значение напряжения на индуктивности $u_L(t)$.



а)

Рис.5.4



б)

6.4. Теоретические сведения:

Резонанс напряжений наблюдается в последовательных цепях. Рассмотрим режим резонанса напряжений для последовательной RLC -цепи.

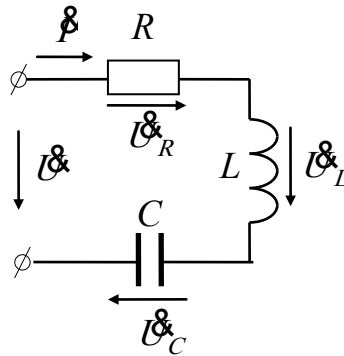


Рис.5.5

Для схемы на рис.5.5 справедливо

$$\underline{U} = R\underline{I} + j(X_L - X_C)\underline{I} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C.$$

Изменим частоту генератора или величину индуктивности или емкости так, чтобы для этой схемы было $X = X_L - X_C = 0$, тогда $\underline{U}_L + \underline{U}_C = jX_L\underline{I} - jX_C\underline{I} = 0$, напряжение на входе $\underline{U} = R\underline{I} = \underline{U}_R$, т.е. ток и напряжение на входе совпадают по фазе. В цепи – режим резонанса:

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} = 0.$$

Частота, при которой наблюдается резонанс, ω_0 может быть определена из соотношения

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ (рад/с)}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ (Гц)}.$$

Ток в цепи в режиме резонанса $I_0 = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{R}$, т.е.

максимально возможный при данных параметрах контура.

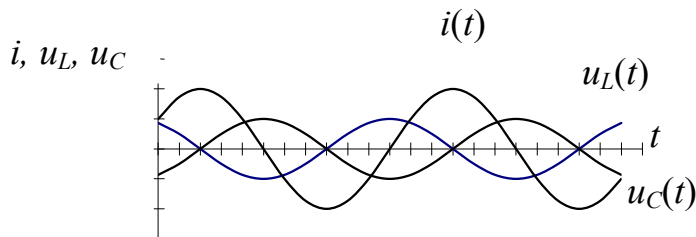


Рис.5.7

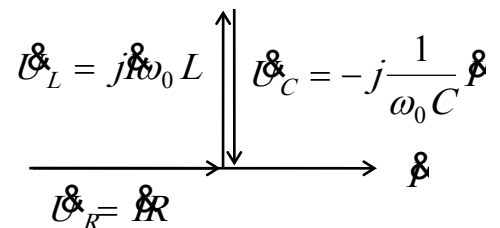


Рис.5.6

На рис.5.6 представлена векторная диаграмма, которая соответствует режиму резонанса. Временная диаграмма тока и напряжений представлена на рис.5.7. В каждый момент времени $U_L - U_C = 0$. Учитывая, что $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$,

получаем

$$\begin{aligned}\omega_0 L &= \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{1}{\sqrt{LC}} L = \\ &= \frac{\sqrt{LC}}{C} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho\end{aligned}$$

где ρ – *характеристическое*, или *волновое сопротивление* резонансного контура, измеряемое в омах.

Отношение напряжения на реактивных элементах (U_L и U_C) к напряжению на входе в режиме резонанса называют *добротностью* контура:

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\omega_0 L I_0}{R I_0} = \frac{I_0}{\omega_0 C I_0 R} = \frac{\rho}{R}.$$

Чем больше $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ и чем меньше активное сопротивление в цепи, тем выше напряжение на реактивных элементах по сравнению с напряжением на входе контура.

Зависимости параметров контуров RLC -контура от частоты называют *частотными характеристиками*. Это индуктивное сопротивление $X_L(\omega) = \omega L$, емкостное сопротивление $X_C(\omega) = \frac{1}{\omega C}$, реактивное сопротивление $X(\omega) = X_L(\omega) - X_C(\omega)$, активное сопротивление $R(\omega) = \text{const}$, полное сопротивление $Z(\omega) = \sqrt{R^2(\omega) + X^2(\omega)}$, угол сдвига фаз $\varphi(\omega) = \arctg \frac{X(\omega)}{R(\omega)}$. Качественный вид этих характеристик приведен на рис.5.8

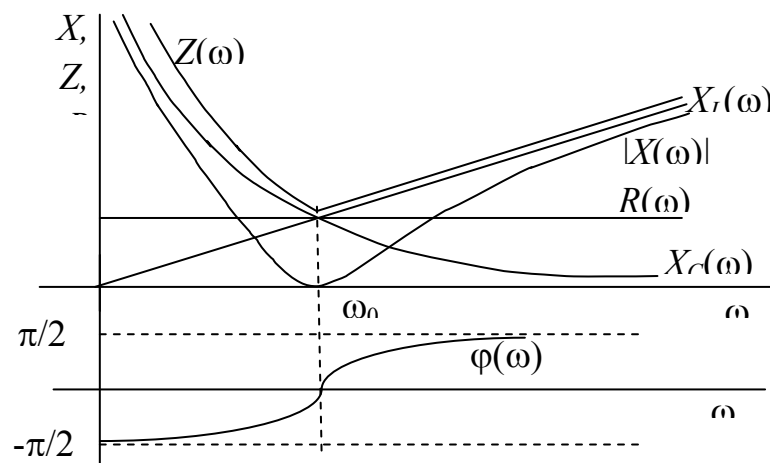


Рис.5.8

В момент резонанса $X_L(\omega) = X_C(\omega)$, $X(\omega) = 0$, $Z(\omega) = R$, $\phi(\omega) = 0$.

Зависимости тока $I(\omega)$, напряжения на индуктивности $U_L(\omega)$, напряжения на емкости $U_C(\omega)$ называют *резонансными характеристиками*.

$$I(\omega) = \frac{U}{\sqrt{R^2(\omega) + X^2(\omega)}}; \quad U_L(\omega) = I\omega L; \quad U_C = \frac{I}{\omega C}.$$

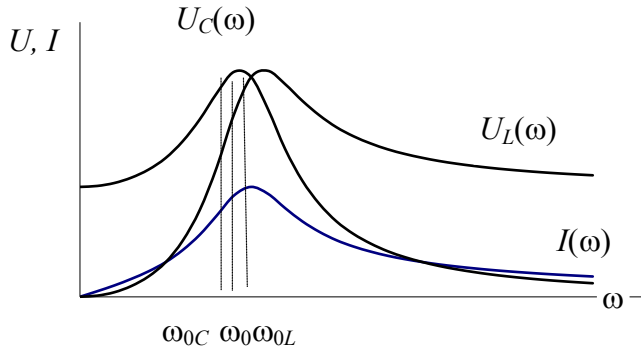


Рис.5.9

Графики этих характеристик при добротности $Q = 2$ представлены на рис.5.9.

При добротности контура $Q < 5$ максимумы напряжений U_L и U_C смещаются друг от друга на одно и то же значение частоты от резонансной ω_0 . При добротности контура $Q > 5$ максимумы этих напряжений при резонансной частоте $\omega = \omega_0$ сливаются.

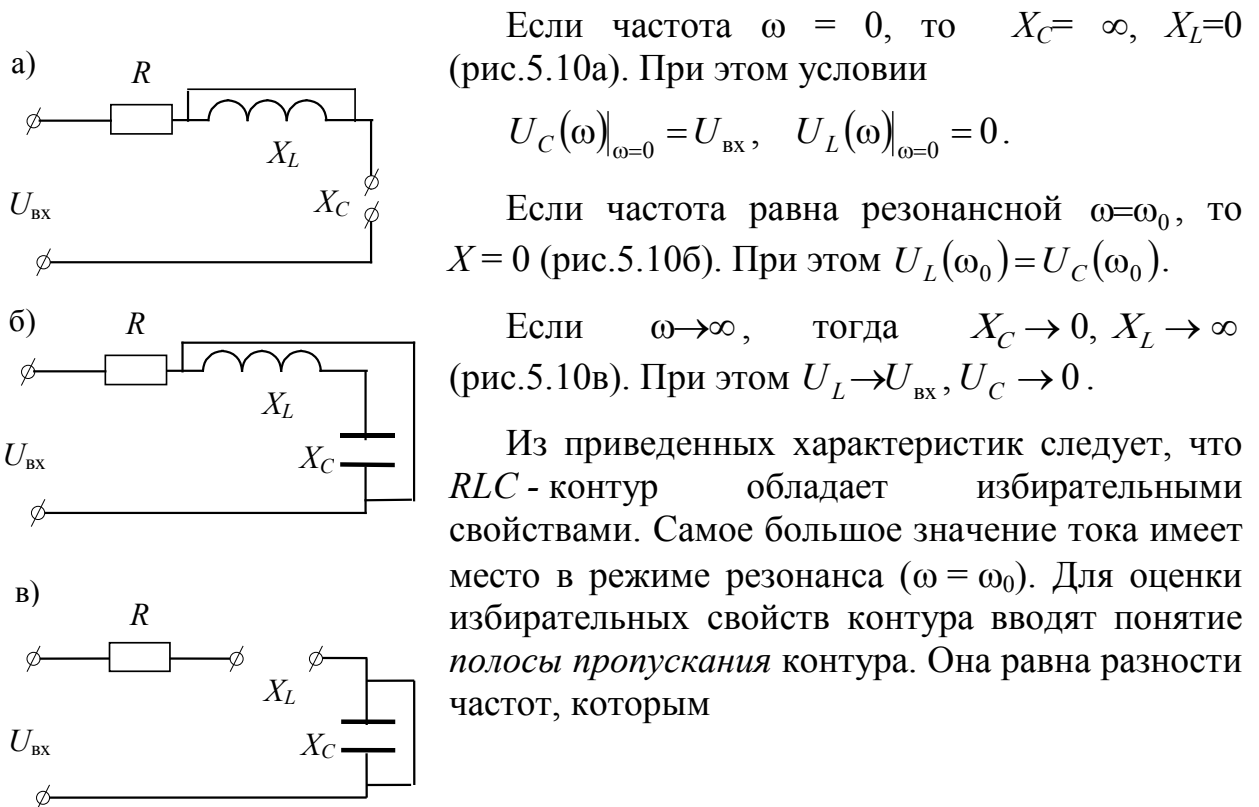


Рис.5.10

Если частота $\omega = 0$, то $X_C = \infty$, $X_L = 0$ (рис.5.10а). При этом условии

$$U_C(\omega)|_{\omega=0} = U_{\text{вх}}, \quad U_L(\omega)|_{\omega=0} = 0.$$

Если частота равна резонансной $\omega = \omega_0$, то $X = 0$ (рис.5.10б). При этом $U_L(\omega_0) = U_C(\omega_0)$.

Если $\omega \rightarrow \infty$, тогда $X_C \rightarrow 0$, $X_L \rightarrow \infty$ (рис.5.10в). При этом $U_L \rightarrow U_{\text{вх}}$, $U_C \rightarrow 0$.

Из приведенных характеристик следует, что RLC -контур обладает избирательными свойствами. Самое большое значение тока имеет место в режиме резонанса ($\omega = \omega_0$). Для оценки избирательных свойств контура вводят понятие *полосы пропускания* контура. Она равна разности частот, которым

соответствует отношению $\frac{I}{I_0}$ до и после резонанса, равное 0,707.

Амплитудно – частотной характеристикой (АЧХ) последовательного контура $A(\omega)$ называют график модуля проводимости от частоты

$$|Y(\omega)| = A(\omega) = \frac{I(\omega)}{U(\omega)}. \text{ Обычно АЧХ строят в логарифмическом}$$

масштабе в осях $\lg A(\omega) - \lg \omega$. «Острота» резонансной кривой определяет частотную избирательность цепи. По АЧХ можно определить частотную избирательность контура. Она равна отношению резонансной частоты f_0 к полосе пропускания Δf , измеренной по уровню 0,707 от максимума АЧХ.

$$Q = f_0 / \Delta f.$$

6.5. Содержание отчёта:

Отчёт о выполнении лабораторной работы должен содержать

- а) цель работы;
- б) результаты построения АЧХ контура и определение частоты резонанса путём моделирования колебательного контура с плоттером (схему цепи, АЧХ на экране плоттера для цепи с малыми потерями при $R = 10$ Ом, значение резонансной частоты $f_{рез}$ из эксперимента, АЧХ на экране плоттера для цепи с большими потерями);
 - расчёт резонансной частоты f_0 по параметрам цепи L и C ;
 - выводы о характере АЧХ и избирательности контура для различных R .
- в) результаты исследования амплитудно – фазовых соотношений контура путём моделирования контура при частотах $f_{рез}$, f_m , f_0 (схемы цепей, осциллограммы напряжения генератора и напряжения резистора, совпадающего по фазе с током цепи, действующие значения токов с амперметра, значения углов сдвига фаз напряжения и тока из осциллограмм);
 - расчёт реактивного и модуля комплексного сопротивления цепи для трёх значений частоты, значений тока и углов сдвига фаз напряжения и тока;
 - векторные диаграммы напряжений и токов для трёх значений частоты;
 - выводы о признаках и особенностях режима резонанса.
- г) результаты исследования амплитудно – фазовых соотношений на реактивных элементах (схемы цепей, осциллограммы напряжений на конденсаторе и индуктивности в режиме резонанса, значения амплитуд напряжений из осциллограмм, значения углов сдвига фаз напряжений);
 - расчёт реактивных сопротивлений X_C , X_L и амплитудных значений напряжений U_{mR} , U_{mC} , U_{mL} ;
 - выводы о соотношении параметров реактивных элементов в режиме резонанса.
- д) расчёт характеристического (волнового) сопротивления ρ и добротности контура Q и выводы о связи параметров цепи с характеристиками контура.

РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

Сборник задач для самостоятельных практических занятий.

Сборник задач предназначен для работы на практических занятиях в аудитории и самостоятельной работы студентов при изучении электротехнических дисциплин. Темы и объёмы работы определяются учебными программами курсов. Каждая тема охватывает определённую структуру цепи с определённым сигналом источников напряжения и тока. Задание включает 25 вариантов для индивидуальной работы студентов.

Для каждой темы приведены основные теоретические сведения, описание алгоритма анализа цепей данного вида, пример решения задачи и варианты цепей для анализа.

При изложении основ теории использован интернет – источник:

Пермский государственный технический университет\Кафедра конструирования радиоэлектронных средств\В.Н. Бахрах, Т.А. Кузнецова, Е.А. Кулютникова\ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ\Утверждено Редакционно-издательским советом университета в качестве конспекта лекций для студентов электротехнических и радиотехнических специальностей \Пермь 2000.

Авторы выражают глубочайшую благодарность коллегам за предоставление свободного доступа к удачному изложению теории электрических цепей.

Цепи для вариантов заданий в основном заимствованы из **Сборника тестовых и контрольных задач по теории электрических цепей\ под ред. П.Н.Матханова\ - Л.: ЛЭТИ, 1984.** Учебное пособие предоставлено Ярошевичу А.В. его Учителем по теоретическим основам электротехники, одним из авторов сборника ЛЭТИ **Чернышёвым Эдуардом Павловичем.** Кафедре ТОЭ ЛЭТИ и Учителю глубочайшее почтение и благодарность.

Составители: Богдан Я. В.,

Ярошевич А.В., к.т.н., доцент

1. Обозначения элементов и параметров (с единицами измерения) в схемах электрических цепей.

Яна: Ну, вот опять куча непонятных значков, скукотища...

А.В.: Зато на трёх языках – латынь, греческий и русский.

U – напряжение в цепи постоянного тока, определяется в вольтах (В);

E – ЭДС источника постоянного напряжения, задаётся в вольтах (В);

I – постоянный ток, определяется в амперах (А);

Яна: Нас учили – сила тока!

А.В.: Сила тока – это когда есть тока сила. Сила в Ньютонах или Кг. А теперь ток, в Амперах.

J – постоянный ток источника, задаётся в амперах;

R , $|Z|$, X – сопротивление резистора, ёмкости, индуктивности или участка цепи, задаётся в омах (Ом);

G , $|Y|$, B – проводимость резистора, ёмкости, индуктивности или участка цепи, задаётся в сименсах (См);

P – мощность, определяется в ваттах (Вт):

\dot{U}_m , \dot{U} – комплекс амплитудного и действующего значений напряжения в цепях переменного тока;

U_m , U – амплитудное и действующее значение напряжения в цепях переменного тока, определяется в вольтах (В);

\dot{I}_m , \dot{I} – комплекс амплитудного и действующего значений переменного тока;

I_m , I – амплитудное и действующее значения переменного тока, определяется в амперах (А);

C – ёмкость конденсатора, задаётся в фарадах (Ф);

L – индуктивность катушки, задаётся в генри (Гн);

ω – угловая частота, задаётся в радианах в секунду (1/с);

f – частота, задаётся в герцах (Гц);

ψ – начальная фаза, задаётся в радианах или градусах;

φ – разность фаз напряжения и тока, определяется в радианах или градусах;

t – время, в секундах (с).

Яна: А где же английский?

А.В.: please

DC – постоянный ток;

AC – переменный (альтернативный) ток.

Яна: Что за альтернатива?

А.В.: Это уже совсем другая история, приходите на лекции, будет интересно.

2. Порядок изображения схемы цепи, заданной тройками чисел

Яна: Начинаются ребусы...

А.В.: Надо как то Вас разбудить.

Схема электрической цепи задана тройками чисел, для сокращения записи размерности значений параметров не указаны, задаются по умолчанию.

112 – R1=1; 223 – R2=2; 314 – R3=3; 414 – R4=4; 534 – E5=1.

Первая цифра тройки – номер элемента цепи. Вторая цифра – начальная точка элемента. Третья – конечная точка элемента.

Нарисуйте начальные и конечные точки элементов (вторая и третья цифры троек) цепи следующим образом

.1

.2

.4

.3

По тройкам чисел нарисуйте между точками элементы цепи (Рис. 1).

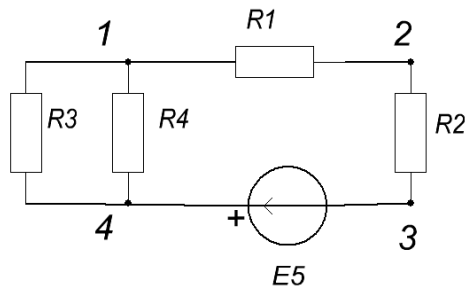


Рис.1

Перерисуйте схему цепи так, чтобы источник встал в левой вертикальной ветви (Рис. 2). Все остальные ветви с резисторами по возможности располагаются горизонтально или вертикально. Соединения элементов в рис.1 и рис.2 аналогичны.

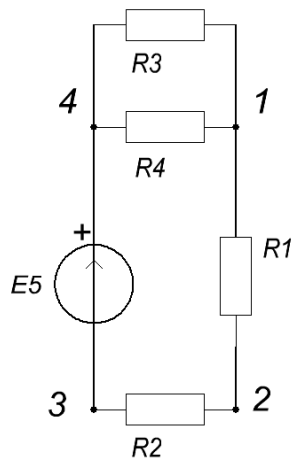


Рис.2

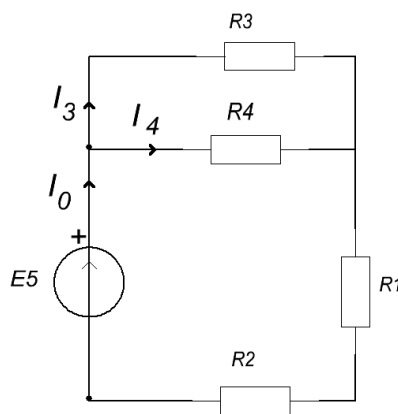


Рис.3

Обозначьте на схеме токи всех ветвей, обозначение и направление токов выбирается произвольно, но отдавая предпочтение направлению от (+) источников. (Рис.3) Схема готова для расчёта.

3. Тема 1. Расчёт разветвлённых цепей постоянного тока с одним источником.

Яна: Что ещё за ветки такие?

А.В.: А ещё узлы, контуры, источники напряжения и тока и несколько законов – право, совсем немного, но креатив!

3.1. Основные теоретические сведения

В качестве потребителя в теории электрических цепей постоянного тока выступает резистор, характеризующийся сопротивлением (R), для которого справедлив закон Ома:

$$\frac{U}{I} = R \text{ или } U = I \cdot R, \quad I = \frac{U}{R}$$

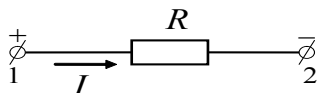


Рис.1.1

В пассивных элементах ток течет от точек с большим потенциалом (+) к точкам, с меньшим потенциалом (-).

I закон Кирхгофа (для токов): алгебраическая сумма токов в узле равна нулю, или сумма притекающих и сумма истекающих токов равны. Как правило, при суммировании притекающие токи берутся со знаком «+», а истекающие – со знаком «-».

$$\sum I = 0 \quad \text{или} \quad \sum I_{\text{прит. эк.}} = \sum I_{\text{ист. эк.}}$$

Яна: Почти как вода по трубам.

II закон Кирхгофа (для напряжений): алгебраическая сумма ЭДС всех источников, встречающихся при обходе контура, равна алгебраической сумме напряжений на всех потребителях. В алгебраической форме

$$\sum U_{\text{потребителей}} = \sum E_{\text{источников}}$$

В сумму со знаком «+» входят ЭДС содействующих источников (т.е. тех источников, которые действуют в направлении, согласном с обходом контура) и со знаком «-» ЭДС противодействующих источников. При суммировании напряжений потребителей со знаком «+» берутся напряжения

на всех потребителях, токи которых направлены согласно с обходом контура, и со знаком «—» берутся напряжения потребителей, токи которых направлены встречно. Направление обхода контура выбирается произвольно.

Яна: Понятно, Вверх на лифте, вниз по лестнице и ты опять на земле.

А.В.: Молодым лучше вверх по лестнице. Но есть свобода выбора.

3.2. Преобразование линейных электрических цепей

Эквивалентное преобразование части пассивной электрической цепи состоит в такой ее замене другой пассивной цепью, при которой остаются неизменными токи и напряжения остальной цепи, не подвергшейся преобразованию.

При *последовательном* соединении роль эквивалентного сопротивления (или сопротивления эквивалентного потребителя) играет сумма сопротивлений всех потребителей.

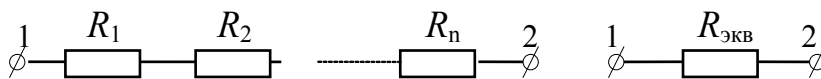


Рис.1.2

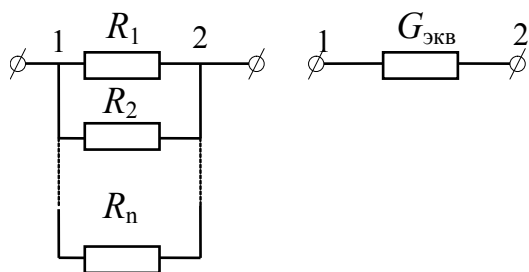
$$R_{\text{экв}} = \sum_{i=1}^n R_i \quad \text{или}$$

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

При двух *последовательно соединенных* потребителях:

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_2 \quad \text{или} \quad \frac{1}{G_{\text{экв}}} = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \Rightarrow G_{\text{экв}} = \frac{G_1 \cdot G_2}{G_1 + G_2}.$$

При *параллельном* соединении роль эквивалентной проводимости (или проводимости эквивалентного потребителя) играет сумма проводимостей всех потребителей.



$$G_{\text{эКВ}} = \sum_{i=1}^n G_i \quad \text{или} \quad \frac{1}{R_{\text{эКВ}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

При двух параллельно соединенных потребителях:

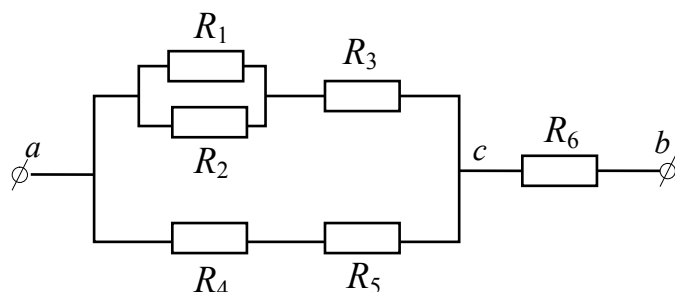
$$G_{\text{эКВ}} = G_1 + G_2 \quad \text{или} \quad \frac{1}{R_{\text{эКВ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$R_{\text{эКВ}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Рис.1.3

Определение эквивалентного сопротивления при смешанном соединении потребителей выполняется путем постепенного упрощения (сворачивания) исходной цепи.

Пример.



Параллельное соединение R_1 и R_2 :

$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Последовательное соединение R_{12} и R_3 :

$$R_{123} = R_{12} + R_3$$

Рис. 1.4

Последовательное соединение R_4 и R_5 :

$$R_{45} = R_4 + R_5$$

Параллельное соединение R_{123} и R_{45} :

$$R_{ac} = \frac{R_{123} \cdot R_{45}}{R_{123} + R_{45}}$$

Последовательное соединение R_{ac} и R_6 :

$$R_{ab} = R_{ac} + R_6$$

Эквивалентное сопротивление

$$R_{ab} = \frac{\left(\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + R_3 \right) \cdot (R_4 + R_5)}{\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + R_4 + R_5} + R_6$$

а. Расчёт разветвлённых цепей с одним источником методом эквивалентных преобразований

Цепь: 112 R1=1, 224 R2=1, 323 R3=1, 454 R4=1, 535 R5=1, 635 R6=1, 741 E(J)=1. Рассчитать цепь – найти токи всех ветвей и напряжения источников тока (если они есть).

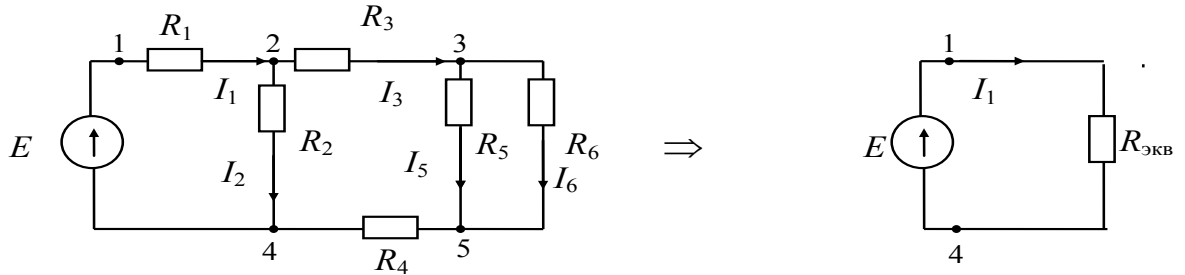


Рис.1.5

Яна: А что тут надо знать?

А.В. Токи ветвей и напряжение источника тока, если он есть.

Яна: Упрощали, упрощали и нашли только один ток?

А.В. Или напряжение для источника тока.

Для определения токов и напряжений в схеме сначала определяется $R_{экв}$ смешанного соединения потребителей относительно зажимов источника (точки 1 и 4)

$$R_{экв} = 1,71(Ом). I_1 = 0,58 (A)$$

Ток в потребителе R_1 совпадает с найденным током неразветвленной части I_1 , а напряжение $U_1 = I_1 \cdot R_1. U_1 = 0,58 (B)$

$$U_{24} = E - I_1 \cdot R_1; \quad I_2 = \frac{U_{24}}{R_2} = U_{24} \cdot G_2. \quad U_{24} = 0,42 (B), \quad I_2 = 0,42(A)$$

Ток I_3 определяют по закону Кирхгофа: $I_3 = I_1 - I_2. I_3 = 0,16(A)$

$$U_{35} = U_{24} - I_3 \cdot (R_3 + R_4); \quad I_5 = \frac{U_{35}}{R_5} = U_{35} \cdot G_5; \quad I_6 = \frac{U_{35}}{R_6} = U_{35} \cdot G_6.$$

$$U_{35} = 0,08 (B) \quad I_5 = 0,08 (A) \quad I_6 = 0,08 (A)$$

Уравнение баланса мощности: $\sum P_{источников} = \sum P_{потребителей}$

$$E \cdot I_1 = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 + I_3^2 \cdot R_4 + I_5^2 \cdot R_5 + I_6^2 \cdot R_6$$

$$1 \cdot 0,58 = 0,58^2 \cdot 1 + 0,42^2 \cdot 1 + 0,16^2 \cdot 1 + 0,16^2 \cdot 1 + 0,08^2 \cdot 1 + 0,08^2 \cdot 1 \approx 0,58 (Вт)$$

Баланс соблюдается.

А.В. Что источники отдали – то потребители получили.
Коррупции нет.

в. Расчёт разветвлённых цепей с одним источником методом пропорциональных величин

Метод пропорциональных величин применим к «удлиненным» цепям (цепным соединениям).

Яна. Цепные цепи – масло масляное. Жизнь цепь, и мелочи в ней звенья. Нельзя звену не придавать значенья!

А.В. Согласен, лучше схемы цепной структуры. Звенья – это контура, соединённые цепочкой.

Суть этого метода состоит в следующем: в ветви, наиболее удаленной от источника (R_6) задаются некоторым значением тока или напряжения. Для удобства расчетов обычно это 1А или 1В. Затем перемещаясь к началу цепи определяют поочередно токи и напряжения всех ветвей вплоть до ветви, содержащей источник. Тем самым определяют какие напряжение U_{BX} и ток I_{BX} должен иметь источник для того, чтобы вызвать во всех ветвях токи и напряжения вычисленных значений. Если ЭДС (E) или задающий ток (J) с этими значениями не совпадают, то необходимо пропорционально изменить вычисленные значения токов и напряжений ветвей путем умножения их на отношение $\frac{E}{U_{BX}}$ или $\frac{J}{I_{BX}}$.

Для схемы на рис.1.5: пусть $I_6^l = 1A$. Тогда $U_{35} = I_6 \cdot R_6$ $I_5 = \frac{U_{35}}{R_5}$.

$$U_{35}^l = 1(B) \quad I_5^l = 1(A) \quad I_3^l = 2(A)$$

I_3 можно определить по I закону Кирхгофа: $I_3 = I_5 + I_6$.

U_{24} определяем по II закону Кирхгофа: $U_{24} = I_3 \cdot (R_3 + R_4) + U_{35}$.

$$U_{24}^l = 5(B)$$

По закону Ома: $I_2 = \frac{U_{24}}{R_2}$, по I закону Кирхгофа: $I_1 = I_2 + I_3$.

$$U_{BX} = U_{24} + I_1 \cdot R_1. \quad I_2^l = 5(A) \quad I_1^l = 7(A) \quad U_{BX}^l = 12(B)$$

Коэффициент пересчета определяется следующим образом: $k = \frac{E}{U_{BX}}$.

$$k \approx 0,083 \quad I_1 = 0,58(A) \quad I_2 = 0,42(A) \quad I_3 = 0,16(A) \quad I_5 = 0,08(A) \quad I_6 = 0,08(A)$$

Все рассчитанные значения токов и напряжений необходимо умножить на коэффициент k .

3.3. *Варианты задач для расчёта разветвлённых цепей постоянного тока с одним источником.*

Найти токи ветвей и напряжения источников тока (если такие есть).
Проверить решение по балансу мощности.

- 1 Цепь: $131-J_1=5$, $213-R_2=2$, $312-R_3=3$, $423-R_4=4$, $523-R_5=5$.
- 2 Цепь: $131-J_1=5$, $213-R_2=2$, $312-R_3=3$, $423-R_4=4$, $523-R_5=5$.
- 3 Цепь: $114-R_1=1$, $213-R_2=2$, $323-R_3=3$, $424-R_4=4$, $534-E_5=2$.
- 4 Цепь: $121-J_1=4$, $212-R_2=2$, $313-R_3=3$, $434-R_4=4$, $524-R_5=5$.
- 5 Цепь: $114-R_1=1$, $212-R_2=2$, $323-R_3=3$, $434-R_4=4$, $542-J_5=1$.
- 6 Цепь: $113-R_1=1$, $213-R_2=2$, $313-R_3=3$, $412-R_4=4$, $523-E_5=4$.
- 7 Цепь: $113-R_1=1$, $212-R_2=2$, $312-R_3=3$, $423-R_4=4$, $532-J_5=5$.
- 8 Цепь: $113-R_1=1$, $213-R_2=2$, $331-J_3=5$, $412-R_4=4$, $523-R_5=5$.
- 9 Цепь: $114-E_1=10$, $234-R_2=2$, $313-R_3=3$, $412-R_4=4$, $523-R_5=5$.
- 10 Цепь: $112-R_1=1$, $223-R_2=2$, $314-R_3=3$, $414-R_4=4$, $534-E_5=5$.
- 11 Цепь: $113-R_1=1$, $212-R_2=2$, $323-R_3=3$, $432-J_4=5$, $523-R_5=5$.
- 12 Цепь: $112-R_1=1$, $212-R_2=2$, $312-R_3=3$, $423-R_4=4$, $513-E_5=4$.
- 13 Цепь: $131-J_1=5$, $213-R_2=2$, $312-R_3=3$, $423-R_4=4$, $523-R_5=5$.
- 14 Цепь: $113-E_1=4$, $212-R_2=2$, $312-R_3=3$, $423-R_4=4$, $523-R_5=5$.
- 15 Цепь: $114-R_1=1$, $214-R_2=2$, $312-R_3=3$, $423-R_4=4$, $543-E_5=3$.
- 16 Цепь: $113-R_1=1$, $212-R_2=2$, $334-R_3=3$, $424-R_4=4$, $542-J_5=2$.
- 17 Цепь: $114-R_1=1$, $212-R_2=2$, $342-J_3=1$, $423-R_4=4$, $534-R_5=5$.
- 18 Цепь: $114-R_1=1$, $212-E_2=1$, $324-R_3=3$, $423-R_4=4$, $534-R_5=5$.
- 19 Цепь: $113-R_1=1$, $231-J_2=5$, $312-R_3=3$, $412-R_4=4$, $523-R_5=5$.
- 20 Цепь: $114-R_1=1$, $212-R_2=2$, $323-R_3=3$, $434-R_4=4$, $542-J_5=1$.
- 21 Цепь: $114-E_1=5$, $213-R_2=2$, $312-R_3=3$, $434-R_4=4$, $523-R_5=5$.
- 22 Цепь: $113-R_1=1$, $213-R_2=2$, $331-J_3=5$, $412-R_4=4$, $523-R_5=5$.
- 23 Цепь: $113-R_1=1$, $234-R_2=2$, $314-R_3=3$, $412-R_4=4$, $524-E_5=5$.
- 24 Цепь: $113-R_1=1$, $231-J_2=8$, $312-R_3=3$, $423-R_4=4$, $523-R_5=5$.
- 25 епь: $114-R_1=1$, $212-R_2=2$, $312-R_3=3$, $423-R_4=4$, $543-E_5=5$.

4. Тема 2. Расчёт разветвлённых цепей постоянного тока с несколькими источниками методом уравнений Кирхгофа

Яна. Несколько источников: а зачем усложнять себе жизнь?

А.В. Пример: авто. Без батареи не стартуешь, а без генератора далеко не уедешь.

Основные теоретические сведения

Отыскание неизвестных токов связано с составлением и совместным решением системы уравнений, записанных по I и II законам Кирхгофа. Прежде чем приступить к составлению уравнений по законам Кирхгофа, необходимо установить, сколько независимых уравнений составляется по каждому из этих законов.

Уравнения по I закону Кирхгофа, связывающие n неизвестных токов, могут быть записаны для каждого из m узлов цепи. Однако использовать для совместного решения можно только $m-1$ уравнений, т.к. одно уравнение окажется следствием всех предыдущих. Исключаемый из рассмотрения узел называют опорным. По II закону Кирхгофа составляют число уравнений, равное числу ветвей n за вычетом числа уравнений, составленных по I закону Кирхгофа ($m-1$), т.е. $p = n - (m-1) = n - m + 1$, где p – количество независимых контуров.

Яна. Понятно. Сумма для первого и второго законов даст число неизвестных токов n .

А.В. Скрупулёзно подмечено.

Все эти рассуждения справедливы для случая, когда в цепи содержатся источники тока. В этом случае уменьшается количество неизвестных токов, но появляется соответствующее число напряжений U_j , которые войдут в уравнения в качестве неизвестных величин.

Методика расчета разветвленной цепи методом уравнений Кирхгофа следующая:

8. Обозначить токи ветвей и произвольно выбрать их положительное направление, обозначить напряжения источников тока, если они есть.

9. Произвольно выбрать опорный узел и совокупность $p = n - m + 1$ независимых контуров.

А.В. Важно безошибочно посчитать узлы и ветви: точка в схеме не всегда узел, провод между точками не ветвь.

10. Для всех узлов, кроме опорного, составить уравнения по I закону Кирхгофа. Таких уравнений должно быть $(m-1)$.

11. Для каждого выбранного контура составить уравнения по II закону Кирхгофа. Таких уравнений должно быть p .

12. Система уравнений Кирхгофа с неизвестными токами и напряжениями источников тока, если они есть, решается совместно.

13. Проверить правильность расчета с помощью баланса мощности.

4.1. Пример расчёта по уравнениям Кирхгофа

Схема электрической цепи задана тройками чисел

141 – $R_1=2$; 221 – $E_2=8$; 332 – $R_3=1$; 443 – $J_4=1$; 534 – $E_5=2$;

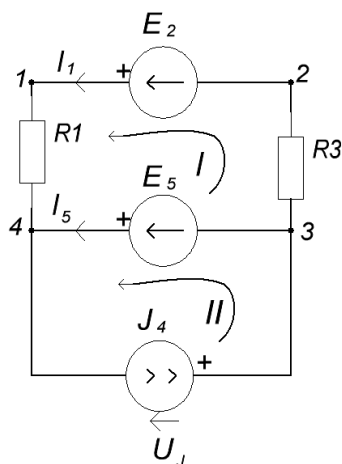
Первая цифра тройки – номер элемента цепи. Вторая цифра – начальная точка элемента. Третья – конечная точка элемента.

Нарисуйте начальные и конечные точки элементов (вторая и третья цифры троек) цепи следующим образом

.1 .2

.4 .3

По тройкам чисел нарисуйте между точками элементы цепи



Рассчитать электрическую цепь – определить токи всех ветвей и напряжение источников тока.

Обозначьте на схеме токи всех ветвей (I_1 и I_5) и напряжение источника тока (U_J). Ток ветви 4 задан источником J_4 .

Искомыми параметрами являются I_1 , I_5 и U_J . Необходимо связать их уравнениями по законам Кирхгофа.

Число ветвей цепи на рис.2.1 $n = 3$, число узлов – $m = 2$. Число независимых контуров $p = n - m + 1$. $p = 2$.

Число уравнений по 1-му закону Кирхгофа для токов $m - 1 = 1$. Для узла а)

$$I_1 + I_5 - J_4 = 0.$$

Для составления уравнений по 2-му закону Кирхгофа выберем два контура и произвольно обозначим стрелкой направление обхода.

Для контура I: $I_1 (R_1 + R_3) = E_2 - E_5$

Для контура II: $-U_j = E_5.$

Решив систему из трёх уравнений, получим

$$U_j = -2V, I_1 = 2A, I_5 = -1A.$$

Знак (-) обозначает, что истинное направление тока и напряжения противоположно выбранному.

Уравнение баланса мощности $E_2 * I_1 + E_5 * I_5 + J_4 * U_j = I_1 * (R_1 + R_3) * 8 * 2 + 2 * (-1) + 1 * (-2) = 2^2 * (2+1), 12=12 !$

4.2. *Варианты задач для расчёта разветвлённых цепей постоянного тока с несколькими источниками методом уравнений Кирхгофа*

Найти токи ветвей и напряжения источников тока (если такие есть).

Проверить решение по балансу мощности.

1 Цепь: $131 - J_1 = 5, 213 - R_2 = 2, 321 - E_3 = 10, 423 - R_4 = 4, 523 - J_5 = 5.$

2 Цепь: $114 - E_1 = 2, 212 - R_2 = 2, 342 - J_3 = 3, 423 - R_4 = 4, 534 - E_5 = 1.$

3 Цепь: $113 - E_1 = 2, 231 - J_2 = 3, 312 - R_3 = 3, 423 - R_4 = 4, 532 - J_5 = 4.$

4 Цепь: $131 - E_1 = 5, 221 - R_2 = 2, 323 - R_3 = 3, 432 - J_4 = 2, 523 - R_5 = 5.$

5 Цепь: $114 - E_1 = 2, 212 - J_2 = 4, 342 - R_3 = 3, 423 - R_4 = 4, 543 - E_5 = 2.$

6 Цепь: $113 - R_1 = 1, 231 - J_2 = 5, 312 - E_3 = 5, 423 - J_4 = 5, 523 - R_5 = 5.$

7 Цепь: $141 - R_1 = 1, 221 - E_2 = 4, 324 - J_3 = 2, 432 - R_4 = 4, 543 - E_5 = 4.$

8 Цепь: $113 - J_1 = 2, 213 - E_2 = 2, 312 - R_3 = 3, 423 - R_4 = 4, 532 - J_5 = 3.$

9 Цепь: $114 - E_1 = 6, 212 - R_2 = 2, 332 - R_3 = 3, 443 - J_4 = 2, 524 - R_5 = 5.$

10 Цепь: $141 - R_1 = 1, 221 - E_2 = 8, 324 - R_3 = 3, 423 - J_4 = 1, 534 - E_5 = 2.$

11 Цепь: $113 - J_1 = 1, 231 - R_2 = 2, 321 - E_3 = 5, 423 - J_4 = 5, 523 - R_5 = 5.$

12 Цепь: $141 - E_1 = 2, 221 - R_2 = 2, 342 - J_3 = 5, 432 - E_4 = 1, 534 - R_5 = 5.$

13 Цепь: $131 - E_1 = 3, 231 - J_2 = 1, 312 - R_3 = 3, 423 - J_4 = 1, 523 - R_5 = 5.$

14 Цепь: $131 - J_1 = 2, 213 - R_2 = 2, 313 - R_3 = 3, 412 - E_4 = 4, 532 - R_5 = 5.$

15 Цепь: $141 - E_1 = 1, 221 - R_2 = 2, 332 - E_3 = 4, 443 - J_4 = 4, 524 - R_5 = 5.$

16 Цепь: $113 - R_1 = 1, 213 - J_2 = 1, 312 - E_3 = 5, 432 - J_4 = 1, 532 - R_5 = 5.$

17 Цепь: $114 - R_1 = 1, 212 - E_2 = 2, 324 - J_3 = 1, 423 - E_4 = 8, 543 - R_5 = 5.$

18 Цепь: $113 - J_1 = 4, 213 - R_2 = 2, 312 - R_3 = 3, 432 - E_4 = 4, 523 - J_5 = 4.$

19 Цепь: $131 - J_1 = 2, 243 - R_2 = 2, 314 - R_3 = 3, 421 - E_4 = 4, 524 - R_5 = 5.$

20 Цепь: $114 - R_1 = 1, 212 - R_2 = 2, 342 - E_3 = 4, 413 - J_4 = 2, 534 - E_5 = 2.$

21 Цепь: $131 - J_1 = 10, 213 - R_2 = 2, 321 - E_3 = 5, 423 - R_4 = 4, 532 - J_5 = 5.$

22 Цепь: $114 - E_1 = 5, 212 - R_2 = 2, 342 - J_3 = 5, 432 - E_4 = 4, 534 - R_5 = 5.$

23 Цепь: $113 - E_1 = 3, 231 - J_2 = 1, 312 - R_3 = 3, 423 - R_4 = 4, 523 - J_5 = 1.$

24 Цепь: $131 - R_1 = 1, 221 - E_2 = 10, 323 - R_3 = 3, 423 - J_4 = 4, 523 - R_5 = 5.$

25 епь: $114 - E_1 = 6, 212 - R_2 = 2, 323 - J_3 = 2, 434 - R_4 = 4, 524 - R_5 = 5.$

5. Тема 3. Расчёт разветвлённых цепей постоянного тока с несколькими источниками методом контурных токов и методом узловых потенциалов

Основные теоретические сведения:

5.1. Метод контурных токов

При расчете методом контурных токов полагают, что в каждом независимом контуре течет свой контурный ток. Уравнения составляют относительно контурных токов, после чего определяют токи ветвей через контурные токи.

Яна. А измерять контурные токи мы будем?

А.В. Амперметром эти токи не измерить. Это вспомогательная расчётная величина, фиктивная.

Число неизвестных в этом методе равно числу уравнений, которые необходимо было бы составить для схемы по II закону Кирхгофа, т.е. $p = m - n + 1$.

Система уравнений для контурных токов при $p=3$ имеет следующий вид:

$$\begin{cases} I_{11} \cdot R_{11} + I_{22} \cdot R_{12} + I_{33} \cdot R_{13} = E_{11} \\ I_{11} \cdot R_{21} + I_{22} \cdot R_{22} + I_{33} \cdot R_{23} = E_{22} \\ I_{11} \cdot R_{31} + I_{22} \cdot R_{32} + I_{33} \cdot R_{33} = E_{33} \end{cases}$$

в матричной форме

$$\begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ I_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \end{pmatrix}$$

Собственное сопротивление контура (R_{ii}) представляет собой арифметическую сумму сопротивлений всех потребителей, находящихся в i -ом контуре.

Общее сопротивление контура ($R_{ij} = R_{ji}$) представляет собой алгебраическую сумму сопротивлений потребителей ветви (нескольких ветвей), одновременно принадлежащих i -ому и j -ому контурам. В эту сумму сопротивление входит со знаком «+», если контурные токи протекают через данное сопротивление в одном направлении (согласно), и знак «-», если они протекают встречно.

Контурные ЭДС представляют собой алгебраическую сумму ЭДС источников, входящих в контур. Со знаком «+» в эту сумму входят ЭДС источников, действующих согласно с обходом контура, со знаком «-» входят ЭДС источников, действующих встречно.

Число неизвестных в методе узловых потенциалов равно $m-1$

(m – число узлов цепи), т.е. числу уравнений, которые необходимо составить для схемы по I закону Кирхгофа. Один узел выбирают опорным (базовым). Его потенциал принимают равным нулю.

Система уравнений для узловых потенциалов при числе узлов $m=4$ имеет вид:

$$\begin{cases} G_{11} \cdot \varphi_1 + G_{12} \cdot \varphi_2 + G_{13} \cdot \varphi_3 = J_{11} \\ G_{21} \cdot \varphi_1 + G_{22} \cdot \varphi_2 + G_{23} \cdot \varphi_3 = J_{22} \\ G_{31} \cdot \varphi_1 + G_{32} \cdot \varphi_2 + G_{33} \cdot \varphi_3 = J_{33} \end{cases}$$

в матричной форме

$$\begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{11} \\ J_{22} \\ J_{33} \end{pmatrix}$$

Собственная проводимость узла (G_{ii}) представляет собой арифметическую сумму проводимостей всех ветвей, соединенных в i -ом узле.

Общая проводимость i -ого и j -ого узлов ($G_{ij} = G_{ji}$) представляет собой взятую со знаком « \rightarrow » сумму проводимостей ветвей, присоединенных одновременно к i -ому и j -ому узлам.

Проводимости ветвей с источниками тока полагаются равными нулю и в собственные и общие проводимости не входят!

Узловой ток (J_{ii}) состоит из двух алгебраических сумм: первая содержит токи источников тока, содержащиеся в ветвях, соединенных в i -ом узле; вторая представляет собой произведение ЭДС источников напряжения на проводимости соответствующих ветвей, соединенных в i -ом узле. Со знаком « $+$ » в эту сумму входят E_i источников, действие которых направлено к узлу, со знаком « \rightarrow » остальные.

Яна. А что тут суммировать, по Кирхгофу сумма токов в узле равна нулю.

А.В. Закон Кирхгофа про другое. Узловые токи придуманы, чтобы связать параметры цепи уравнениями.

Таким образом, методика расчета цепи постоянного тока методом узловых потенциалов следующая:

- Обозначить все токи ветвей и их положительное направление.
- Произвольно выбрать опорный узел ($\varphi_0 = 0$) и пронумеровать все остальные узлы.
- Определить собственные и общие проводимости узлов, а также узловые токи, т.е. рассчитать коэффициенты в системе уравнений.

- Записать систему уравнений. Систему уравнений решить относительно неизвестных потенциалов. С помощью обобщенного закона Ома рассчитать неизвестные токи.

- Проверить правильность расчетов при помощи баланса мощности.

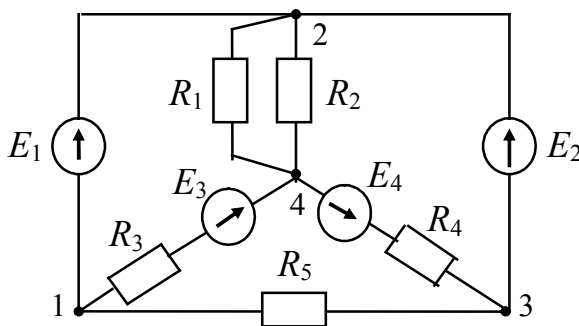
Порядок расчета не зависит от вида источников, действующих в цепи. Однако, *расчет упрощается* в случае, когда между одной или несколькими парами узлов включены только идеализированные источники ЭДС. Тогда напряжения между этими парами узлов становятся известными величинами, определенными условиями задачи. Для успешного решения подобных задач необходимо правильно обозначить опорный узел, в качестве которого может быть выбран только один из узлов, к которым присоединена ветвь с идеализированным источником ЭДС.

Если таких ветвей q , то количество уравнений в системе сократится до

$$k = m - 1 - q.$$

5.4. Пример расчёта методом узловых потенциалов

Если в данной схеме в качестве опорного узла выбрать узел 1 ($\varphi_1=0$), то потенциалы второго и третьего узлов можно считать известными и равными соответственно $\varphi_2=E_1$ и $\varphi_3=E_1-E_2$. Тогда неизвестным остается только потенциал четвертого узла, для которого составим уравнение по методу узловых потенциалов:



$$\varphi_2 \cdot G_{24} + \varphi_3 \cdot G_{34} + \varphi_4 \cdot G_{44} = J_{44}.$$

Следует отметить, что уравнения для 2 и 3 узлов составлять не нужно.

Подставим известные значения:

$$E_1 \cdot \left(-\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + (E_1 - E_2) \cdot \left(-\frac{1}{R_4} \right) + \varphi_4 \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) = \frac{E_3}{R_3} - \frac{E_4}{R_4}.$$

Из полученного уравнения найдем неизвестный φ_4 , а далее и все токи.

5.5. Пример расчёта методом двух узлов

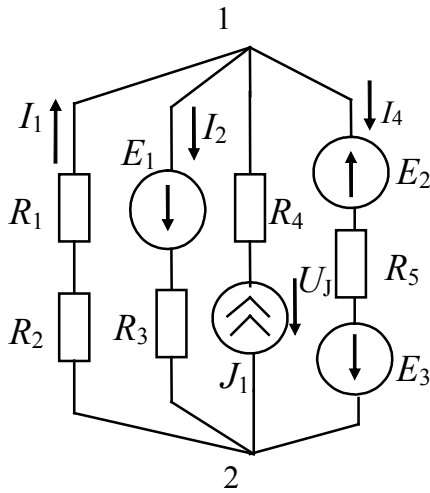
Для разветвленной цепи, имеющей только два узла и произвольное количество ветвей, метод узловых потенциалов вырождается в *метод двух узлов*. Решение сводится к отысканию значения потенциала одного из узлов, т.к. потенциал другого узла может быть принятым равным нулю.

Система уравнений превращается в одно уравнение:

$$\varphi_1 \cdot G_{11} = J_{11} \Rightarrow U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{J_{11}}{G_{11}} = \frac{\pm \sum E \cdot G \pm \sum J}{\sum G}$$

при условии, что $\varphi_2 = 0$.

После определения U_{12} токи ветвей и напряжения источников тока находят при помощи обобщенного закона Ома.



Пусть $\varphi_2 = 0$, тогда

$$U_{12} = \varphi_1 = \frac{-\frac{E_1}{R_3} + J + \frac{E_2 - E_3}{R_5}}{\frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5}}$$

По обобщенному закону Ома:

$$I_1 = \frac{U_{21}}{R_1 + R_2} = \frac{-U_{12}}{R_1 + R_2} \quad I_2 = \frac{U_{12} + E_1}{R_3}$$

$$I_4 = \frac{U_{12} - E_2 + E_3}{R_5} \quad U_J = U_{12} + J \cdot R_4$$

5.6. Варианты задач для расчёта разветвлённых цепей постоянного тока с несколькими источниками методом контурных токов и методом узловых потенциалов.

Найти токи ветвей и напряжения источников тока (если такие есть).

Проверить решение по балансу мощности.

1 Цепь: 115– $E_1=2$, 212– $R_2=2$, 324– $E_3=2$, 413– $J_4=2$, 535– $R_5=5$, 634– $R_6=6$, 754– $J_7=2$, 845– $R_8=8$.

2 Цепь: 114– $J_1=1$, 214– $R_2=2$, 312– $R_3=3$, 424– $E_4=2$, 523– $R_5=5$, 635– $R_6=6$, 713– $J_7=1$, 845– $E_8=2$.

3 Цепь: 115– $R_1=1$, 212– $R_2=2$, 324– $E_3=1$, 413– $J_4=1$, 535– $R_5=5$, 653– $J_6=1$, 734– $R_7=7$, 845– $E_8=1$.

4 Цепь: 115– $E_1=2$, 212– $R_2=2$, 342– $E_3=2$, 413– $R_4=4$, 535– $R_5=5$, 634– $J_6=2$, 745– $R_7=7$, 845– $J_8=2$.

5 Цепь: 114– $R_1=1$, 241– $J_2=2$, 312– $R_3=3$, 415– $J_4=2$, 532– $E_5=2$, 634– $R_6=6$, 735– $E_7=2$, 845– $R_8=8$.

6 Цепь: 114– $R_1=1$, 213– $R_2=2$, 313– $J_3=1$, 412– $R_4=4$, 534– $E_5=2$, 625– $E_6=2$, 735– $J_7=1$, 845– $R_8=8$.

7 Цепь: 151– $J_1=1$, 214– $J_2=1$, 314– $R_3=3$, 412– $E_4=1$, 523– $R_5=5$, 643– $E_6=1$, 725– $R_7=7$, 845– $R_8=8$.

8 Цепь: $115-R_1=1$, $214-E_2=4$, $312-R_3=3$, $432-E_4=4$, $535-R_5=5$, $634-J_6=2$, $745-R_7=7$, $854-J_8=2$.

9 Цепь: $115-J_1=2$, $215-R_2=2$, $314-J_3=2$, $412-E_4=2$, $524-R_5=5$, $623-R_6=6$, $753-E_7=2$, $845-R_8=8$.

10 Цепь: $114-R_1=1$, $212-R_2=2$, $313-E_3=2$, $423-J_4=1$, $523-R_5=5$, $625-R_6=6$, $745-E_7=2$, $835-J_8=1$.

11 Цепь: $115-R_1=1$, $213-R_2=2$, $312-J_3=1$, $452-J_4=1$, $525-R_5=5$, $623-E_6=2$, $734-R_7=7$, $854-E_8=2$.

12 Цепь: $115-E_1=2$, $214-R_2=2$, $312-J_3=2$, $412-R_4=4$, $525-J_5=2$, $623-R_6=6$, $734-E_7=2$, $845-R_8=8$.

13 Цепь: $115-R_1=1$, $241-J_2=2$, $314-R_3=3$, $412-R_4=4$, $523-E_5=2$, $634-J_6=2$, $753-E_7=2$, $845-R_8=8$.

14 Цепь: $115-J_1=2$, $214-R_2=2$, $312-R_3=3$, $423-R_4=4$, $534-E_5=2$, $612-J_6=2$, $725-R_7=7$, $845-E_8=2$.

15 Цепь: $114-R_1=1$, $213-E_2=2$, $312-R_3=3$, $423-J_4=1$, $523-R_5=5$, $652-J_6=1$, $745-E_7=2$, $835-R_8=8$.

16 Цепь: $115-R_1=1$, $251-J_2=2$, $313-R_3=3$, $412-E_4=2$, $523-R_5=5$, $624-R_6=6$, $754-E_7=2$, $853-J_8=2$.

17 Цепь: $115-E_1=2$, $214-R_2=2$, $312-R_3=3$, $424-R_4=4$, $512-J_5=2$, $623-R_6=6$, $735-E_7=2$, $845-J_8=2$.

18 Цепь: $115-R_1=1$, $213-J_2=1$, $312-R_3=3$, $425-R_4=4$, $523-E_5=4$, $625-J_6=1$, $745-E_7=4$, $834-R_8=8$.

19 Цепь: $151-J_1=1$, $215-R_2=2$, $312-R_3=3$, $413-E_4=1$, $523-R_5=5$, $624-R_6=6$, $745-E_7=1$, $853-J_8=1$.

20 Цепь: $115-R_1=1$, $213-J_2=2$, $312-E_3=2$, $452-J_4=2$, $525-R_5=5$, $623-R_6=6$, $754-E_7=2$, $834-R_8=8$.

21 Цепь: $115-E_1=4$, $214-R_2=2$, $314-J_3=2$, $412-R_4=4$, $523-E_5=4$, $635-R_6=6$, $734-J_7=2$, $845-R_8=8$.

22 Цепь: $114-R_1=1$, $213-R_2=2$, $312-R_3=3$, $423-J_4=1$, $523-R_5=5$, $625-J_6=1$, $754-E_7=2$, $853-E_8=2$.

23 Цепь: $115-R_1=1$, $213-R_2=2$, $313-J_3=2$, $412-R_4=4$, $532-E_5=2$, $624-R_6=6$, $745-E_7=2$, $853-J_8=2$.

24 Цепь: $151-J_1=1$, $214-R_2=2$, $312-R_3=3$, $432-E_4=4$, $515-R_5=5$, $635-R_6=6$, $743-J_7=1$, $845-E_8=4$.

25 Цепь: $115-R_1=1$, $212-R_2=2$, $324-E_3=4$, $413-J_4=1$, $534-E_5=4$, $635-R_6=6$, $745-R_7=7$, $854-J_8=1$.

6. Тема 4. Параметры синусоидальных сигналов во временной и комплексной форме

Основные теоретические сведения:

6.1. Мгновенные значения напряжений и токов

Переменным током $i(t)$ и напряжением $u(t)$ называют токи и напряжения, изменяющиеся во времени.

В электроэнергетике нашли широкое применение синусоидальные сигналы. $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$, $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$,

где $u(t)$, $i(t)$ – мгновенное значение;

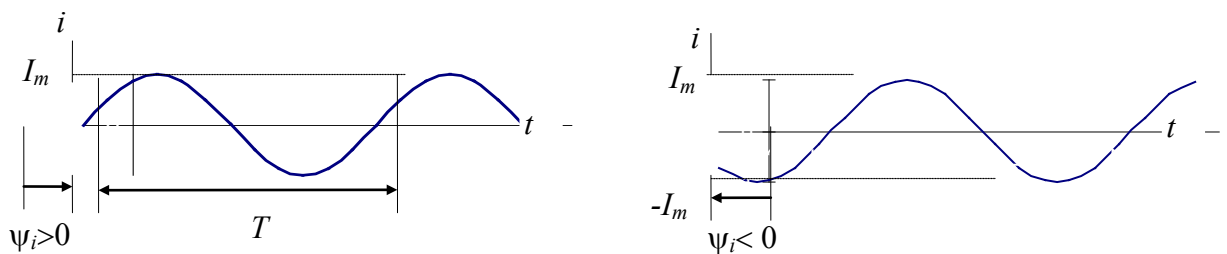
U_m , I_m – амплитуда переменного сигнала – максимальная по модулю его величина;

$\omega t + \psi_u$, $\omega t + \psi_i$ – фаза гармонического сигнала – аргумент при синусе в каждый момент времени;

ψ_u , ψ_i – начальная фаза – значение аргумента в начальный момент времени ($t=0$). Фаза измеряется в радианах или градусах.

$\varphi = \psi_u - \psi_i$ – разность фаз напряжения и тока

Временная диаграмма гармонического (синусоидального) сигнала.



Величина, обратная периоду, называется *частотой* f :

$$f = \frac{1}{T} \quad [f] = c^{-1} = \text{Гц.}$$

Также существует понятие *угловой (циклической) частоты*:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad [\omega] = \text{рад/с.}$$

О значениях периодических токов и напряжений обычно судят по их среднеквадратическим значениям за период, которые называют *действующим значением* тока и напряжения и обозначают I , U :

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}, \quad I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

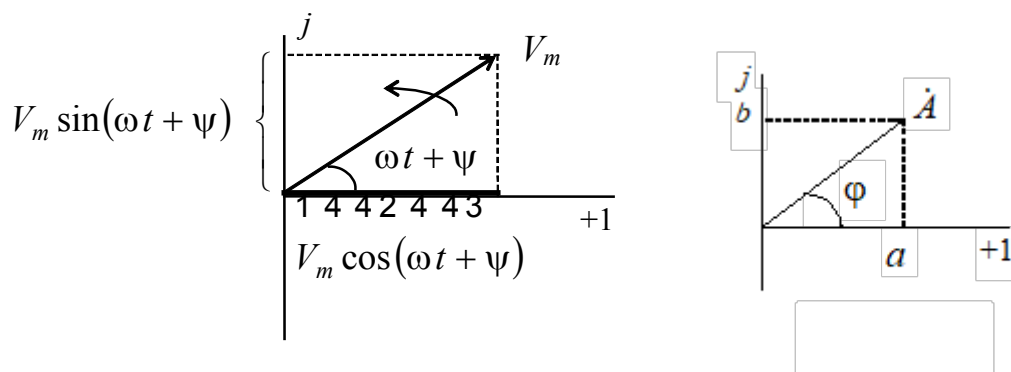
Яна. Помню, как непросто сложить $2\sin(t+3)$ и $3\sin(t+4)$. Не инженерное это занятие. Без математика или компьютера не обойтись.

А.В. Обойдёмся без математика. Нам помогут мнимая единица и вектора. А компьютер под рукой всегда пригодится.

6.2. Комплексы напряжения и тока

Пусть некоторая электрическая величина (ток, напряжение, ЭДС и т.д.) изменяется по синусоидальному закону $v = V_m \sin(\omega t + \psi)$. В прямоугольной системе координат расположим под углом ψ вектор, длина которого в выбранном масштабе равна амплитуде V_m (причем, $\psi > 0$, если отсчитывается против часовой стрелки).

Представим себе, что вектор с момента $t = 0$ начинает вращаться вокруг начала координат в положительном направлении с постоянной угловой скоростью, равной угловой частоте ω . В момент времени $t \neq 0$ вектор составляет с осью абсцисс угол $\omega t + \psi$. А его проекция на ось ординат будет равна мгновенному значению величины v . Таким образом, между мгновенным значением $v(t)$ и вектором V_m можно установить однозначное соответствие. На этом основании будем называть вектор V_m *вектором, изображающим функцию времени*, и обозначать \dot{V} .



Применяется четыре формы записи комплексного значения синусоидальной величины: *полярная, показательная, тригонометрическая и алгебраическая*:

$$\dot{A} = A \angle \phi = A e^{j\phi} = A \cos \phi + jA \sin \phi = a + jb,$$

При анализе цепей синусоидального тока применяют главным образом *комплексные действующие значения*, сокращенно их называют *комплексными значениями*, а соответствующие им векторы на комплексной плоскости – *векторами комплексных значений*. Связь между комплексом

амплитуды и комплексом действующего значения устанавливается по формуле:

$$i = I e^{j\psi_i} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_i}; \quad I_m = \sqrt{2} I$$

Пример символического представления функции времени

$$i = 10 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right). \quad \dot{I}_m = 10 e^{j\frac{\pi}{3}} - \text{комплекс амплитуды};$$

$$i = \frac{10}{\sqrt{2}} e^{j\frac{\pi}{3}} - \text{комплекс действующего значения или комплекс.}$$

Яна. Значит комплекс заменит в анализе цепи мгновенное значение. А где же частота?

А.В. Частота задаётся источником энергии и присуща токам всех элементов цепи. Частота неизменна и таскать её по всем расчётным формулам нет нужды.

Совокупность векторов комплексных значений синусоидальных величин одной частоты, изображенных на комплексной плоскости, называют *векторной диаграммой*. Пользуясь векторной диаграммой, сложение и вычитание комплексных значений можно заменить сложением и вычитанием соответствующих векторов. Векторные диаграммы являются графическим отображением математических соотношений и расчетов электрической цепи.

6.3. Варианты задач для определения параметров мгновенных значений и комплексов

Записать комплекс для мгновенного значения сигнала 1. Построить векторную диаграмму для двух сигналов. Записать функцию мгновенного значения сигнала 2. Для вариантов с одноимёнными сигналами найти сумму и записать мгновенное значение. Для разноимённых значений найти разность фаз. Записать амплитуду, действующее значение и период для временных сигналов.

Яна. В вычислениях с комплексными числами запутаться легко. А если решать системы уравнений, то жуть!

А.В. График – язык, на котором говорят инженеры. Будем строить векторные диаграммы.

- | | |
|------------|--|
| Вариант1. | $i_1 = 4\cos(2t-90^\circ); \dot{I}_2 = -2\sqrt{2}.$ |
| Вариант2. | $i_1 = 6\sin(2t+135^\circ); \dot{I}_2 = -3+j3.$ |
| Вариант3. | $i_1 = 2\cos(2t+135^\circ); \dot{I}_2 = -1-j.$ |
| Вариант4. | $i_1 = 8\cos(2t+90^\circ); \dot{I}_2 = -4\sqrt{2}.$ |
| Вариант5. | $i_1 = 10\sin(2t+45^\circ); \dot{I}_2 = -5-j5.$ |
| Вариант6. | $u_1 = 6\cos(2t+45^\circ); \dot{I}_2 = -3+j3.$ |
| Вариант7. | $u_1 = 8\sin(2t+135^\circ); \dot{I}_2 = -4\sqrt{2}.$ |
| Вариант8. | $u_1 = 10\cos(2t-90^\circ); \dot{I}_2 = -5-j5.$ |
| Вариант9. | $u_1 = 4\sin(2t+90^\circ); \dot{I}_2 = -2\sqrt{2}.$ |
| Вариант10. | $u_1 = 2\sin(2t-90^\circ); \dot{I}_2 = -1-j.$ |

- Вариант11. $u_1 = 2\sqrt{2}\cos(4t+45^\circ)$; $\dot{U}_2 = -\sqrt{2}$.
- Вариант12. $u_1 = 4\cos(4t-90^\circ)$; $\dot{U}_2 = -\sqrt{2}+j\sqrt{2}$.
- Вариант13. $u_1 = 4\cos(4t+90^\circ)$; $\dot{U}_2 = 2\sqrt{2}*(-1-j)$.
- Вариант14. $u_1 = 4\sqrt{2}\cos(4t+135^\circ)$; $\dot{U}_2 = -j2\sqrt{2}$.
- Вариант15. $u_1 = 6\cos(4t-135^\circ)$; $\dot{U}_2 = j6$.
- Вариант16. $i_1 = 4\sin(4t+45^\circ)$; $\dot{U}_2 = -\sqrt{2}+j\sqrt{2}$.
- Вариант17. $i_1 = 4\sqrt{2}\sin(4t-90^\circ)$; $\dot{U}_2 = -j2\sqrt{2}$.
- Вариант18. $i_1 = 6\sin(4t+45^\circ)$; $\dot{U}_2 = j6$.
- Вариант19. $i_1 = 2\sqrt{2}\sin(4t+45^\circ)$; $\dot{U}_2 = -\sqrt{2}$.
- Вариант20. $i_1 = 4\sin(4t+135^\circ)$; $\dot{U}_2 = 2\sqrt{2}*(-1-j)$.
- Вариант21. $i_1 = 4\cos(2t-90^\circ)$; $\dot{I}_2 = -2\sqrt{2}$.
- Вариант22. $i_1 = 6\sin(2t+135^\circ)$; $\dot{I}_2 = -3+j3$.
- Вариант23. $i_1 = 2\cos(2t+135^\circ)$; $\dot{I}_2 = -1-j$.
- Вариант24. $i_1 = 8\cos(2t+90^\circ)$; $\dot{I}_2 = -4\sqrt{2}$.
- Вариант25. $i_1 = 10\sin(2t+45^\circ)$; $\dot{I}_2 = -5-j5$.

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

Вопросы к зачету

- 1.1. Электрическая цепь и ее элементы
- 1.2. Структура электрической цепи
- 1.3. Законы Кирхгофа
- 1.4. Преобразование линейных пассивных электрических цепей
- 1.5. Обобщенный закон Ома
- 1.6. Баланс мощности
- 1.7. Расчет неразветвленных цепей постоянного тока
- 1.8. Расчет разветвленных цепей постоянного тока с одним источником
- 1.9. Расчет разветвленных цепей постоянного тока с несколькими

источниками

- 1.10. Метод уравнений Кирхгофа для цепей постоянного тока
- 1.11. Метод контурных токов для цепей постоянного тока
- 1.12. Метод наложения для цепей постоянного тока
- 3.1. Основные характеристики гармонических сигналов
- 3.2. Элементы цепей гармонического тока
 - 3.2.1. Гармонический ток в сопротивлении
 - 3.2.2. Гармонический ток в индуктивности
 - 3.2.3. Гармонический ток в емкости
 - 3.2.4. Последовательное соединение R , L , C
- 3.3. Символический метод расчета цепей с гармоническими

воздействиями

- 3.3.1. Понятие о комплексных числах
- 3.3.2. Законы Ома и Кирхгофа для цепей переменного тока
- 3.3.3. Последовательное соединение R , L , C
- 3.4. Методы расчета цепей синусоидального тока и напряжения
 - 3.4.1. Эквивалентное преобразование пассивных цепей
 - 3.4.5. Метод контурных токов для цепей переменного тока
 - 3.4.7. Метод наложения для цепей переменного тока

Учебная программа дисциплины

Учреждение образования
«Брестский государственный технический университет»

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор БрГТУ

_____ М.В.Нерода

« » _____ 2022 г.

Регистрационный № УД- _____ /уч.

Теория электрических цепей

Учебная программа учреждения высшего образования по учебной
дисциплине для специальности:

1-39 03 02 Программируемые мобильные системы

2022 г.

Учебная программа составлена на основе типовой учебной программы, утвержденной Министерством образования Республики Беларусь 20.06.2015 Регистрационный № ТД-1.1216/тип. и учебного плана для специальности 1-39 03 02 Программируемые мобильные системы

СОСТАВИТЕЛЬ:

А.В.Ярошевич , доцент, к.т.н., доцент

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой автоматизации технологических процессов и производств

Заведующий кафедрой

О.Н.Прокопеня

(протокол № _____ от _____ 20 ____);

Методической комиссией факультета электронных информационных систем

Председатель методической комиссии

(протокол № _____ от _____ 20 ____);

Научно-методическим советом БрГТУ (протокол № _____ от _____ 20 ____)

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

В подготовке инженеров – системотехников и инженеров по информационным технологиям курс «Теория электрических цепей» (ТЭЦ) относится к основным общетеоретическим курсам, определяющим базовую подготовку к изучению специальных дисциплин. Деятельность названных инженеров связана с построением и обслуживанием автоматизированных информационных систем. Основой технического обеспечения таких систем являются компьютеры, которые по существу построены на принципах и элементах, являющихся предметом теории электрических цепей.

Цель преподавания учебной дисциплины - освоение терминологии, принципов описания, методов анализа и синтеза структуры и параметров электротехнических элементов и устройств. Предмет курса обобщается понятием электрической цепи.

Электрическая цепь представляет собой совокупность связанных определенным образом источников, потребителей и преобразователей электрической энергии.

Задачи учебной дисциплины:

- изучение основных теоретических законов, принципов, методов описания, анализа и синтеза электрических цепей
- закрепление теоретических знаний решением задач анализа для цепей с конкретными схемами и параметрами элементов;
- получение практических навыков исследования цепей на реальных физических установках;
- изучение возможностей компьютерных пакетов для анализа и проектирования электрических устройств;
- получение навыков самостоятельной исследовательской работы при получении описания процессов в цепях с использованием специальных математических методов и компьютерных пакетов.

В результате изучения учебной дисциплины «Теория электрических цепей» формируются следующие компетенции

СК-9. Осуществлять расчёт электрических цепей, составлять и анализировать схемы замещения электротехнических устройств для решения инженерных задач.

В результате изучения учебной дисциплины студент должен знать:

- теоретические основы цепей постоянного и переменного тока;
- основные законы теории электрических цепей.

уметь:

- использовать методы анализа и расчёта электрических цепей;
- выполнять экспериментальные исследования процессов в электрических цепях.

владеть:

- базовыми знаниями теории электрических цепей;
- навыками проведения экспериментов в электрических цепях.

Связи с другими учебными дисциплинами:

Изучение курса ТЭЦ базируется на знании дифференциального исчисления, линейной алгебры, функций комплексного переменного, преобразований Фурье и Лапласа в высшей математике, а также знании электромагнитных явлений и основных законов сохранения энергии и материи в физике.

Курс ТЭЦ является базой для изучения электроники, микропроцессорной техники, автоматики и электронно – вычислительных машин.

План учебной дисциплины для дневной формы получения высшего образования

Код специальности (направления специальности)	Наименование специальности (направления специальности)	Курс	Семестр	Всего учебных часов	Количество зачетных единиц	Аудиторных часов (в соответствии с учебным планом УВО)					Академических часов на курсовой проект (работу)	Форма текущей аттестации
						Всего	Лекции	Лабораторные занятия	Практические занятия	Семинары		
1-390302	Программируемые мобильные системы	2	3	108	3	50	18	16	16	-	-	зачёт

1. СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

1.1. ЛЕКЦИОННЫЕ ЗАНЯТИЯ, ИХ СОДЕРЖАНИЕ

Тема 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

1.1. Электрическая цепь и ее элементы 1.2. Структура электрической цепи 1.3. Законы Кирхгофа 1.4. Преобразование линейных пассивных электрических цепей 1.5. Обобщенный закон Ома 1.6. Баланс мощности

Тема 2. РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1. Расчет неразветвленных цепей 2.2. Расчет разветвленных цепей с одним источником 2.3. Расчет разветвленных цепей с несколькими источниками 2.3.1. Метод уравнений Кирхгофа 2.3.2. Метод контурных токов 2.3.4. Метод наложения

Тема 3. ЦЕПИ С ИСТОЧНИКАМИ ГАРМОНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

3.1. Основные характеристики гармонических сигналов 3.2. Элементы цепей гармонического тока 3.2.1. Гармонический ток в сопротивлении 3.2.2. Гармонический ток в индуктивности 3.2.3. Гармонический ток в емкости 3.2.4. Последовательное соединение R, L, C 3.3. Символический метод

расчета цепей с гармоническими воздействиями 3.3.1. Понятие о комплексных числах 3.3.2. Законы Ома и Кирхгофа 3.3.3. Последовательное соединение R, L, C 3.4. Методы расчета цепей синусоидального тока и напряжения 3.4.1. Эквивалентное преобразование пассивных цепей 3.4.5. Метод контурных токов 3.4.7. Метод наложения

1.2. ПРАКТИЧЕСКИЕ (СЕМИНАРСКИЕ) ЗАНЯТИЯ, ИХ СОДЕРЖАНИЕ

1. Методы эквивалентных преобразований
2. Метод уравнений Кирхгофа
3. Метод контурных токов
4. Законы Ома и Кирхгофа при гармонических воздействиях
5. Символический метод расчёта цепей

1.3. ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ, ИХ НАЗВАНИЕ

1. Техника безопасности и методы измерений
2. Исследование разветвлённых цепей
3. Метод наложения и принцип обратимости для линейных резистивных цепей
4. Исследование установившегося синусоидального режима в простых цепях
5. Резонанс напряжений

2. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ для дневной формы получения высшего образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСП	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Самостоятельная работа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.1	Основные понятия и законы теории электрических цепей	4	2	-	6	15	-	Защита Лабораторных работ. Устные опросы.
1.2	Расчёт линейных электрических цепей постоянного тока	6	8	-	6	15	-	
1.3	Цепи с источниками гармонических воздействий	8	6	-	4	18	-	

3. ИНФОРМАЦИОННО МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

3.1. Основная литература

3.1.1. Батура, М.П. Теория электрических цепей: учебник / М.П. Батура, А.П. Кузнецов, А.П. Гурулев; под общ. ред. А.П. Курулева. – 3-е изд., перераб. – Минск: Вышэйшая школа, 2015. – 606 с.

3.1.2. Малинин, Л.И. Теория электрических цепей: учебное пособие для вузов / Л.И. Малинин, В.Ю. Нейман. – М.: Издательство Юрайт, 2017. – 346 с.

3.2. Дополнительная литература.

3.2.1. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники, ч.1. М.: Энергия, 1978.

3.2.2. Зевеке Г.В. и др. Основы теории цепей. 5-е изд. М.: Энергия, 1989.

3.2.3. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи. М.: Высшая школа, 1981.

3.2.4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники, т.1. М.: Высшая школа, 1984.

3.2.5. Бессонов Л.А. Сборник задач по ТОЭ. М.: Высшая школа, 1988.

3.3. Учебно-методические разработки

3.3.1. О.Н.Прокопеня, А.В.Ярошевич. Методические указания к лабораторным работам по теории электрических цепей. Брест: БрГТУ, 2018 – 70с.

3.3.2. А.В.Ярошевич. Лабораторный практикум по теории электрических цепей «Исследование линейных цепей на компьютерных моделях». Брест: УО «БрГТУ», 2014.

3.4. Компьютерные программы.

3.4.1. Electronics Workbench 4.0, Interactive Image Technologies Ltd., 1996.

3.4.2. Mathcad 5.0, MathSoftInc., 1994.

3.5. Лабораторное оборудование

Лабораторные работы выполняются на специальных макетах в лаборатории электрических цепей кафедры Автоматизации технологических процессов и производств. Лабораторные стенды оснащены необходимым набором измерительных приборов и осциллографами. При необходимости лабораторные работы можно проводить в компьютерных классах с использованием пакетов «Начала электроники» и «ElectronicsWorkbench».

3.6. ПЕРЕЧЕНЬ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ РЕЗУЛЬТАТОВ УЧЕБНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ.

Для диагностики результатов учебной деятельности используются:
контрольные опросы;
контрольные работы;
отчеты по лабораторным работам с их устной защитой.

3.7. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ И ВЫПОЛНЕНИЮ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ.

Используются следующие формы самостоятельной работы:

Вид самостоятельной работы	Форма контроля
Работа над лекционным материалом	Контрольные опросы
Подготовка к лабораторным занятиям	Отчеты по лабораторным работам с их устной защитой
Подготовка к сдаче зачета	Зачет

Темы для самостоятельного изучения:

Структура электрической цепи. Законы Кирхгофа. Преобразование линейных пассивных электрических цепей [3.1.1].

Расчет разветвленных цепей с одним источником. Расчет разветвленных цепей с несколькими источниками. Метод контурных токов. Метод наложения. [3.1.1, 3.2.4].

Символический метод расчета цепей с гармоническими воздействиями.

Комплексные сопротивления и проводимость. Законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме. Расчет мощности по комплексам напряжения и тока [3.1.2, 3.2.3].

Методы расчета цепей синусоидального тока. Эквивалентное преобразование пассивных цепей. Метод контурных токов. Метод узловых потенциалов.

Метод наложения. Метод эквивалентного генератора [3.1.1, 3.1.2, 3.3.4].

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ
«Теория электрических цепей»

Название учебной дисциплины	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
1	2	3	4
Схемотехника цифровых устройств.	Электронных вычислительных машин и систем		

Содержание учебной программы согласовано с выпускающей кафедрой.

Заведующий выпускающей кафедрой
кандидат технических наук, доцент

С.С. Дереченник