

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

**Программа, методические указания и контрольные
задания для студентов заочной формы обучения
всех специальностей**

Минск 2005

УДК 621.3.011.7
ББК 32 88-01
Э45

Рассмотрены и рекомендованы к изданию редакционно-издательским советом университета

Составители:
В.И. Горошко, Н.П. Краевская, А.А. Ларионов,
А. А. Полищук

Рецензент
доцент кафедры информационных систем и технологий БГТУ
кандидат физ.-мат. наук Н.Н. Пустовалова

По тематическому плану изданий учебно-методической литературы университета на 2005 год. Поз.181.
Для студентов заочной формы обучения всех специальностей.

© Учреждение образования
«Белорусский государственный
технологический университет», 2005

ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания к контрольной работе по электрическим цепям постоянного и переменного тока (однофазного и трехфазного) предназначены для студентов всех специальностей заочного обучения, изучающих курсы «Электротехника и промышленная электроника», «Электротехника, основы электроники и электрооборудования химических производств», «Электротехника и электропривод» в рамках бакалаврской и магистровской подготовки.

Более глубокому освоению курса электротехники способствует самостоятельная работа студентов, позволяющая использовать теоретические знания для решения практических задач.

Самостоятельное решение практических задач вызывает большие трудности, особенно у студентов, в учебном плане которых не предусмотрены практические занятия, поэтому в каждой главе пособия приведены основные теоретические положения и формулы, алгоритмы решения типовых задач, примеры задач с ответами, что позволяет контролировать правильность их решения.

Для самопроверки усвоения материала в каждой главе приведены контрольные вопросы и примеры, охватывающие весь материал.

В методических указаниях имеются исходные данные к контрольной работе по расчету электрических цепей и список необходимой учебной и справочной литературы, а также общие методические указания по выбору номера варианта и оформлению работ.

1. ПРОГРАММА РАЗДЕЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ»

Введение

Электрическая энергия, ее особенности, применение. Роль электротехники в развитии комплексной автоматизации современных технологических производственных процессов и систем управления. Развитие электротехники как науки.

1.1. Линейные электрические цепи постоянного тока

Электрическое оборудование постоянного тока и области его применения. Источники питания и приемники электрической энергии, их особенности и характеристики. Активные и пассивные двухполюсники. Режимы работы электрических цепей.

Законы Кирхгофа и Ома. Расчет неразветвленных и разветвленных цепей методами свертывания, контурных токов, наложения, межузлового напряжения, эквивалентного генератора.

Баланс мощностей. Потенциальная диаграмма.

1.2. Линейные электрические цепи однофазного переменного тока

Особенности электромагнитных процессов в электрических цепях переменного тока. Способы изображения электротехнических величин синусоидальных функций: временные диаграммы, векторы, комплексные числа. Основные параметры, характеризующие синусоидальные ЭДС – ток, напряжение. Источники синусоидальных ЭДС. Электрические цепи с R -, L -, C -элементами.

Уравнение электрического состояния цепей синусоидального тока, мгновенных и комплексных величин. Уравнения электрического состояния цепей с последовательным, параллельным и смешанным соединением элементов.

Активные, реактивные, полные сопротивления и проводимости двухполюсника. Векторная диаграмма на комплексной плоскости. Активная, реактивная и полная мощность.

Резонансные явления в электрических цепях, условия возникновения и практическое применение. Анализ и расчет разветвленных цепей с одним источником питания. Техно-экономическое значение повышения коэффициента мощности и способы компенсации реактивной мощности.

1.3. Трехфазные цепи

Получение трехфазной ЭДС. Элементы и параметры 3-фазных цепей. Способы соединения фаз. Классификация 3-фазных приемников. Трехпроводные и четырехпроводные цепи.

Симметричные режимы трехфазных цепей. Соединение элементов 3-фазных цепей «звезда», «треугольник». Соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями при симметричных нагрузках. Понятие о несимметричных режимах в 3- и 4-проводных цепях. Назначение нейтрального провода. Напряжение между нейтральными. Мощность 3-фазной цепи. Коэффициент мощности симметричных приемников и способы его увеличения.

Техника безопасности при эксплуатации трехфазных установок.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1. Общие сведения

Электрической цепью называют совокупность источников питания (генераторы, гальванические элементы, аккумуляторные батареи и др.) приемников электрической энергии (электрические двигатели, источники света, нагревательные элементы и др.) и соединяющих их проводов, создающих путь для электрического тока.

Источники питания, приемники электрической энергии, соединяющие их провода являются основными элементами электрической цепи. Элементами цепи являются также аппараты управления, защиты, преобразующие устройства (трансформаторы, выпрямители и др.) и электроизмерительные приборы.

Графическое изображение электрической цепи с помощью условных обозначений (согласно действующему ГОСТу) называется электрической схемой.

В любой электрической схеме различают такие понятия, как точка, узел, ветвь, контур.

Точка – место соединения двух элементов электрической цепи.

Ветвь электрической цепи – участок цепи с одним и тем же током.

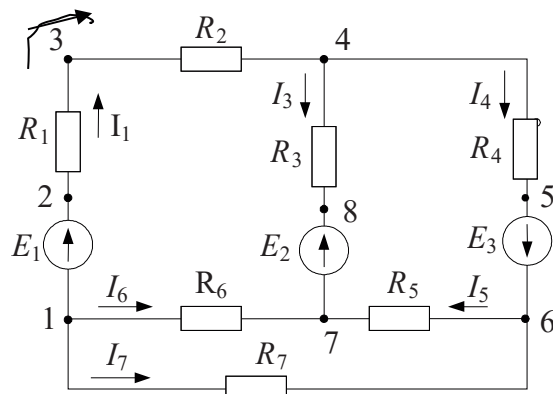


Рис. 2.1

Узел – место соединения трех или более ветвей. Контур – несколько ветвей, образующих замкнутую цепь.

На рис.2.1 показана электрическая цепь, в которой 4 узла (1, 4, 6, 7), 4 точки (2, 3, 5, 8) соединения элементов, 6 ветвей (1–4; 4–6; 4–7; 6–7; 1–7; 1–6) и 3 независимых контура (1–4–7–1; 7–4–6–7; 1–7–6–1).

Независимый контур – это такой, в который входит хотя бы одна ветвь, не входящая в другие контуры. Элементы электрической цепи постоянного тока характеризуют параметрами: R – омическое сопротивление – параметр, характеризующий свойства элемента преобразовывать электрическую энергию в другие виды энергии (световую, тепловую, механическую и др.); электродвижущая сила (ЭДС) E – параметр, указывающий на способность элемента создавать и поддер-

живать разность потенциалов на отдельных участках цепи, а также возбуждать и поддерживать электрический ток в замкнутой цепи.

Задачи, возникающие при расчетах электрических цепей, разнообразны. Чаще всего это определение напряжений, токов и мощностей элементов при заданных их параметрах.

При расчете электрических цепей необходимо знать не только значения ЭДС, токов и напряжений, но и их направления, т.к. последние определяют знаки слагаемых в расчетных выражениях.

Положительное направление тока – направление движения положительных зарядов.

Положительное направление напряжения между двумя точками электрической цепи – направление движения положительного заряда под действием сил электрического поля, т.е. от большего потенциала к меньшему.

Положительное направление ЭДС E – направление перемещения положительных зарядов под действием сил стороннего поля, т.е. от меньшего потенциала к большему.

Направление тока в источнике питания совпадает с ЭДС и противоположно направлению напряжения, а в приемнике энергии совпадает с напряжением.

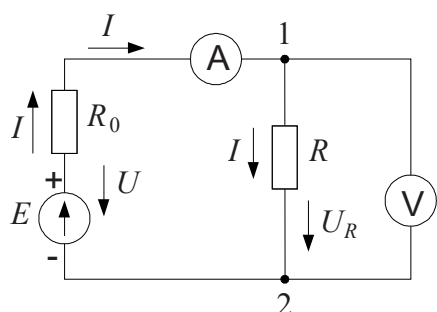


Рис. 2.2

Ток ветви измеряется амперметром, который включается последовательно, а напряжение на участке цепи – вольтметром, включаемым параллельно (рис. 2.2).

2.2. Расчет простых цепей постоянного тока

Простая электрическая цепь – цепь, содержащая один или несколько расположенных в одной ветви источников питания.

Расчет электрических цепей ведут с помощью основных законов: закона Ома и I и II законов Кирхгофа.

Согласно закону Ома, ток, протекающий по участку цепи, прямо пропорционален напряжению U на этом участке и обратно пропорционален сопротивлению R этого участка.

Закон Ома для электрической цепи (рис. 2.2) $I = E/(R_0 + R)$, а для

участка цепи 1–2 $I = U_r / R$, А; R_0 – внутреннее сопротивление источника питания.

Согласно I закону Кирхгофа (I ЗК), алгебраическая сумма токов ветвей узловой точки равна 0. $\sum_{k=1}^n I_k = 0$. Со знаком «+» принимают притекающие к узлу, со знаком «-» – вытекающие (можно наоборот) токи.

Так, для узловой точки (4) (рис. 2.1) запишем I ЗК: $I_1 - I_4 - I_3 = 0$. Или сумма притекающих к узлу токов равняется сумме вытекающих из узла $I_1 = I_4 + I_3$.

Согласно II закону Кирхгофа (II ЗК), в замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме напряжений на всех резистивных элементах контура:

$$\sum_{k=1}^m E_k = \sum_{k=1}^p U_k .$$

Так, для контура 1471 (рис. 2.1) запишем II ЗК: $E_1 - E_2 = I_1 R_1 + I_1 R_2 + I_3 R_3 - I_6 R_6$, ЭДС, напряжения и токи, направления которых совпадают с направлением обхода контура, например, по часовой стрелке, следует включать со знаком «+», а те, которые не совпадают с направлением обхода, – со знаком «-» (можно наоборот).

На рис. 2.3, 2.4, 2.5 показаны простые электрические цепи с последовательным (рис. 2.3), параллельным (рис. 2.4) и смешанным (рис. 2.5) соединением элементов и приведены расчеты эквивалентных сопротивлений, а также токов ветвей.

На этих схемах для упрощения расчета вместо источников ЭДС E указаны источники напряжения U .

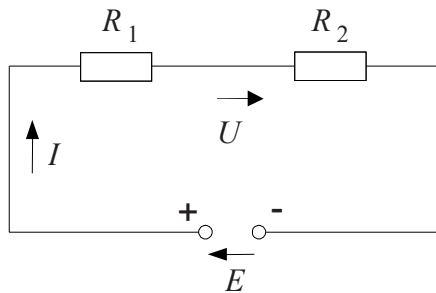


Рис. 2.3

$$I = U / R_{\text{экв.}}; R_{\text{экв.}} = R_1 + R_2$$

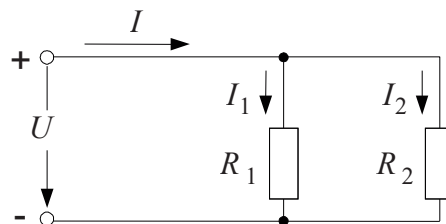


Рис. 2.4

$$I = U / R_{\text{экв.}}; R_{\text{экв.}} = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$$

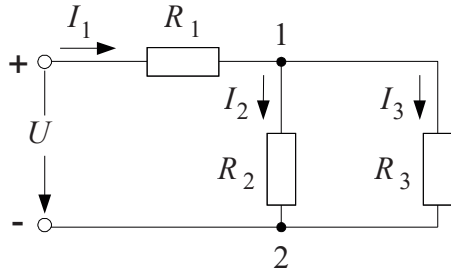


Рис. 2.5, а

$$I_1 = U / R_{\text{экв.}};$$

$$R_{\text{экв.}} = R_1 + R_{23} = R_1 + (R_2 \cdot R_3) / (R_2 + R_3)$$

$$R_{23} = (R_2 \cdot R_3) / (R_2 + R_3)$$

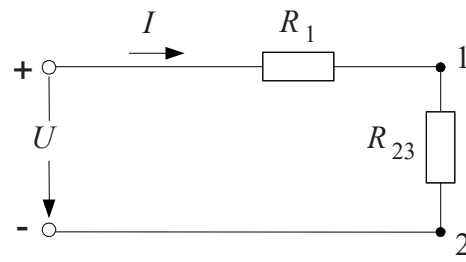


Рис. 2.5, б

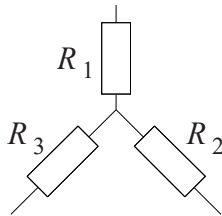
$$I_2 = U_{12} / R_2; I_3 = U_{12} / R_3, \text{ где}$$

$$U_{12} = I_1 R_{23} = U - U_{R_1} = U - I_1 R_1$$

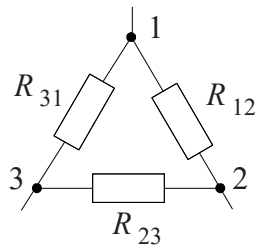
Таким образом, при расчете простых цепей для определения тока электрической цепи необходимо определить эквивалентное сопротивление цепи, а для определения тока ветви – напряжение ветви и ее сопротивление.

В цепи с одним источником направление тока всегда известно – от положительной клеммы источника питания. Как видим из приведенных схем, расчет простых цепей ведется методом «свертывания» (методом эквивалентных преобразований).

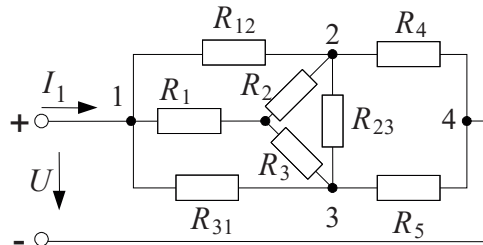
Часто встречаются схемы со сложным соединением элементов, которые нельзя отнести ни к последовательному, ни к параллельному соединению. К таким соединениям относятся звезда и треугольник (рис. 2.6, а, б).



а



б



в

Рис. 2.6

Для упрощения схемы (рис. 2.6, в) и приведения ее к схеме смешанного соединения достаточно преобразовать треугольник R_{12}, R_{23}, R_{31} в звезду R_1, R_2, R_3 , и схема примет вид, который показан на рис. 2.7.

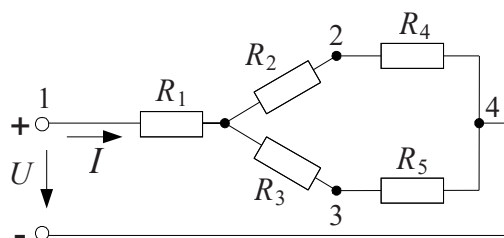


Рис. 2.7

$$R_1 = R_{12} \cdot R_{31} / (R_{12} + R_{23} + R_{31});$$

$$R_2 = R_{12} \cdot R_{23} / (R_{12} + R_{23} + R_{31});$$

$$R_3 = R_{23} \cdot R_{31} / (R_{12} + R_{23} + R_{31}).$$

Если же звезду R_{12}, R_{23}, R_4 преобразовать в треугольник R_{14}, R_{43}, R'_{31} , то схема примет вид (рис. 2.8)

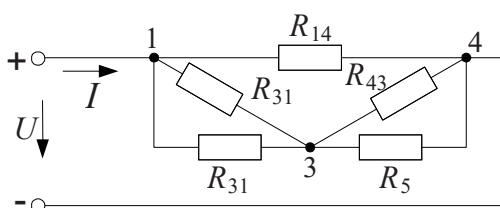


Рис. 2.8

$$R_{14} = R_{12} + R_4 + (R_{12} \cdot R_4) / R_{23};$$

$$R_{43} = R_4 + R_{23} + (R_4 \cdot R_{23}) / R_{12};$$

$$R'_{31} = R_{12} + R_{23} + (R_{12} \cdot R_{23}) / R_4.$$

Тогда $R_{экв.}$ для схемы на рис. 2.7 будет

$$R_{экв} = R_1 + \{[(R_2 + R_4) \cdot (R_3 + R_5)] / [(R_2 + R_4) + (R_3 + R_5)]\}$$

Искомый ток $I = U / R_{экв}$

2.3. Расчет сложных электрических цепей

Сложные цепи содержат несколько источников питания, расположенных в различных контурах. Для расчета сложных цепей применяют методы законов Кирхгофа, контурных токов, наложения, эквивалентного генератора, междуузловое напряжения, узловых потенциалов. Рассмотрим некоторые из них.

2.3.1. Метод законов Кирхгофа. Составляются уравнения по I ЗК и II ЗК. Методика расчета следующая:

- 1) задаются произвольными направлениями токов в ветвях (токов столько, сколько ветвей);
- 2) задают направления обхода контуров (по направлению движения часовой стрелки или наоборот);
- 3) определяют число узловых точек (n) и число ветвей (m);
- 4) составляют уравнения по I ЗК для $(n-1)$ узловых точек;
- 5) недостающее число уравнений $m - (n-1)$ составляют по II ЗК для контуров.

Так, для электрической схемы на рис. 2.1, имеющей 4 узловых точки, 6 ветвей, составим уравнения по I ЗК и II ЗК, задавшись произвольным направлением токов в ветвях и направлением обхода контуров по часовой стрелке.

Составляем уравнения по I ЗК для 3 узловых точек – 4, 6, 7.

$$(\cdot)4; I_1 - I_3 - I_4 = 0; (\cdot)6 I_4 - I_5 + I_7 = 0; (\cdot)7 I_5 + I_3 + I_6 = 0.$$

Вычисляем $m - (n - 1) = 6 - (4 - 1) = 3$.

Составляем уравнения по II ЗК для трех контуров:

$$(1471): E_1 - E_2 = (R_1 + R_2)I_1 + R_3I_3 - R_6I_6;$$

$$(7467): E_2 + E_3 = -R_3I_3 + R_4I_4 + R_5I_5; (1761): 0 = R_6I_6 - R_5I_5 - R_7I_7.$$

Совместное решение 6-ти уравнений дает возможность определить токи 6-ти ветвей. Следует обратить внимание на знаки полученных токов. Если ток получен со знаком «-», это значит, что положительное направление тока обратно принятому произвольно.

2.3.2. Метод наложения. Данный метод дает возможность свести расчет сложной цепи с несколькими источниками питания к нескольким расчетам этой же цепи с одним источником питания.

Расчет ведут в следующей последовательности:

1) поочередно рассчитывают токи ветвей от действия одной ЭДС, считая все остальные ЭДС равными нулю и оставляя их внутреннее сопротивление R_0 .

2) пункт 1 повторяется столько раз, сколько ЭДС в цепи.

3) определяют действительные токи ветвей, алгебраически суммируя токи, вызываемые в ветви каждой ЭДС в отдельности.

Так, для схемы рис. 2.9 определение токов ведем в следующей последовательности: оставляем источник питания E_1 ; $E_2 = 0$ (рис. 2.10). R_2, R_3, R_4 включены параллельно. Тогда

$$R_{2,3,4} = R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 / R_2R_3 + R_3R_4 + R_2R_4, \quad R'_{\text{экв.}} = R_1 + R_{2,3,4}.$$

$$\text{Ток } I'_1 = E_1 / R'_{\text{экв.}};$$

$$U'_{12} = R_{2,3,4} \cdot I'_1; \quad I'_2 = U'_{12} / R_2;$$

$$I'_3 = U'_{12} / R_3; \quad I'_4 = U'_{12} / R_4.$$

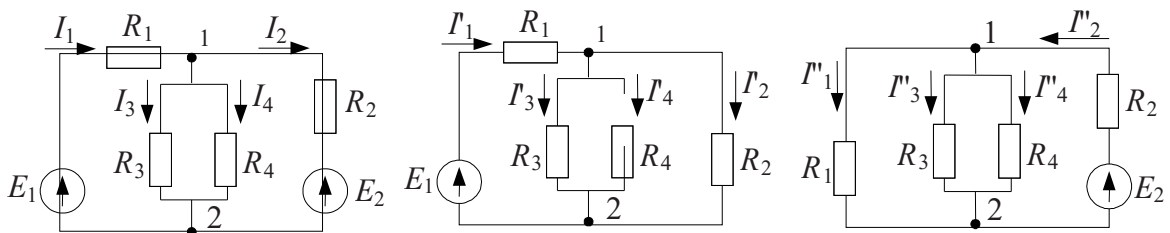


Рис. 2.9

Рис. 2.10

Рис. 2.11

Далее определяем токи от E_2 , полагая, что $E_1 = 0$ (рис. 2.11).

$$R_{1,3,4} = R_1 \cdot R_3 \cdot R_4 / R_1 R_3 + R_3 R_4 + R_1 R_4;$$

$$R''_{\text{экв.}} = R_2 + R_{1,3,4};$$

$$I_2'' = E_2 / R''_{\text{экв.}};$$

$$U_{12}'' = R_{1,3,4} \cdot I_2'';$$

$$I_1'' = U_{12}'' / R_1;$$

$$I_3'' = U_{12}'' / R_3; I_4'' = U_{12}'' / R_4.$$

Действительные токи ветвей:

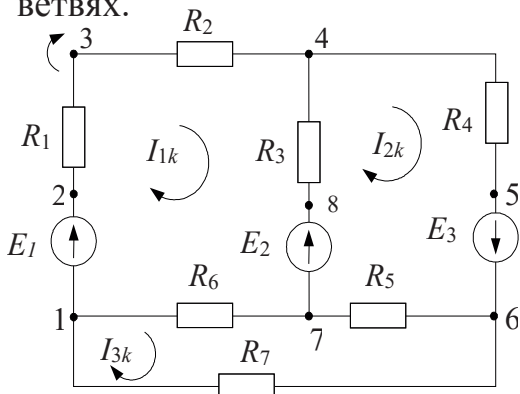
$$I_1 = I_1' - I_1''; I_2 = I_2' - I_2''; I_3 = I_3' - I_3''; I_4 = I_4' - I_4''.$$

Направление токов I_1 и I_2 – направление большего тока I' или I'' . На рис. 2.9 показаны направления тока I_1 при условии $I_1' > I_1''$, а I_2 при $I_2' > I_2''$.

2.3.3. Метод контурных токов. Этот метод значительно упрощает расчет благодаря уменьшению количества уравнений.

Исходя из принципа наложения, метод заключается в следующем: предполагают, что в каждом независимом контуре протекает свой ток – контурный; тогда ток внешней ветви будет равен контурному току, а ток смежной ветви, общей для двух контуров, – алгебраической сумме контурных токов.

Зададимся направлением обхода контуров и направлениями контурных токов (по или против движения часовой стрелки) на рис. 2.12. Для независимых контуров (1471, 7467, 1761) составим уравнения по ПЗК с учетом следующего: 1) произведение суммы сопротивлений контура на свой контурный ток берем со знаком «+», 2) произведение же сопротивления смежной ветви на контурный ток смежного контура – со знаком «-», так как направление обхода тока I_{2k} в этой ветви противоположно направлению тока I_{1k} . Аналогично и в других смежных ветвях.



$$E_2 + E_3 = (R_3 + R_4 + R_5)I_{2k} - R_3I_{1k} - R_5I_{3k}$$

$$E_1 - E_2 = (R_1 + R_2 + R_3 + R_6)I_{1k} - R_3I_{2k} - R_6I_{3k}$$

$$0 = (R_5 + R_6 + R_7)I_{3k} - R_6I_{1k} - R_5I_{2k}$$

Совместное решение 3 уравнений

дает возможность определить контурные токи. Тогда ток $I_1 = I_{1k}$;

$$I_3 = I_{2k}; I_6 = I_{k3}; I_2 = |I_{1k} - I_{2k}|;$$

$$I_4 = |I_{k2} - I_{k3}|; I_5 = |I_{1k} - I_{3k}|.$$

Рис. 2.12

Если какой-либо контурный ток получится со знаком «(-)», то направление действительного тока внешней ветви этого контура будет противоположно контурному. Действительное направление тока смежной ветви определяется по наибольшему контурному току, протекающему по этой ветви. Если значение наибольшего контурного тока отрицательно, то действительное направление тока смежной ветви противоположно этому контурному току. После определения токов ветвей их действительные направления наносятся на схеме цепи (рис. 2.12).

2.3.4. Метод эквивалентного генератора. Данный метод применим для определения тока одной ветви, например тока I_7 в ветви 1–6 (рис. 2.13).

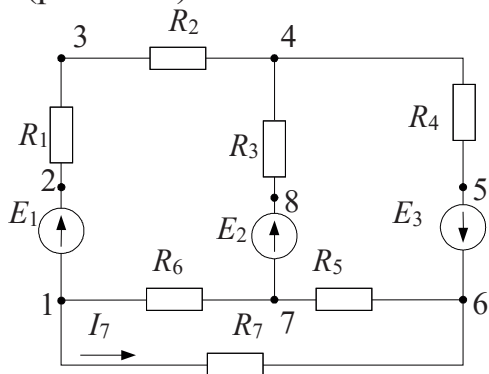
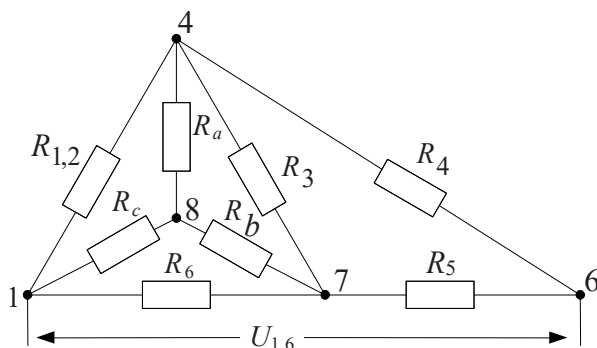


Рис. 2.13

Сущность этого метода заключается в том, что по отношению к исследуемой ветви остальная сложная цепь заменяется эквивалентным генератором с ЭДС $E_{эkv}$ и внутренним сопротивлением $R_{эkv}$.

Для определения этих параметров исследуемая ветвь 1–6 размыкается, а оставшаяся цепь рассчитывается любым известным методом с целью определения токов I_5 и I_6 .

Тогда $E_{эkv} = U_{16} = R_6 I_6 \pm R_5 I_5$. Для определения $R_{эkv}$ закоротим все источники питания и рассчитаем эквивалентное сопротивление оставшейся цепи относительно точек 1–6. Поскольку цепь содержит треугольник 1, 4, 7, то для перехода к смешанному соединению преобразуем его в звезду (рис. 2.14).



13

Тогда

$$R_a = R_{12} \cdot R_3 / (R_{12} + R_3 + R_6);$$

$$R_b = R_3 \cdot R_6 / (R_{12} + R_3 + R_6);$$

$$R_c = R_{12} \cdot R_6 / (R_{12} + R_3 + R_6);$$

$$R_{12} = R_1 + R_2.$$

Получив схему рис. 2.15, определим эквивалентное сопротивление двухполюсника между точками 1–6.

$$R_{a4} = R_a + R_4; R_{b5} = R_b + R_5;$$

$$R_{эkv} = R_c + R_{a4} \cdot R_{b5} / (R_{a4} + R_{b5}).$$

Определяем ток ветви 1–6,

$$I_7 = E_{эkv} / (R_{эkv} + R_7).$$

Рис. 2.14

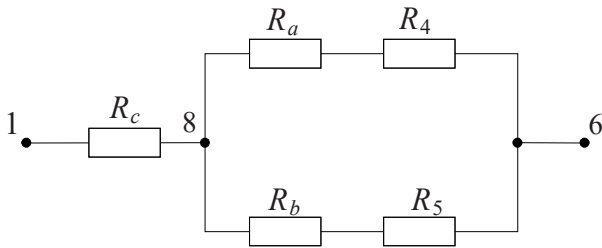


Рис. 2.15

2.3.5. Метод междуузлового напряжения. Метод междуузлового напряжения целесообразно применять для расчета электрических цепей, имеющих несколько параллельных ветвей, сходящихся в двух узловых точках (рис. 2.16).

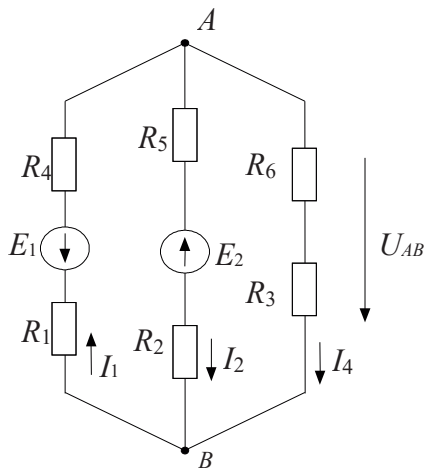


Рис. 2.16

Направление междуузлового напряжения U_{AB} выбираем произвольно, например от A к B . Также произвольно выбираем направление токов в ветвях, например, в активных – совпадающими с ЭДС, а в пассивных – совпадающими с напряжением U_{AB} .

Тогда $I_1 = (E_1 - U_{AB}) / (R_1 + R_4) = (E_1 - U_{AB}) G_1$; $G_1 = 1 / (R_1 + R_4)$;

$I_2 = (E_2 + U_{AB}) / (R_2 + R_5) = (E_2 + U_{AB}) G_2$; $G_2 = 1 / (R_2 + R_5)$;

$I_3 = U_{AB} / (R_3 + R_6) = U_{AB} \cdot G_3$; $G_3 = 1 / (R_3 + R_6)$.

Междуузловое напряжение U_{AB} определяется по формуле

$$U_{AB} = \frac{\sum_1^n E_k G_k}{\sum_1^n G_k} = (E_1 G_1 - E_2 G_2) / (G_1 + G_2 + G_3).$$

При совпадении направлений ЭДС и междуузлового напряжения произведение этой ЭДС на проводимость следует брать со знаком «-».

Если токи ветвей получатся со знаком «-», значит выбранные произвольно направления токов не соответствуют действительным.

2.3.6. Баланс мощностей. Правильность расчета электрической цепи проверяется составлением баланса мощностей.

Согласно закону Джоуля–Ленца, для пассивных участков цепи постоянного тока потребляемая энергия

$$W = UI t$$

где U – напряжение на пассивном участке; I – ток; t – время.

$$\text{Мощность } P = W / t = UI = I^2 R.$$

Мощность, вырабатываемая источником ЭДС, $P_{\text{ист}} = EI$. В электрической цепи всегда сохраняется баланс мощностей: мощность, выработанная источником питания, равна мощности, потребленной приемниками электрической энергии.

Для схемы (рис. 2.1)

$$E_1 I_1 - E_2 I_3 + E_3 I_4 = (R_1 + R_2) I_1^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2 + R_6 I_6^2 + R_7 I_7^2.$$

Следует обратить внимание на направление тока и ЭДС источника питания: если направления тока и ЭДС совпадают, то их произведение учитывается со знаком «+» (источник питания), а если не совпадают – со знаком «-» (фактически приемник электрической энергии).

2.3.7. Потенциальная диаграмма – график распределения потенциала в цепи в функции сопротивления участков цепи $\varphi = f(R)$.

Построим потенциальную диаграмму (рис. 2.17) для внешнего контура 1 234 561 цепи рис. 2.1.

Примем потенциал точки 1 равным 0.

Тогда

$$\varphi_1 = 0; \quad \varphi_2 = \varphi_1 + E_1; \quad \varphi_3 = \varphi_2 - R_1 I_1;$$

$$\varphi_4 = \varphi_3 - R_2 I_1; \quad \varphi_5 = \varphi_4 - R_4 I_4;$$

$$\varphi_6 = \varphi_5 + E_3; \quad \varphi_1 = \varphi_6 + R_7 I_7 = 0.$$

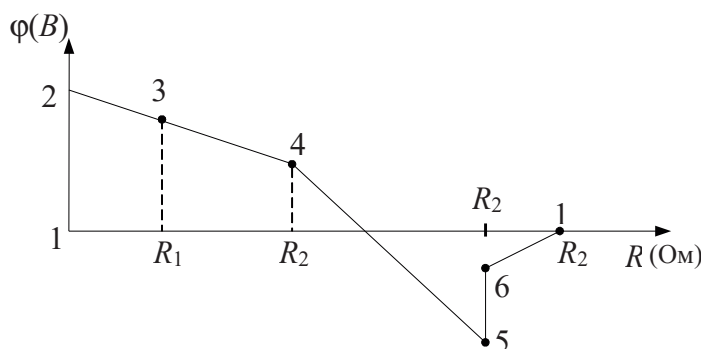


Рис. 2.17

2.4. Вопросы для самопроверки

1. Сколько ветвей, узловых точек, независимых контуров в схеме 2.14?

2. В электрической схеме следующие ветви с обозначением начала ветви и ее конца: 1–2; 2–3; 3–4; 4–5; 5–6; 7–1; 1–6; 4–8; 8–7. Сколько узловых точек в электрической схеме? Как вы определили количество узловых точек схемы?

3. В электрической схеме рис. 2.14 укажите направление токов.

4. Запишите закон Ома для участка электрической цепи рис. 2.18.

5. Вычертите схему электрической цепи с одним источником питания и двумя последовательно соединенными резисторами.

Напишите закон Ома для всей цепи и для участков цепи с одним резистором.

6. Сформулируйте законы Кирхгофа и напишите их математические выражения.

7. Напишите для контура, содержащего только пассивные элементы, уравнения по II ЗК.

8. Записать I ЗК для узловых точек и II ЗК для контуров рис. 2.9, 2.10.

9. Даны три резистора R_1, R_2, R_3 , каждый по 2 Ом, источник питания постоянного напряжения $U = 25\text{В}$. Вычертить электрические схемы при: а) последовательном; б) параллельном соединении R_1, R_2, R_3 ; в) R_2 и R_3 – параллельном и R_1 последовательно с ними; определить токи ветвей и падения напряжения на резисторах.

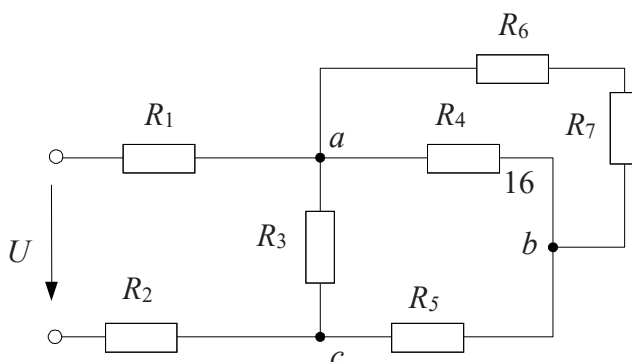
10. Два резистора R_1 и R_2 соединены параллельно. Ток в неразветвленной части в цепи равен I . Вычертить электрическую схему и вывести выражения для токов I_1 и I_2 через ток I и сопротивления R_1 и R_2 .

11. Для схемы задачи 5 $R_1 = 5\text{ Ом}$; $R_2 = 4\text{ Ом}$; показание вольтметра – 20 В. Определить входное напряжение.

12. Показание ваттметра $P = 20\text{ Вт}$. Сопротивление $R_1 = 5\text{ Ом}$, $R_2 = 3\text{ Ом}$. Определить ток в цепи.

13. Определить мощность электрической цепи рис. 3,4, если $R_1 = 5\text{ Ом}$; $R_2 = 10\text{ Ом}$, напряжение источника питания $U = 30\text{В}$.

14. Определить токи цепи, если



$$\begin{aligned}
 U &= 120\text{ В}; \\
 R_1 &= R_2 = 0,5\text{ Ом}; \\
 R_3 &= R_4 = 6\text{ Ом}; \\
 R_5 &= R_6 = 1\text{ Ом}; \\
 R_7 &= 2\text{ Ом}.
 \end{aligned}$$

Рис. 2.18

Показать направление токов в ветвях.

15. В электрическую цепь рис. 2.9 включить амперметры для измерения токов ветвей и вольтметр для измерения напряжения на резисторах R_3 и R_4 .

16. Как производится расчет цепи по методу наложения?

17. Изложите методику расчета цепи методом контурных токов.

18. Как рассчитать ток ветви методом эквивалентного генератора?

19. Напишите выражение баланса мощностей для цепи с несколькими резисторами.

20. В цепи действует несколько элементов с параметром E . Некоторые из них работают в режиме генератора, а остальные в режиме потребителя. По какому признаку определяется режим работы тех и других элементов?

21. Составить баланс мощностей для электрической цепи задачи 6.

22. Для электрической схемы рис. 2.9 постройте потенциальную диаграмму для внешнего контура.

2.5. Задачи

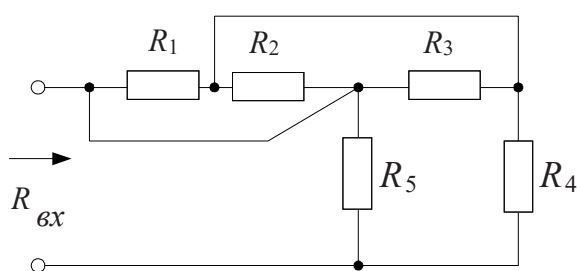
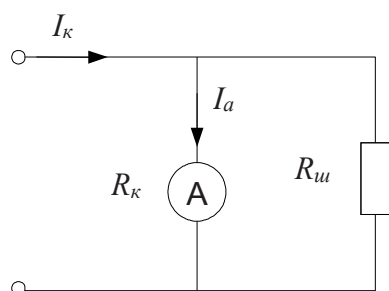


Рис. 2.19



2.5.1. Определить входное сопротивление цепи, если

$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 6 \text{ Ом}$,

$R_5 = 8 \text{ Ом}$.

Ответ: $R_{ex} = 4 \text{ Ом}$.

2.5.2. Внутреннее сопротивление R_k катушки амперметра равно 19 Ом . Ток I_a полного отклонения стрелки прибора равен

17 50 мА . Рассчитать сопротивление R_u шунта, подключение которого расширяет предел измеряемого тока I_k до 1) 1 А ; 2) 3 А .

Ответ: 1) $X_C = 1 \text{ Ом}$, 2) $R_u = 0,322 \text{ Ом}$.

Рис. 2.20

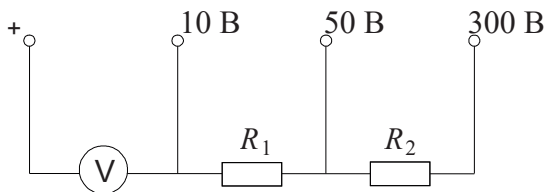


Рис. 2.21

ные сопротивления R_1 , R_2 , подключение которых расширит пределы измеряемого напряжения до 50 и 300 В.

Ответ: $R_1 = 2 \text{ кОм}$, $R_2 = 27 \text{ Ом}$.

2.5.3. При номинальном напряжении 10 В ток полного отклонения стрелки вольтметра равен 10 мА. Определить доба-

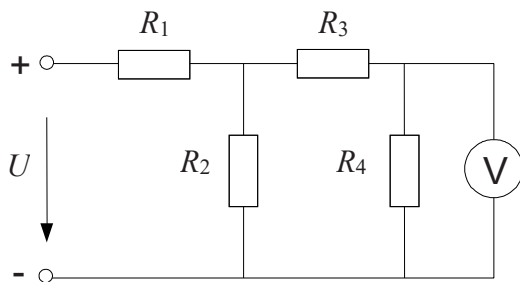


Рис. 2.22

2.5.4. $R_1 = 20 \text{ Ом}$, $R_2 = 10 \text{ Ом}$, $R_3 = 8 \text{ Ом}$, $R_4 = 12 \text{ Ом}$.

Определите входное напряжение U при показании вольтметра 60 В.

Ответ: $U = 400 \text{ В}$.

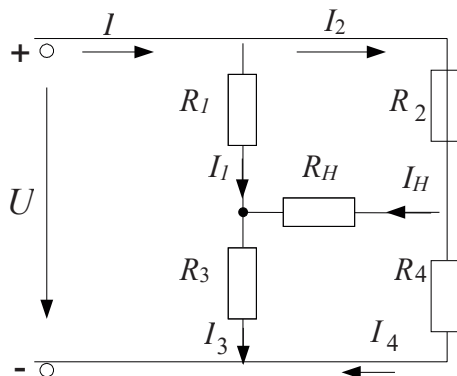


Рис. 2.23

2.5.5. $U = 100 \text{ В}$, $R_1 = R_4 = 15 \text{ Ом}$, $R_2 = R_4 = 10 \text{ Ом}$, $R_H = 8 \text{ Ом}$. Методом эквивалентного генератора рассчитать ток I_H . Остальные токи найти с помощью законов Кирхгофа. Проверить баланс мощностей.

Ответ: $I_H = 1 \text{ А}$, $I_1 = I_4 = 3,6 \text{ А}$,
 $I_2 = 1,4 \text{ А}$, $I_3 = 0,2 \text{ А}$, $P = 920 \text{ Вт}$

3. ОДНОФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

3.1. Общие сведения

В линейных электрических цепях синусоидального тока ЭДС напряжения и токи изменяются во времени по синусоидальному закону, например,

$$e = E_m \sin(\omega t \pm \Psi_e), u = U_m \sin(\omega t \pm \Psi_u), i = I_m \sin(\omega t \pm \Psi_i),$$

где e, u, i – мгновенные значения синусоидальных величин в рассматриваемый момент времени t ;

E_m, U_m, I_m – максимальные мгновенные значения, так называемые амплитуды;

$(\omega t \pm \Psi)$ – фаза (фазовый угол), аргумент синусоидальной величины;

Ψ – начальная фаза в момент времени $t = 0$;

ω – угловая частота, $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$, рад/с.

f – частота – число полных колебаний периодической величины в течение одной секунды, $f = 1/T$, Гц, где T – период, время одного полного колебания синусоидальной величины.

Для количественной оценки синусоидального тока используют значение эквивалентного ему постоянного тока, так называемое действующее значение,

$$I = I_m / \sqrt{2};$$

$$U = U_m / \sqrt{2};$$

$$E = E_m / \sqrt{2}.$$

Амперметры и вольтметры показывают действующие значения токов и напряжений.

На рис. 3.1 приведены временные диаграммы синусоидальных величин:

$$u = U_m \sin(\omega t + \Psi_u) \text{ и } i = I_m \sin(\omega t - \Psi_i).$$

На временных диаграммах начальная фаза – это угол между началом координат и началом положительной полуволны. Положительная начальная фаза откладывается влево от начала координат, а отрицательная – вправо. Знак начальной фазы определяется знаком мгновенного значения при $t = 0$.

$$+ u_0 = U_m \sin \psi_u, - i_0 = I_m \sin(-\psi_i).$$

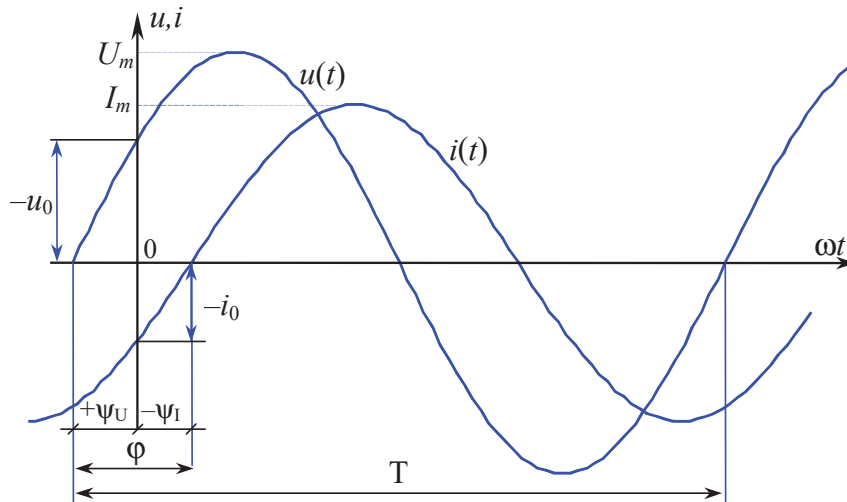


Рис. 3.1

φ – сдвиг фаз, разность фаз двух синусоидальных величин.

$$\varphi = (\omega t + \psi_u) - (\omega t - \psi_i) = \psi_u + \psi_i.$$

3.2. Комплексный метод расчета электрических цепей синусоидального тока

Наиболее простым и точным методом расчета электрических цепей синусоидального тока является комплексный метод, основанный на теории комплексных чисел.

Синусоидальная величина изображается вращающимся вектором на комплексной плоскости с осями ± 1 и $\pm j$, где $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица, символ.

За положительное направление вращения вектора принято направление против часовой стрелки. За время, равное одному периоду, вектор совершает один оборот.

На рис. 3.2 изображен вектор комплексного тока \dot{I} , которому соответствует комплексное число

$$\dot{I} = I e^{+j\psi_i},$$

где I – модуль действующего значения тока, равный длине вектора; ψ_i – аргумент тока, равный начальной фазе, т.е. угол между вектором и действительной полуосью $+1$ при $t = 0$.

Аргумент положительный, если вектор отложен в направлении против часовой стрелки, и отрицательный – если по часовой.

$$I = \sqrt{(I')^2 + (I'')^2},$$

где $I' = I \cos \psi_i$ – действительная составляющая;

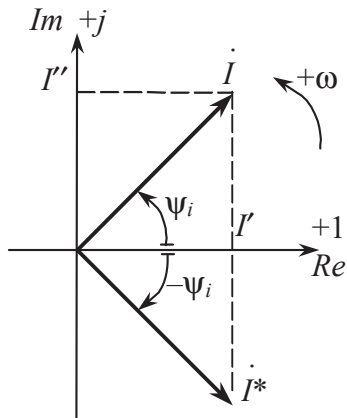


Рис. 3.2

$I'' = I \sin \psi_i$ – мнимая составляющая;

$$\psi_i = \arctg (I'' / I').$$

Комплексные значения синусоидальных величин обозначают $\dot{I}, \dot{U}, \dot{E}$, несинусоидальных – $\underline{z}, \underline{s}$.

Над комплексными числами можно производить все алгебраические действия (при сложении и вычитании удобнее использовать алгебраическую форму, а при умножении, делении, возведении в степень, извлечении корня – показательную).

Переход из одной формы записи в другую осуществляется по формуле Эйлера через тригонометрическую форму записи $e^{\pm j\alpha} = \cos \alpha \pm j \sin \alpha$.

Например: $\dot{I} = 10 e^{j37^\circ} = 10 \cos 37^\circ + j10 \sin 37^\circ = 10 \times 0,8 + j10 \times 0,6 = 8 + j6 = (8^2 + 6^2)^{1/2} e^{+j \arctg 6/8} = 10 e^{+j37^\circ}$, А.

Поскольку $e^{\pm j 90^\circ} = \cos 90^\circ \pm j \sin 90^\circ = \pm j$, то умножение комплексного числа на $+j$ приводит к увеличению его аргумента на 90° и повороту вектора на 90° против часовой стрелки (в положительном направлении), умножение на $(-j)$ – к уменьшению аргумента на 90° и повороту вектора на 90° в отрицательном направлении (по часовой стрелке).

При работе с комплексными числами используют и сопряженные комплексные величины, имеющие одинаковые модули и одинаковые по величине, но противоположные по знаку аргументы:

$$\dot{I} = 10 e^{j37^\circ}, \text{ А} \quad \text{и} \quad I^* = 10 e^{-j37^\circ}, \text{ А.}$$

$$\text{Произведение } \dot{I} \cdot I^* = 10 e^{j37^\circ} \cdot 10 e^{-j37^\circ} = 100 e^{j0^\circ} = P^2, \text{ А.}$$

3.3. Пассивные элементы в цепи синусоидального тока

Для упрощения расчета электрической цепи синусоидального тока реальную цепь заменяют схемой замещения, составленной из так называемых идеальных элементов: резистивный элемент с активным сопротивлением R (Ом) или активной проводимостью $G = 1/R$, (См); индуктивный элемент с индуктивностью L (Гн) и реактивным индуктивным сопротивлением $X_L = 2\pi fL$ (Ом) или реактивной индуктивной проводимостью $B_L = 1/X_L$ (см); емкостный элемент с емкостью C , (Φ) и

реактивным емкостным сопротивлением $X_C = 1/2\pi fC$ (Ом) или реактивной емкостной проводимостью $B_C = 1/X_C$ (см).

Полное сопротивление электрической цепи при последовательном соединении R -, L -, C -элементов:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} - \text{модуль полного сопротивления};$$

$$\varphi = \arctg (X_L - X_C)/R - \text{аргумент полного сопротивления.}$$

Тогда комплексное полное сопротивление:

$$\underline{Z} = Ze^{j\varphi} = Z \cos \varphi + jZ \sin \varphi = R + j(X_L - X_C), \text{ Ом};$$

$$X_L - X_C = X - \text{реактивное сопротивление.}$$

3.4. Законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме

Закон Ома для участка цепи $\dot{I} = \dot{U} / \underline{Z} = \dot{U} \underline{Y}$, $\underline{Y} = 1/\underline{Z} = \dot{I} / \dot{U} = G - jB_L + jB_C$ – комплексная полная проводимость.

Первый закон Кирхгофа: $\sum \dot{I}_k = 0$, где \dot{I}_k – токи, сходящиеся в одном узле.

Второй закон Кирхгофа: $\sum \dot{U}_k = \sum \underline{Z}_k \dot{I}_k$, где \dot{U}_k – напряжения источников питания, расположенных в контуре, а \underline{Z}_k и \dot{I}_k – сопротивления и токи отдельных приемников энергии, расположенных в этом контуре.

3.5. Мощность однофазной цепи синусоидального тока

Активная мощность однофазной цепи:

$$P = UI \cos \varphi = I^2 R = U^2 G \text{ (Вт, кВт).}$$

Реактивная мощность: $Q = UI \sin \varphi = I^2 X = U^2 B$, (вар, квар), где $X = X_L - X_C$ – реактивное сопротивление; $B = B_L - B_C$ – реактивная проводимость; $Q = Q_L - Q_C$, где Q_L – индуктивная мощность, Q_C – емкостная мощность, Q – реактивная мощность.

Полная мощность: $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = I^2 Z = U^2 Y$, (ВА, кВА) – модуль, где $Y = \sqrt{G^2 + B^2}$, (См) – модуль полной проводимости; G – активная проводимость, B – реактивная проводимость.

Комплексная полная мощность: $\underline{S} = Se^{j\varphi} = \dot{U} \dot{I}^* = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ = P + j(Q_L - Q_C) = P + jQ_L - jQ_C$.

Важным технико-экономическим показателем является коэффициент мощности ($\cos \varphi$), так как от него зависит величина тока при неизменной активной мощности приемника за счет снижения реактивной.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}; I = \frac{P}{U \cos \varphi}.$$

3.6. Методы расчета однофазных цепей синусоидального тока

При расчете цепей синусоидального тока (и простых, и сложных) все законы и методы расчета цепей постоянного тока действительны при условии, что все величины сопротивлений, напряжений и токов выражены в комплексных числах.

Простую цепь синусоидального тока можно рассчитать и в модулях методом проводимостей.

Например, расчет цепи (рис. 3.3).

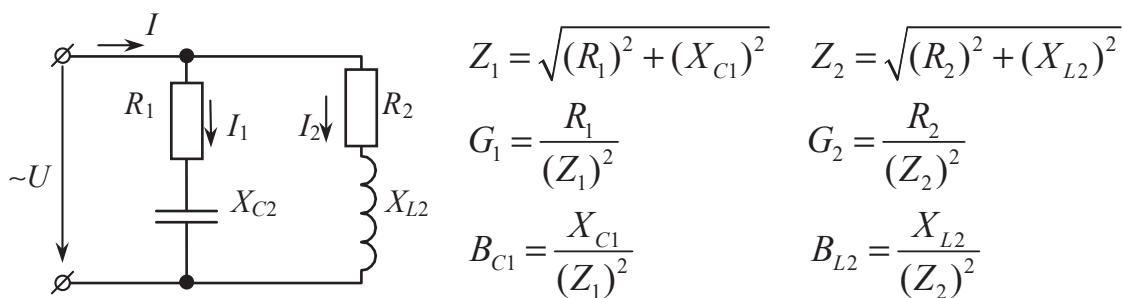


Рис. 3.3

$$Y_{\text{эkv.}} = \sqrt{(G_1 + G_2)^2 + (B_{C1} - B_{L2})^2};$$

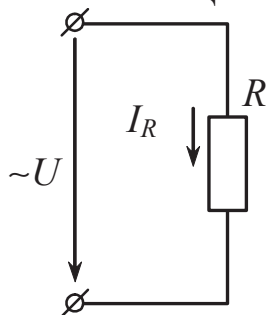
$$Z_{\text{эkv.}} = 1/Y_{\text{эkv.}};$$

$$I = U/Z_{\text{эkv.}} = UY_{\text{эkv.}};$$

$$I_1 = U/Z_1; I_2 = U/Z_2.$$

3.7. Анализ простых однофазных электрических цепей синусоидального тока

3.7.1. Цепь с резистивным элементом. Напряжение источника



питания $\dot{U} = Ue^{j\psi_u}$, $\psi_u = 0^\circ$. Полное сопротивление $\underline{Z}_R = \underline{R} = Re^{j0^\circ} = R$. Ток цепи $\dot{I}_R = \dot{U} / \underline{Z}_R = U/R$. Мощность цепи $S = P = RI^2$, $Q = 0$. Коэффициент мощности $\cos \varphi = P/S = 1$, $\varphi = 0^\circ$.

Рис. 3.4

Векторная диаграмма

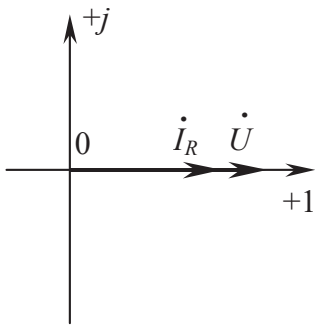


Рис. 3.5

$$\dot{U} = Ue^{j0}, \psi_u = 0^\circ;$$

$$\dot{I} = Ie^{j0}; \psi_i = 0^\circ.$$

Волновая диаграмма

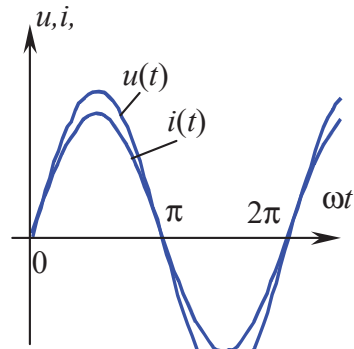


Рис. 3.6

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

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = I_m \sin \omega t.$$

3.7.2. Цепь с идеальной индуктивностью. Напряжение на

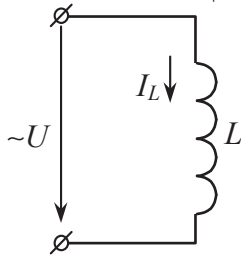


Рис. 3.7

источнике питания $\dot{U} = Ue^{j\psi_u}$, $\psi_u = 0^\circ$. Комплексное сопротивление цепи $\underline{Z}_L = jX_L = X_L e^{+j90^\circ}$, $X_L = 2\pi fL$, $R = 0$, $\varphi = \arctg(X_L/R) = 90^\circ$, $X_L/0 = \infty$, $\arctg \infty = 90^\circ$. Ток цепи $\dot{I}_L = \dot{U} / \underline{Z}_L = Ue^{j0} / X_L e^{+j90^\circ} = (U/X_L) e^{-j90^\circ} = I_L e^{-j90^\circ}$. Мощность цепи $S = Q_L = X_L I_L^2$, $P = 0$. Коэффициент мощности $\cos \varphi = 0$, $\varphi = +90^\circ$.

Векторная диаграмма

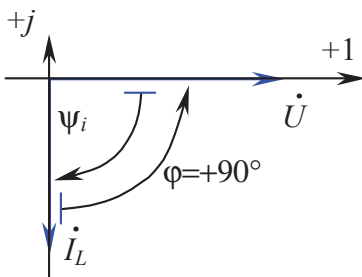


Рис. 3.8

$$\dot{U} = Ue^{j0}; \psi_u = 0^\circ;$$

$$\varphi = +90^\circ;$$

$$\dot{I}_L = I_L e^{-j90^\circ};$$

$$\psi_i = -90^\circ.$$

Волновая диаграмма

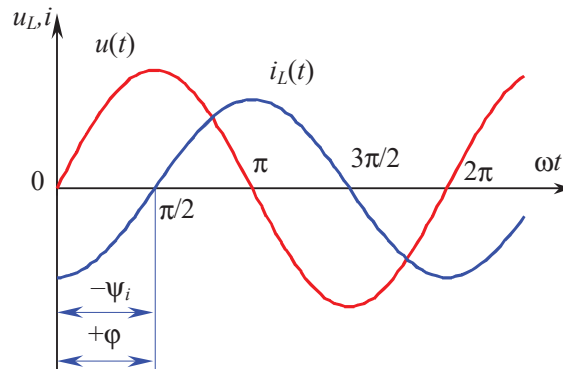


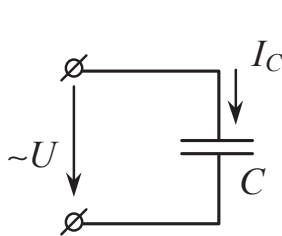
Рис. 3.9

$$i = I_m \sin(\omega t - \psi_i) = I_m \sin(\omega t - 90^\circ);$$

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

Угол φ всегда отсчитывается от вектора тока к вектору напряжения, при этом φ положительный, если он откладывается против часовой стрелки, и отрицательный – если по часовой.

3.7.3. Цепь с емкостным элементом. Напряжение источника питания $\dot{U} = Ue^{j0}$, $\psi_u = 0^\circ$. Комплексное сопротивление цепи



$$\underline{Z}_c = -jX_C = X_C e^{-j90^\circ}, X_C = 1/(2\pi fC).$$

Ток цепи

$$\dot{I}_C = \dot{U} / \underline{Z}_c = Ue^{j0} / X_C e^{-j90^\circ} = (U/X_C) e^{+j90^\circ} = I_C e^{+j90^\circ}.$$

$$\text{Мощность цепи } S = Q_C = X_C I_C^2, P = 0.$$

$$\text{Коэффициент мощности } \cos \varphi = 0, \varphi = -90^\circ.$$

Рис. 3.10

Векторная диаграмма

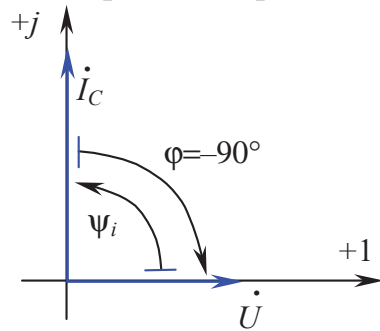


Рис. 3.11

Волновая диаграмма

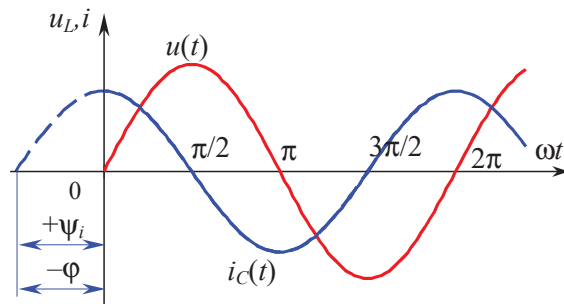


Рис.3.12

$$\dot{U} = Ue^{j0}, \psi_u = 0^\circ;$$

$$\dot{I}_c = I_c e^{-j90^\circ}, \psi_i = +90^\circ.$$

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

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = I_m \sin(\omega t + 90^\circ).$$

3.7.4. Цепь с последовательным соединением резистивного и индуктивного элементов. Напряжение источника питания $\dot{U} = Ue^{j0}$, $\psi_u = 0^\circ$.

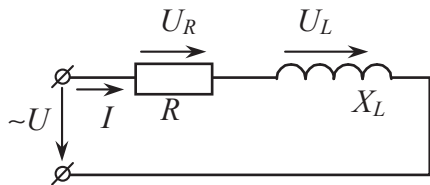


Рис. 3.13

Комплексное сопротивление цепи

$$\underline{Z}_{\text{э.кв.}} = R + jX_L =$$

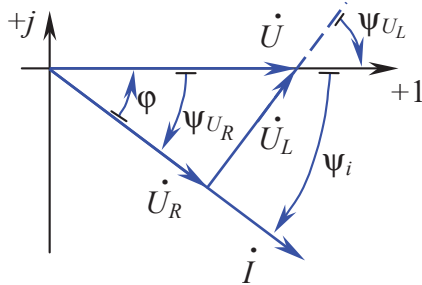
$$= \sqrt{R^2 + X_L^2} \cdot e^{j\varphi} = Z_{\text{э.кв.}} e^{j\varphi}.$$

$$\text{Ток цепи } \dot{I} = \dot{U} / \underline{Z}_{\text{э.кв.}} = Ue^{j0} / Z_{\text{э.кв.}} e^{+j\varphi} = (U/Z_{\text{э.кв.}}) e^{j(0-\varphi)} = I e^{+j\psi_i}, \psi_i = -\varphi.$$

$$\text{Напряжения участков цепи } \dot{U}_R = R \dot{I}; \dot{U}_L = +jX_L \dot{I} = X_L e^{+j90^\circ} \dot{I}.$$

Мощность цепи $\underline{S} = \dot{U} I^* = U e^{j0} \cdot I e^{-j\psi_i} = UI e^{j(-\psi_i)} = S e^{j\varphi} =$
 $= S \cos \varphi + j S \sin \varphi = P + j Q_L$; $P = S \cos \varphi = RI^2$; $Q_L = S \sin \varphi = X_L I^2$.
 Коэффициент мощности $\cos \varphi = P/S$.

Векторная диаграмма (рис. 3.14)



$$\begin{aligned} \dot{U} &= U e^{j0}, \psi_u = 0^\circ; \\ \dot{I} &= I e^{+j\psi_i}, \dot{U}_R = U_R e^{+j\psi_i}; \\ \dot{U}_L &= U_L e^{+j\psi_{UL}}; \\ \varphi &= \psi_u - \psi_i = -\psi_i. \end{aligned}$$

Рис. 3.14

3.7.5. Цепь с последовательным соединением резистивного и емкостного элементов. Напряжение источника питания

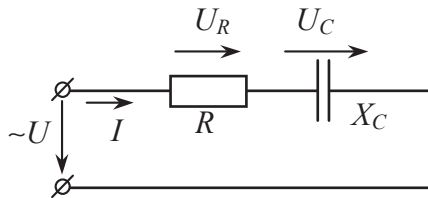


Рис. 3.15

$$\begin{aligned} \dot{U} &= U e^{j0}, \psi_u = 0^\circ. \\ \text{Комплексное сопротивление цепи} \\ Z_{\text{экв.}} &= R - jX_L = \sqrt{R^2 + X_C^2} \cdot e^{-j\varphi} = \\ &= Z_{\text{экв.}} e^{+j\varphi}, \quad \varphi = \text{arctg} \frac{X_C}{R}. \end{aligned}$$

Ток цепи $\dot{I} = \dot{U} / Z_{\text{экв.}} = U e^{j0} / (Z_{\text{экв.}} e^{j\varphi}) = (U/Z_{\text{экв.}}) e^{-j\varphi} = I e^{j\psi_i}, \psi_i = -\varphi$.

Напряжения участков цепи $\dot{U}_R = RI, \dot{U}_C = -jX_C I = X_C^{-j90^\circ} I$.

Мощность цепи $\underline{S} = \dot{U} I^* = U e^{j0} \cdot I e^{-j\psi_i} = UI e^{j(0-\psi_i)} = S e^{-j\varphi} =$
 $= S \cos \varphi - jS \sin \varphi = P - jQ_C$;

$P = S \cos \varphi = RI^2$; $Q_C = S \sin \varphi = -X_C I^2$.

Коэффициент мощности $\cos \varphi = P/S$.

Векторная диаграмма (рис. 3.16)

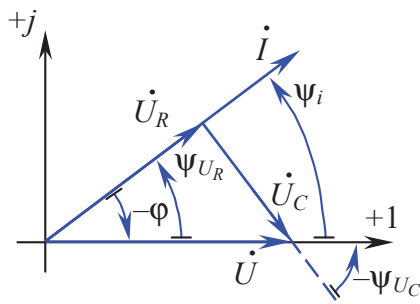


Рис. 3.16

$$\begin{aligned} \dot{U} &= U e^{j0}; \psi_u = 0^\circ; \\ \dot{I} &= I e^{+j\psi_i}; \dot{U}_R = U_R e^{+j\psi_{UR}}; \\ \psi_{UR} &= \psi_i; \\ \dot{U}_C &= U_C e^{+j\psi_{uc}}; \varphi = \psi_u - \psi_i = -\psi_i. \end{aligned}$$

3.7.6. Цепь с последовательным соединением резистивного, индуктивного и емкостного элементов. Напряжение источника

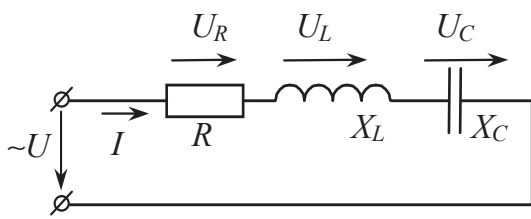


Рис. 3.17

питания $\dot{U} = Ue^{j0}$, $\psi_u = 0^\circ$,
 $X_L > X_C$.

Комплексное сопротивление цепи
 $\underline{Z}_{\text{экв.}} = R + jX_L - jX_C =$
 $= \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \cdot e^{j\varphi} = Z_{\text{экв.}} e^{j\varphi}$.
 $X = X_L - X_C$.

Ток цепи $I = \dot{U} / \underline{Z}_{\text{экв.}} = Ue^{j0} / Z_{\text{экв.}} e^{+j\varphi} = Ie^{-\varphi}$.

Напряжения участков цепи $\dot{U}_R = RI$, $\dot{U}_L = jX_L I$, $\dot{U}_C = jX_C I$.

Мощность цепи $\underline{S} = \dot{U} I^* = Ue^{j0} \cdot Ie^{+j\psi_i} = UIe^{j(0+\psi_i)} = Se^{+j\varphi} =$

$= S \cos \varphi + jS \sin \varphi = P + jQ = P + jQ_L - jQ_C$;

$P = S \cos \varphi = RI^2$, $Q_L = X_L I^2$,

$Q = S \sin \varphi = XI^2$, $Q_C = X_C I^2$.

Коэффициент мощности $\cos \varphi = P/S$.

Векторная диаграмма (рис. 3.18)

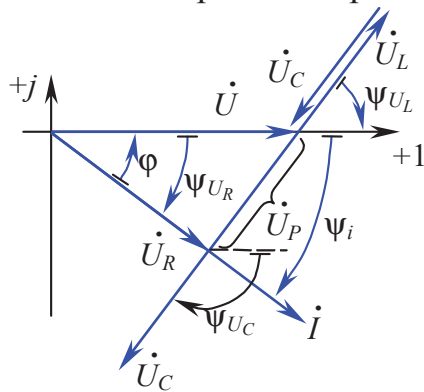


Рис. 3.18

$\dot{U} = Ue^{j0}$, $\psi_u = 0^\circ$;

$I = Ie^{-j\psi_i}$, $\dot{U}_R = U_R e^{-j\psi}$;

$\dot{U}_C = U_C e^{-j\psi}$;

$\dot{U}_L = U_L e^{j\psi}$, $U_P = U_L - U_C$;

$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C$.

3.7.7. Цепь с параллельным соединением резистивного, индуктивного и емкостного элементов. Напряжение источника

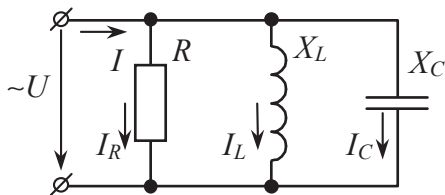


Рис. 3.19

питания $\dot{U} = Ue^{j0}$, $\psi_u = 0^\circ$, $X_C > X_L$.

Полное сопротивление цепи

$\underline{Z}_{\text{экв.}} = \underline{Z}_R \cdot \underline{Z}_L \cdot \underline{Z}_C / (\underline{Z}_R \cdot \underline{Z}_L + \underline{Z}_L \cdot \underline{Z}_C +$
 $+ \underline{Z}_R \cdot \underline{Z}_C) = Z_{\text{экв.}} e^{j\varphi}$, где $\underline{Z}_R = R$;
 $\underline{Z}_L = jX_L = X_L e^{+j90^\circ}$; $\underline{Z}_C = -jX_C = X_C e^{-j90^\circ}$.

Токи цепи $\dot{I} = \dot{U} / \underline{Z}_{\text{экв.}} = I e^{j\psi_i}$, $I = U / Z_{\text{экв.}}$; $\psi_i = \psi_U - \varphi = -\varphi$.
 $\dot{I}_R = \dot{U} / R = U e^{j0} / R e^{j0} = I_R e^{j0} = I_R$; $\dot{I}_L = \dot{U} / \underline{Z}_L = U e^{j0} / (X_L e^{+j90^\circ}) =$
 $= U / X_L e^{-j90^\circ} = I_L e^{-j90^\circ}$; $\dot{I}_C = \dot{U} / \underline{Z}_C = U e^{j0} / (X_C e^{-j90^\circ}) = I_C e^{+j90^\circ}$.
 Мощность цепи $\underline{S} = \dot{U} I^* = U e^{j0} \cdot I e^{-j\psi_i} = U I e^{j(0+\psi_i)} = S e^{j\varphi} =$
 $= S \cos \varphi + j S \sin \varphi = P + j Q = P + j Q_L - j Q_C$; $P = S \cos \varphi = R I_R^2$,
 $Q_L = X_L I_L^2$, $Q_C = -X_C I_C^2$.

Коэффициент мощности $\cos \varphi = P/S$.

Векторная диаграмма (рис. 3.20)

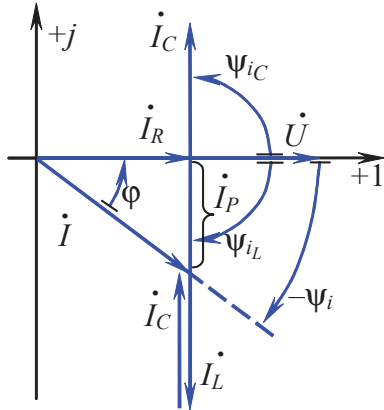


Рис. 3.20

$$\begin{aligned} \dot{U} &= U e^{j0}, \psi_u = 0^\circ; \\ \dot{I} &= I e^{-j\psi_i}, \dot{I}_R = I_R e^{j\psi_{iR}} = I_R e^{j0}; \\ \dot{I}_L &= I_L e^{j\psi_{iL}} = I_L e^{-j90^\circ}; \\ \dot{I}_C &= I_C e^{j\psi_{iC}} = I_C e^{+j90^\circ}; \\ I_P &= I_L - I_C; \\ \dot{I} &= \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C. \end{aligned}$$

3.7.8. Цепь со смешанным соединением резистивного, индуктивного и емкостного элементов. Напряжение источника

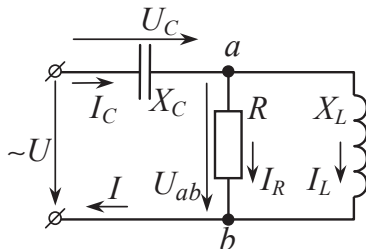


Рис. 3.21

питания $\dot{U} = U e^{j0} = U$, $\psi_u = 0^\circ$.

Комплексное сопротивление цепи
 $\underline{Z}_{\text{экв.}} = \underline{Z}_C + \underline{Z}_R \cdot \underline{Z}_L / (\underline{Z}_R + \underline{Z}_L) = \underline{Z}_{\text{экв.}} e^{j\varphi}$,
 где $\underline{Z}_R = R e^{j0} = R$; $\underline{Z}_L = X_L e^{+j90^\circ} = jX_L$;
 $\underline{Z}_C = X_C e^{-j90^\circ} = -jX_C$.

Токи цепи $\dot{I} = \dot{I}_C = \dot{U} / \underline{Z}_{\text{экв.}} = I e^{+j\psi_i}$, $I = U / Z_{\text{экв.}}$; $\psi_i = \psi_U - \varphi = -\varphi$;

$\dot{U}_{ab} = \dot{I}_C \cdot \underline{Z}_R \cdot \underline{Z}_L / (\underline{Z}_R + \underline{Z}_L) = \dot{U} - \dot{U}_C = \dot{U} - \dot{I}_C \cdot \underline{Z}_{C ab}$;

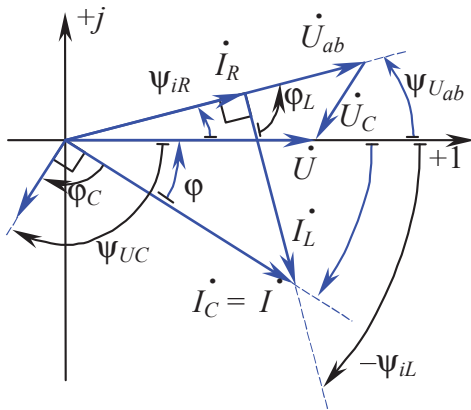
$\dot{I}_R = \dot{U}_{ab} / \underline{Z}_R = \dot{I}_C \underline{Z}_L / (\underline{Z}_R + \underline{Z}_L) = I_R e^{j\psi_{iR}}$;

$\dot{I}_L = \dot{U}_{ab} / \underline{Z}_L = \dot{I}_C \underline{Z}_R / (\underline{Z}_R + \underline{Z}_L) = I_L e^{j\psi_{iL}} = U_{ab} e^{j\psi_u}$

Мощность цепи $\underline{S} = \dot{U} I^* = U I e^{j(0-\psi_i)} = S e^{j\varphi} = S \cos \varphi + j S \sin \varphi =$
 $= P + j Q = P + j Q_L - j Q_C$; $P = S \cos \varphi = R I_R^2$, $Q_L = X_L I_L^2$, $Q_C = X_C I_C^2$.

Коэффициент мощности $\cos \varphi = P/S$.

Векторная диаграмма (рис. 3.22)



$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_{ab} + \dot{U}_C = Ue^{j0} = U, \\ \dot{I} &= \dot{I}_R + \dot{I}_L = Ie^{-j\psi_i}. \end{aligned}$$

Рис. 3.22

3.8. Методика расчета однофазных цепей синусоидального тока

Расчет электрической цепи комплексным методом ведут в следующей последовательности:

1) определяют комплексные сопротивления отдельных ветвей и всей цепи.

2) в зависимости от типа электрической цепи выбирают метод расчета цепи (если цепь простая – метод свертывания; сложная – какой-либо из методов расчета сложных цепей).

3) определяют токи и напряжения ветвей.

4) правильность расчета проверяют составлением баланса активных и реактивных мощностей:

$$\begin{aligned} P_{уст} &= \sum P_{np}, \quad Q_{уст} = \sum Q_{np}, \quad \underline{S}_{уст} = \dot{U} I^* = P_{уст} \pm jQ_{уст}, \\ \sum P_{np} &= \sum R_k I_k^2, \quad \sum Q_{np} = \sum X_{Lk} I_k^2 - \sum X_{Ck} I_k^2. \end{aligned}$$

3.9. Построение векторной диаграммы на комплексной плоскости

1. Определяют модуль и аргумент синусоидальной величины (тока, напряжения, ЭДС).

2. Задаются масштабом этих величин: m_U ; m_I .

3. На комплексной плоскости от действительной оси +1 откладывают векторы в принятом масштабе (направление вектора – угол между осью +1 и вектором – аргумент тока, напряжения или ЭДС).

Правильность построения векторной диаграммы легко проверить по I закону Кирхгофа для узлов и по II закону Кирхгофа для кон-

туров путем сложения соответствующих векторов. Кроме того, получившиеся при построении углы φ и ψ должны соответствовать расчетным по величине и по знаку.

3.10. Вопросы для самопроверки

1. Как определяются действующее и среднее значения синусоидального тока? Дайте определение этих понятий.

2. Дайте определение понятиям период, частота, мгновенное, амплитудное значение тока, напряжения, ЭДС, фаза, начальная фаза.

3. Мгновенное значение напряжения $u = 100 \sin(\omega t - 30^\circ)$. Определите действующее значение и начальную фазу напряжения.

4. Действующее значение тока $I = 5$ А, начальная фаза тока $\psi_i = 45^\circ$. Напишите мгновенное значение тока i . Запишите значение комплексного тока.

5. Мгновенное значение тока $i = 14,1 \sin(\omega t + 60^\circ)$. Запишите значение комплексного тока в алгебраической, тригонометрической, показательной формах записи.

6. Как осуществляется переход от алгебраической формы записи комплексного тока к мгновенному значению?

7. Катушка индуктивности $L = 0,032$ Гн подключена к источнику питания $U = 80$ В, $f = 50$ Гц. Вычертить электрическую схему цепи, определить ток, мощность и построить векторную диаграмму, приняв начальную фазу напряжения $\psi_i = 30^\circ$.

8. Конденсатор $C = 600$ мкФ подключен к источнику питания $U = 40$ В, $f = 50$ Гц. Вычертить электрическую схему цепи, определить ток, мощность и построить векторную диаграмму, приняв начальную фазу тока $\psi_i = 30^\circ$.

9. В цепь синусоидального тока частотой $f = 50$ Гц последовательно включены $R_1 = 50$ м, $R_2 = 40$ м, $L = 0,096$ Гц, $C = 630$ мкФ.

Напряжение на конденсаторе $U_c = 30$ В. Определить ток, активную, реактивную и полную мощность цепи. Вычертить электрическую схему цепи и построить векторную диаграмму, приняв начальную фазу тока $\psi_i = -45^\circ$.

10. В цепь синусоидального тока $f = 50$ Гц параллельно включены две ветви с параметрами $R_1 = 80$ м; $L_1 = 0,016$ Гц; $R_2 = 40$ м; $C_2 = 680$ мГц. Напряжение на $R_2 = 40$ В. Вычертить электрическую схему, определить токи в ветвях и в неразветвленной части цепи. По-

строить векторную диаграмму, приняв начальную фазу напряжения источника питания $\psi_u = 0$.

11. Запишите закон Ома и закон Кирхгофа в комплексной форме.

12. Определить комплексную полную мощность в электрической цепи задачи 10, а также активную и реактивную мощность.

13. Что определяет угол сдвига фаз между напряжением и током электрической цепи?

14. Напряжение сети $U = 50$ В, начальная фаза напряжения $\psi_u = 60^\circ$; ток цепи $I = 10$ А, начальная фаза тока $\psi_i = +30^\circ$. Определить параметры цепи при последовательном соединении элементов.

15. Определить активную и реактивную мощность электрической цепи задачи 14.

16. Отложите на комплексной плоскости вектор напряжения U и вектор тока I , сдвинутые между собой по фазе: а) $\varphi > 0$; б) $\varphi < 0$; в) $\varphi = 0$.

17. Почему при включении в цепь постоянного тока конденсатора ток равен 0?

18. Почему при включении в цепь постоянного тока реальной катушки индуктивности ток больше, чем при включении ее в цепь синусоидального тока такого же напряжения?

3.11. Задачи

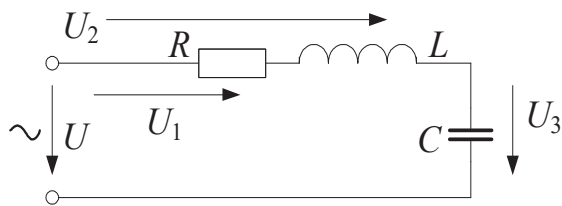


Рис. 3.23

3.11.1. Действующие значения напряжений $U = 185$ В, $U_1 = 60$ В, $U_2 = 100$ В.

Рассчитать U_3 .

Ответ: $U_3 = 255$ В.

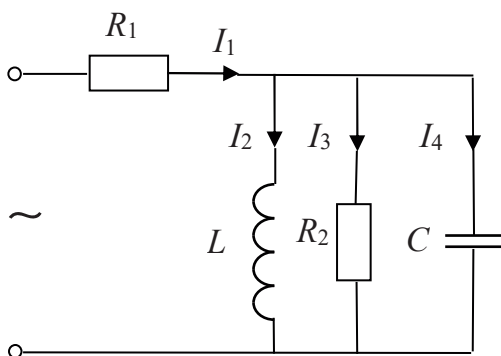


Рис. 3.24

3.11.2. Измерены действующие значения токов $I_1 = 5$ А,

$I_3 = 3$ А, $I_4 = 6$ А. Определить ток I_2 .

Ответ: Задача имеет два решения: $I_2 = 2$ А, $I_2 = 10$ А.

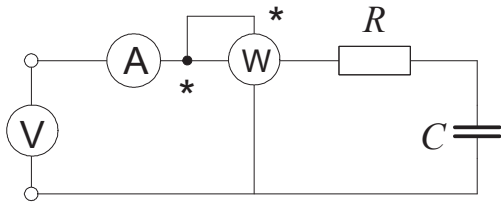


Рис. 3.25

3.11.3. Показания измерительных приборов равны:

$U = 200$ В, $I = 4$ А, $P = 640$ Вт. Рассчитать сопротивления R и X_c .

Ответ: $R = 40$ Ом, $X_c = 30$ Ом.

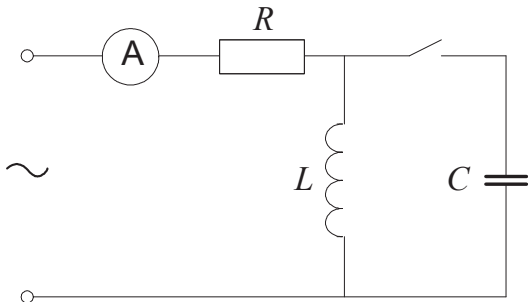


Рис. 3.26

3.11.4. $R = 60$ Ом, $X_L = 80$ Ом.

Показания амперметра одинаковы при разомкнутом и замкнутом ключе. Определить X_c .

Ответ: $X_c = 40$ Ом.

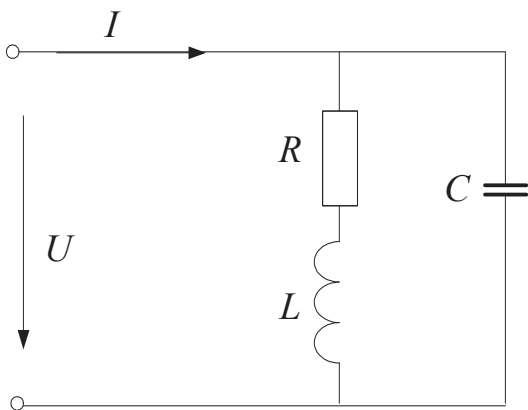


Рис. 3.27

3.11.5. Элементы R и L образуют последовательную схему замещения двигателя. Номинальные мощность, напряжение и ток двигателя равны $P = 660$ Вт, $U = 220$ В, $I = 5$ А. Рассчитать сопротивление X_c , подключение которого повысит $\cos \varphi$ нагрузки до значения 1.

Ответ: $X_c = 55$ Ом.

4. ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

4.1. Общие сведения

Трехфазной электрической цепью называется совокупность трех однофазных цепей (фаз), в которых действуют синусоидальные ЭДС одинаковой амплитуды и частоты, сдвинутые по фазе друг относительно друга на 120° и индуцированные в одном источнике энергии.

Фазы трехфазного приемника соединяются по схеме «звезда», либо «треугольник» (рис. 4.1). К одной и той же сети трехфазного тока можно подключить как трехфазные приемники, так и однофазные (рис. 4.1).

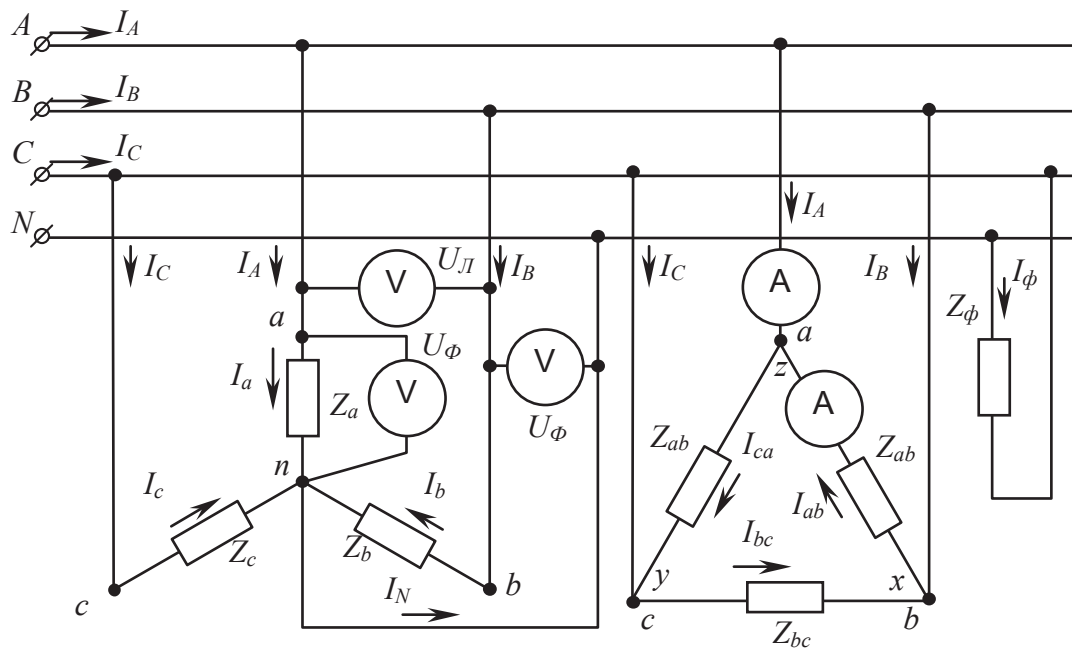


Рис. 4.1

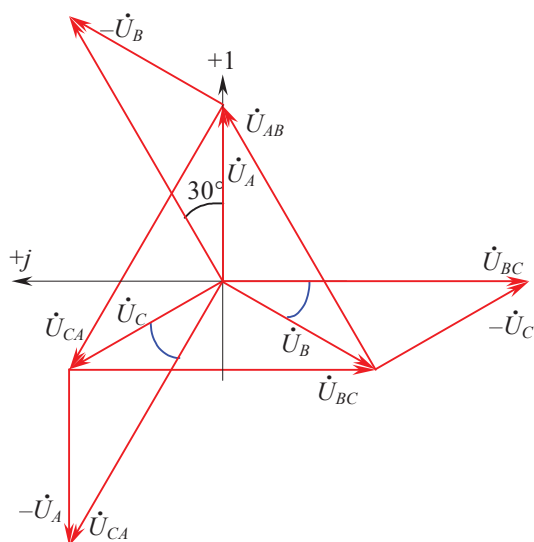
Провода, соединяющие источник питания с приемником, называются линейными, а токи, протекающие по ним, – линейными токами I_A , I_B , I_C или I_L . Токи, протекающие по фазам приемника, называются фазными I_ϕ – I_a , I_b , I_c (в звезде) и I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} (в треугольнике). Фазы источника обозначаются буквами A, B, C, нулевой провод N, фазы приемника a, b, c (начала) и x, y, z (концы).

За положительное направление линейных токов принимается направление от источника к приемнику, а фазных – от начала к концу фаз приемника. Напряжения между линейными проводами или между

началами фаз называются линейными и обозначаются $U_{Л}, U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$. Напряжения между началом и концом фаз приемника или между линейным и нулевым проводом называются фазными напряжениями и обозначаются U_{ϕ}, U_A, U_B, U_C (в источнике), U_a, U_b, U_c (в приемнике). В симметричной трехфазной системе при соединении звездой $U_{Л} = \sqrt{3}U_{\phi}, I_{\phi} = I_{Л}$, при соединении треугольником $-U_{\phi} = U_{Л}, I_{Л} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi}$.

Линейные и фазные напряжения источника связаны соотношениями $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A$.

Соответствующие фазные и линейные напряжения сдвинуты по фазе на 30° , причем $\dot{U}_{Л}$ опережает \dot{U}_{ϕ} (рис.4.2).



$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= U_{\phi} e^{j0}, \quad \dot{U}_{AB} = U_{Л} e^{+j30^\circ}, \\ \dot{U}_B &= U_{\phi} e^{-j120^\circ}, \quad \dot{U}_{BC} = U_{Л} e^{-j90^\circ}, \\ \dot{U}_C &= U_{\phi} e^{+j120^\circ}, \quad \dot{U}_{CA} = U_{Л} e^{+j150^\circ} \end{aligned}$$

Рис.4.2

4.2. Мощность трехфазной цепи

При симметричной нагрузке фаз приемника, когда $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$

$$S = 3S_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} = \sqrt{3}U_{Л}I_{Л}, [\text{ВА}];$$

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3}U_{Л}I_{Л} \cos \varphi, [\text{Вт}];$$

$$Q = 3Q_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} \sin \varphi = \sqrt{3}U_{Л}I_{Л} \sin \varphi, [\text{вар}];$$

$$P_{\phi} = R_{\phi}I_{\phi}^2, Q_{\phi} = X_{\phi}I_{\phi}^2, S_{\phi} = Z_{\phi}I_{\phi}^2;$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}, S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

При несимметричной нагрузке фаз $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$. Виды асимметрии нагрузки:

$\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c, \varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$ – общий случай,

$Z_a = Z_b = Z_c, \varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$ – равномерная несимметричная,

$Z_a \neq Z_b \neq Z_c, \varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$ – однородная несимметричная.

В общем случае полная мощность трехфазной цепи определяется как сумма мощностей всех фаз $\underline{S} = \underline{S}_a + \underline{S}_b + \underline{S}_c$;

$$S_\phi = U_\phi I_\phi^* = S_\phi e^{j\varphi} = P_\phi + jQ_\phi$$

$$P = P_a + P_b + P_c, \quad Q = \pm Q_a \pm Q_b \pm Q_c, \quad \cos \varphi = \frac{P}{S}, \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

4.3. Анализ трехфазных электрических цепей

4.3.1. Симметричная нагрузка при соединении звездой.

Трехпроводная система

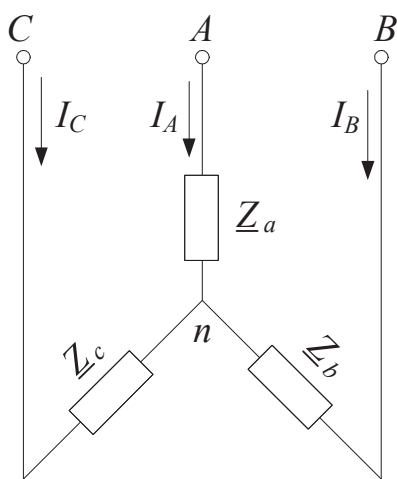


Рис. 4.3

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c, \quad U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}}, \quad I_L = I_\phi$$

$$I_\phi = \frac{U_\phi}{Z_\phi}; \quad \varphi_\phi = \arctg \frac{X_\phi}{R_\phi}$$

$$P_\phi = R_\phi I_\phi^2, \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$Q_\phi = X_\phi I_\phi^2, \quad \cos \varphi = \frac{P}{S}$$

$$S = 3S_\phi = 3U_\phi I_\phi = \sqrt{3}U_L I_L,$$

$$P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi,$$

$$Q = 3Q_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi = \sqrt{3}U_L I_L \sin \varphi.$$

Для построения векторной диаграммы (рис. 4.4) достаточно задаться начальной фазой одного из напряжений цепи, например $\psi_{AB} = +30^\circ$.

Тогда

$$\psi_{U_A} = 0^\circ; \quad \psi_{U_B} = -120^\circ; \quad \psi_{U_C} = +120^\circ.$$

На комплексной плоскости строятся в масштабе векторы фазных напряжений $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ и под углом φ_ϕ или ψ_ϕ проводятся векторы токов.

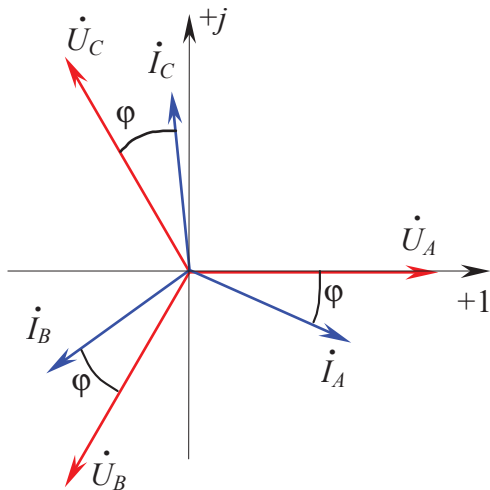


Рис. 4.4

Знак угла φ зависит от характера нагрузки: при индуктивной – «+», при емкостной – «-», при активной – «0».

4.3.2. Несимметричная нагрузка при соединении звездой.

Трехпроводная система. В этом случае нарушается симметрия

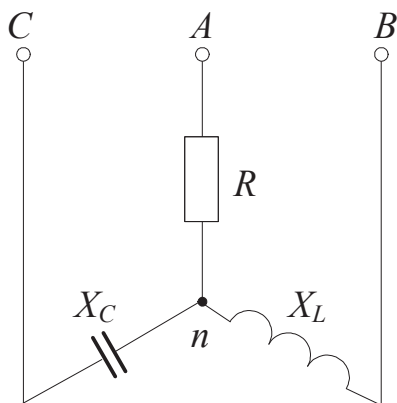


Рис. 4.5

фазных напряжений на приемнике:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}, \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}$$

$\dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN}$, где \dot{U}_{nN} – напряжение смещения нейтрали, которое определяется методом междуузлов напряжения

$$\dot{U}_{nN} = (\dot{U}_A \underline{Y}_a + \dot{U}_B \underline{Y}_b + \dot{U}_C \underline{Y}_c) / (\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c),$$

где

$$\underline{Y}_a = 1/\underline{Z}_a = 1/R; \quad \underline{Y}_b = 1/\underline{Z}_b = 1/(X_L e^{+j90^\circ}); \quad \underline{Y}_c = 1/\underline{Z}_c = 1/(X_C e^{-j90^\circ}).$$

По закону Ома определяются фазные токи:

$$\dot{I}_A = \dot{U}_a / \underline{Z}_a; \quad \dot{I}_B = \dot{U}_b / \underline{Z}_b; \quad \dot{I}_C = \dot{U}_c / \underline{Z}_c.$$

Мощность фаз приемника:

$$P_a = R_a I_A^2; \quad Q_b = X_b I_B^2; \quad Q_c = -X_c I_C^2.$$

Мощность всего приемника:

$$P = P_a; \quad Q = Q_b - Q_c; \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Коэффициент мощности $\cos \varphi = \frac{P}{S}$.

При построении векторной диаграммы (рис.4.6) необходимо сначала построить векторы напряжений источника $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ и приемника $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$, а также напряжение смещения нейтрали \dot{U}_{nN} . Затем строятся векторы токов под соответствующими углами $\psi_{I_A}, \psi_{I_B}, \psi_{I_C}$ или $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$.

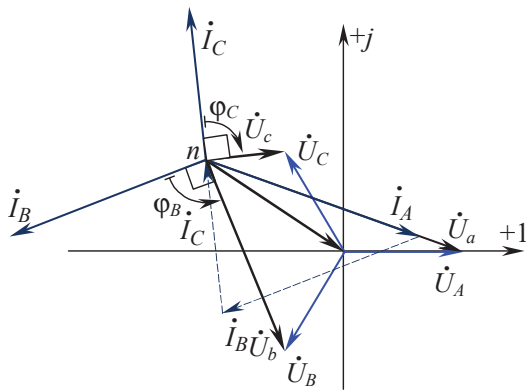


Рис. 4.6

При правильном решении $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$. Из векторной диаграммы видно, что асимметрия нагрузки в трехпроводной цепи приводит к перекосу напряжений $U_a \neq U_b \neq U_c$, что недопустимо. Поэтому трехпроводная система при несимметричной нагрузке и схеме «звезда» не применяется.

4.3.3. Несимметричная нагрузка при соединении звездой. Четырехпроводная система (с нулевым проводом). Если принять

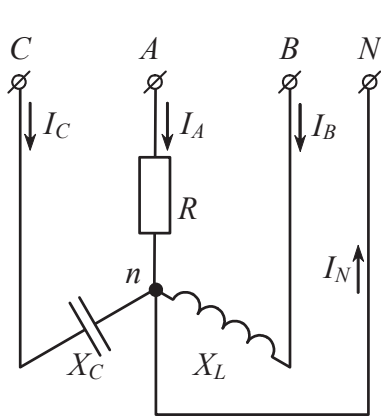


Рис. 4.7

$$\underline{Z}_{nN} \approx 0, \text{ то } \underline{Y}_{nN} \approx \infty,$$

$$\text{а } \dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_a + \dot{U}_B \underline{Y}_b + \dot{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_{nN}} = 0.$$

Тогда напряжения на фазах приемника остаются практически симметричными, равными напряжению источника:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A, \dot{U}_b = \dot{U}_B, \dot{U}_c = \dot{U}_C. \text{ Фазные токи}$$

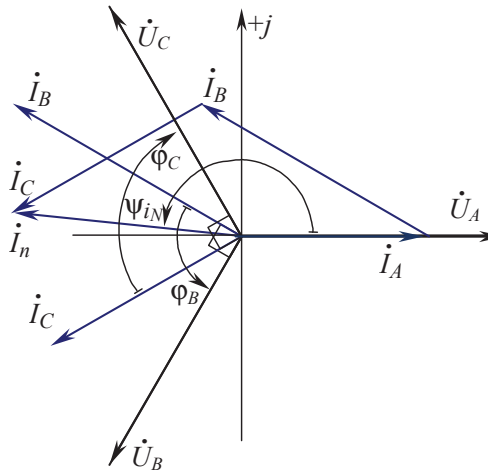
$$\dot{I}_A = \dot{U}_A / \underline{Z}_a; \dot{I}_B = \dot{U}_B / \underline{Z}_b;$$

$$\dot{I}_C = \dot{U}_C / \underline{Z}_c.$$

Ток нулевого провода

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C; \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C - \dot{I}_N = 0.$$

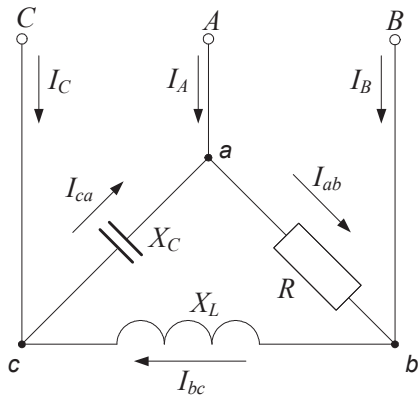
Мощность приемника рассчитывается так же, как в п. 4.3.2. Векторная диаграмма представлена на рис. 4.8.



$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= U_\Phi e^{-j0}; \dot{U}_B = U_\Phi e^{-j120^\circ}; \\ \dot{U}_C &= U_\Phi e^{+j120^\circ}; \\ \dot{I}_A &= U_\Phi e^{j0} / \text{Re}^{-j0} = I_A e^{j0}; \\ \dot{I}_B &= U_\Phi e^{-j120^\circ} / (X_L e^{+j90^\circ}) = I_B e^{-j210^\circ}; \\ \dot{I}_C &= U_\Phi e^{+j120^\circ} / (X_C e^{-j90^\circ}) = I_C e^{+j210^\circ}; \\ \dot{I}_N &= \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = I_N e^{+j\psi_{IN}}. \end{aligned}$$

Рис. 4.8

4.3.4. Несимметричная нагрузка при соединении треугольником. Трехпроводная система. При соединении треугольником $U_\Phi = U_L$, а линейные напряжения источника всегда симметричны. Поэтому соединение треугольником применяется в трехпроводных системах при любой нагрузке, как симметричной, так и несимметричной, если номинальное напряжение приемника равняется линейному напряжению источника питания.



Примем $\psi_{AB} = 0^\circ$. Тогда $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_L e^{j0}$;
 $\dot{U}_{BC} = U_L e^{-j120^\circ}$; $\dot{U}_{CA} = U_L e^{+j120^\circ}$.
 Комплексные сопротивления приемника $\underline{Z}_{ab} = \text{Re}^{j0}$; $\underline{Z}_{bc} = X_L e^{+j90^\circ}$;
 $\underline{Z}_{ca} = X_C e^{-j90^\circ}$.

Рис. 4.9

Фазные токи

$$\begin{aligned} \dot{I}_{ab} &= \dot{U}_{AB} / \underline{Z}_{ab} = U_L e^{-j0} / \text{Re}^{j0} = I_{ab} e^{j0}; \\ \dot{I}_{bc} &= \dot{U}_{BC} / \underline{Z}_{bc} = U_L e^{-j120^\circ} / (X_L e^{+j90^\circ}) = I_{bc} e^{-j210^\circ}; \\ \dot{I}_{ca} &= \dot{U}_{CA} / \underline{Z}_{ca} = U_E e^{-j90^\circ} / (X_C e^{-j90^\circ}) = I_{ca} e^{+j210^\circ}. \end{aligned}$$

Линейные токи определяются по первому закону Кирхгофа для узлов a, b, c :

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

Мощность приемника рассчитывается по фазным токам.

$$P = \sum P_\Phi; Q = \sum Q_\Phi; \underline{S} = \sum \underline{S}_\Phi, P_\Phi = R_\Phi I_\Phi^2, Q_\Phi = X_\Phi I_\Phi^2.$$

Для данной схемы

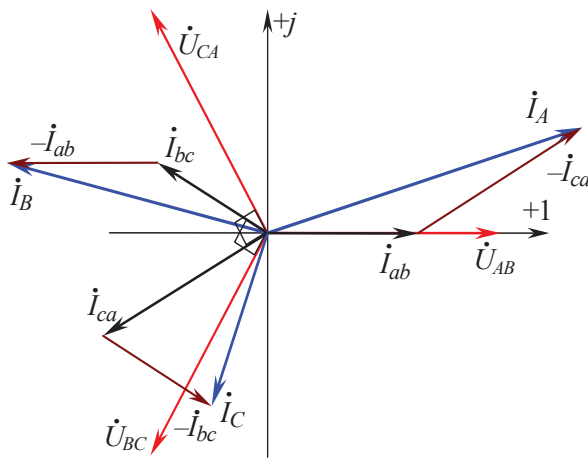
$$P = P_{ab} = R_{ab} I_{ab}^2; Q = Q_{bc} - Q_{ca} = X_{bc} I_{bc}^2 - X_{ca} I_{ca}^2;$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

$$\underline{S} = \underline{S}_{ab} + \underline{S}_{bc} + \underline{S}_{ca} = \dot{U}_{AB} \dot{I}_{ab}^* + \dot{U}_{BC} \dot{I}_{bc}^* + \dot{U}_{CA} \dot{I}_{ca}^* = S e^{j\varphi} = P + jQ.$$

$$\text{Коэффициент мощности } \cos \varphi = \frac{P}{S}.$$

Построение векторной диаграммы



На комплексной плоскости сначала строятся векторы линейных напряжений, затем векторы фазных токов и по ним определяются графическим путем линейные токи, которые должны совпасть с расчетными по модулю и аргументу.

Рис. 4.10

При симметричной нагрузке фаз приемника расчет можно производить только для одной фазы:

$$I_\Phi = \frac{U_\Pi}{Z_\Phi}; I_\Pi = \sqrt{3} I_\Phi; P = \sqrt{3} U_\Pi I_\Pi \cos \varphi; Q = \sqrt{3} U_\Pi I_\Pi \sin \varphi;$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}; S = \sqrt{3} U_\Pi I_\Pi = \sqrt{P^2 + Q^2}, P = 3P_\Phi, P_\Phi = U_\Phi I_\Phi \cos \varphi_\Phi = R_\Phi I_\Phi^2,$$

$$Q = 3Q_\Phi, Q_\Phi = U_\Phi I_\Phi \sin \varphi_\Phi = X_\Phi I_\Phi^2.$$

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение схемы соединения приемника «звезда», «треугольник».
2. Что называют фазой трехфазного приемника?
3. Как маркируются начала и концы фаз трехфазного приемника?
4. Напишите выражения для мгновенных значений напряжений, образующих трехфазную симметричную систему, приняв начальную фазу фазы A равной нулю; равной 30° .
5. Напишите выражения для комплексных напряжений симметричной трехфазной системы, приняв начальную фазу ψ_{AB} линейного напряжения U_{AB} равной 30° .
6. Каково соотношение линейных и фазных напряжений симметричного приемника, соединенного 1) по схеме «звезда»; 2) «треугольник»?
7. Напишите соотношение линейных и фазных токов симметричного приемника, соединенного по схеме 1) «звезда»; 2) «треугольник».
8. Докажите, что в симметричной трехфазной системе токов сумма их мгновенных значений всегда равна нулю.
9. К чему приводит включение несимметричного приемника, соединенного по схеме «звезда», в трехпроводную линию?
10. Почему несимметрия трехфазного приемника, соединенного по схеме «треугольник», не вызывает «перекоса» фазных напряжений?
11. Вычертите схему трехфазного приемника, соединенного по схеме «звезда» и «треугольник». Включите амперметры и вольтметры для измерения линейных и фазных токов и напряжений.
12. Приемник соединен по схеме «звезда» с нейтральным проводом. В фазу A включен реостат (R), в фазу B – катушка (L, R), в фазу C – конденсатор (C). Начертите векторную диаграмму токов и напряжений.
13. Напишите выражения для активной, реактивной и полной мощностей трехфазного приемника при симметричной и несимметричной нагрузке.
14. Вычертите векторную диаграмму напряжений и токов для трехфазного приемника, соединенного по схеме «треугольник», если в первую фазу включен элемент с параметром L , во вторую –

с параметром C , в третью – с параметром R .

15. Как строится векторная диаграмма напряжений несимметричного приемника, соединенного по схеме «звезда» без нулевого провода?

16. К трехфазной линии с $U_{\text{л}} = 220\text{В}$ подключен трехфазный приемник, соединенный по схеме: а) «звезда» с нейтральным проводом; б) «звезда»; в) «треугольник».

Сопротивления фаз приемника $R_a = 10\text{ Ом}$, $R_b = 3\text{ Ом}$, $X_B = 4\text{ Ом}$, $X_C = -10\text{ Ом}$. Определить линейные и фазные токи, активную, реактивную, полную мощности трехфазного приемника, его $\cos\varphi$. Построить векторную диаграмму напряжений и токов на комплексной плоскости.

17. Дайте определение симметричного и несимметричного трехфазного приемника.

18. Каково назначение нейтрального провода в трехфазных приемниках?

19. К трехфазной линии с $U_{\text{л}} = 220\text{В}$ подключен симметричный трехфазный приемник, активная потребляемая мощность которого $P = 5\text{ кВт}$, $\cos\varphi = 0,6$. Определить токи приемника при «звезде», «треугольнике». Определить сопротивление фазы приемника. Построить совмещенную векторную диаграмму токов и напряжений.

20. К чему приведет обрыв одного линейного провода трехпроводной цепи в симметричном приемнике, соединенном по схеме:

а) «звезда», б) «треугольник»?

4.5. Задачи

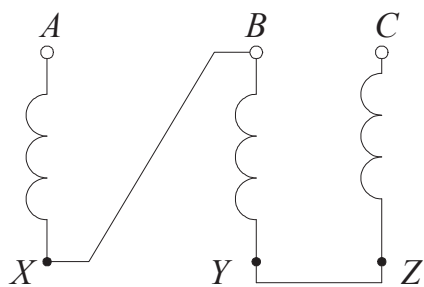


Рис. 4.11

4.5.1. A, B, C – начала, X, Y, Z – концы фазных обмоток генератора.

Определить напряжение между выводами A и C , если фазная ЭДС равна 380 В .

Ответ: $U_{AC} = 760\text{ В}$.

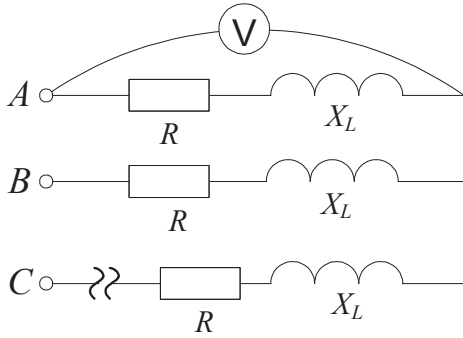


Рис. 4.12

4.5.2. До обрыва фазы C показание вольтметра равнялось 380 В. Определить показание вольтметра после обрыва фазы.

Ответ: $U = 330$ В.

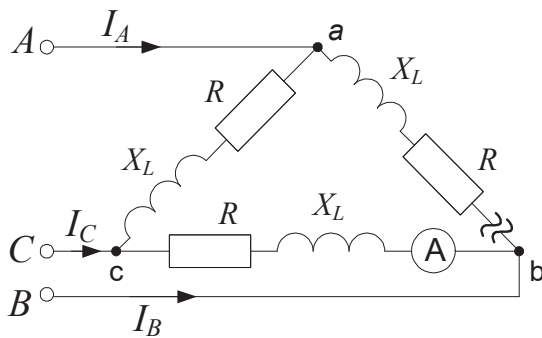


Рис. 4.13

4.5.3. До обрыва фазы AB показание амперметра равнялось 26 А. Определить показание прибора, а также линейные токи I_A , I_B , I_C после обрыва.

Ответ: показание амперметра не изменится.

$$I_A = I_B = 26 \text{ А. } I_C = 45 \text{ А.}$$

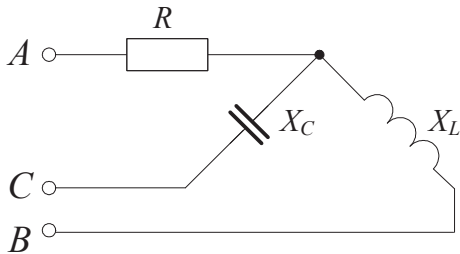


Рис. 4.14

4.5.4. Линейное напряжение сети 260 В. $R = X_L = X_C = 10$ Ом. Определить активную мощность, потребляемую трехфазной нагрузкой.

Ответ: $P = 6760$ Вт.

5. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

5.1. Общие методические указания

Целью контрольной работы является окончательная проверка усвоения студентами соответствующих разделов курса и методов расчета электрических цепей постоянного и переменного тока.

Приступать к выполнению контрольной работы необходимо после изучения теоретических материалов, решения достаточного количества типовых задач и ответа на приведенные в конце каждой главы пособия вопросы для самопроверки.

При оформлении каждой задачи требуется приводить текст задачи, таблицу с исходными данными с указанием номера варианта, схему электрической цепи с принятыми действующими ГОСТами буквенных обозначений и графических изображений элементов цепи. Все рисунки, схемы, графики должны быть выполнены аккуратно с помощью чертежных инструментов в масштабе $1:10^{\pm n}$ или $5:10^{\pm n}$ единиц измерения физической величины, где n – целое число. На осях координат необходимо написать отложенные на них величины и единицы их измерения. Масштаб электрических величин на векторных диаграммах выразить в $m_I = A/ММ$, $m_V = B/ММ$. Решение задач не следует перегружать приведением всех алгебраических преобразований. Вместе с тем каждый этап решения должен иметь заголовки и краткий комментарий. При определении той или иной величины обязательно привести необходимую расчетную формулу, численное значение каждой величины формулы и окончательный результат с указанием единицы измерения.

На титульном листе работы должны быть указаны название университета, факультета и кафедры, номер группы, курс, Ф.И.О. и шифр студента, Ф.И.О. преподавателя.

В конце работы необходимо привести список используемой литературы и дату окончания работы.

Если контрольная работа не зачтена, то все поправки должны быть выполнены либо в этой же работе, либо, если работа оформлена заново, она должна быть представлена преподавателю вместе с первоначальным вариантом.

Определение номера варианта и параметров цепи

Определение данных к каждой задаче выполняется в два этапа. На первом этапе вычисляется исходный номер варианта ($N_{п}$). Он

определяется двумя последними цифрами шифра студента. Если две последние цифры шифра образуют число 50 и более, то для определения $N_{\text{п}}$ нужно отнять 50. $N_{\text{п}}$ задает номер строки данных в каждой из таблиц 5.1, 5.2, 5.3. Эти исходные данные не окончательные и подлежат коррекции.

Для определения варианта коррекции $N_{\text{к}}$ в табл. 5.4 нужно сложить три последние цифры шифра студента. Эта сумма и образует номер $N_{\text{к}}$ (см. табл. 5.4). Зная $N_{\text{к}}$, из табл.5.4 находим значения коэффициентов K_1, K_2, K_3 . В каждой из задач эти коэффициенты используются для коррекции найденной ранее строки исходных данных:

в задаче 5.2.1 значения ЭДС (колонки 18 и 19 табл. 5.1) умножаются соответственно на K_1 и K_2 ; значения сопротивлений R_1, R_2, R_3 (колонки 10, 11, 12 табл. 5.1) умножаются на K_1 ; R_4, R_5, R_6 – на K_2 ; R_7, R_8 – на K_3 ;

в задаче 5.2.2 значение напряжения U_m (колонка 2 табл. 5.2) умножается на K_1 ; начальная фаза ψ_u (колонка 3) – на K_2 ; R_1, R_2, R_3 (колонки 8, 11, 14, 17) на K_1 ; L_1, L_2, L_3, L_4 (колонки 9, 12, 15, 18) – на K_2 ; C_1, C_2, C_3, C_4 (колонки 10, 13, 16, 19) – на K_3 ;

в задаче 5.2.3 значение напряжения $U_{\text{л}}$ (колонка 3 табл. 5.3) умножается на K_1 ; Z_{ab} (колонка 5.6) – на K_1 ; Z_{bc} (колонка 7,8) – на K_2 ; Z_{ca} (колонки 9, 10) – на K_3 .

Пример. Пусть шифр студента равен 65327. Тогда $N_{\text{п}} = 27$, $N_{\text{к}} = 3 + 2 + 7 = 12$.

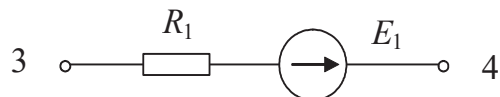
Для задачи 5.2.1. в табл. 5.1 находим строку с номером $N_{\text{п}} = 27$. Эта строка дает исходные данные.

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	E_3	E_5
Исх. данные	130	350	560	640	420	240	460	650	500	600
Умножить на коэф.	K_1	K_1	K_1	K_2	K_2	K_2	K_3	K_3	K_1	K_2
Окончательные данные	65	175	280	1024	672	384	782	1105	250	960

По номеру $N_{\text{к}} = 12$ в табл. 5.4 находим коэффициенты: $K_1 = 0,5$; $K_2 = 1,6$; $K_3 = 1,7$. Умножая исходные данные на соответствующий коэффициент (K_1, K_2 либо K_3), получим окончательные данные к задаче 5.2.1.

5.2. Задачи

5.2.1. По данным табл. 5.1 начертить схему электрической цепи постоянного тока. Номера источников ЭДС и резисторов соответствуют номеру ветви, в которой они размещены, а положительное направление ЭДС принимается от начала ветви к ее концу. Соединяя ветви с одинаковыми точками, получаем электрическую схему. Например, вариант 5, ветвь № 1 – «34», здесь 3 – начало, 4 – конец ветви.



Начало «3» 1-й ветви соединяем с концом «3» 6-й ветви и с концом «3» 7-й ветви, а конец 1-й ветви «4» соединяется с началом «4» 2-й ветви и началом «4» 8-й ветви и т.д.

Для полученной схемы электрической цепи выполнить следующее:

- 1) составить систему уравнений по 1-му и 2-му законам Кирхгофа, необходимых для определения токов ветвей методом законов Кирхгофа, и решить ее с помощью компьютера;
- 2) определить токи всех ветвей и их направления методом контурных токов;
- 3) составить баланс мощностей для данной схемы электрической цепи;
- 4) рассчитать и построить в масштабе потенциальную диаграмму для внешнего контура цепи;
- 5) подключить вольтметр между точками схемы, указанными в колонке 20, таблицы и определить его показания;
- 6) определить методом эквивалентного генератора ток, указанный в колонке 21 таблицы, и подключить амперметр для его измерения;
- 7) определить токи всех ветвей методом наложения;
- 8) исключить из схемы ветвь, указанную в колонке 21 таблицы, и рассчитать оставшуюся цепь методом междуузлового напряжения.

5.2.2. По данным табл. 5.2 начертить схему однофазной электрической цепи синусоидального тока с частотой 50 Гц. Ветви 12–1'2' и 23 – 2'3' соединены параллельно. Источник питания с напряжением U_m

и начальной фазой Ψ_U подключить между точками 1 и 3 (3'). Подключить ваттметр для измерения активной мощности всей цепи, вольтметр для измерения напряжения между точками, указанными в колонке 20 табл. 5.2, и амперметр для измерения полного тока цепи. Для полученной схемы электрической цепи выполнить следующее:

- 1) определить сопротивление реактивных элементов цепи X_L, X_C ;
- 2) определить комплексные сопротивления ветвей и всей цепи;
- 3) определить токи и напряжения всех ветвей и записать их мгновенные значения;
- 4) определить активную, реактивную и полную мощность цепи;
- 5) определить коэффициент мощности цепи;
- 6) определить показания ваттметра, амперметра и вольтметра;
- 7) составить баланс активных и реактивных мощностей;
- 8) построить в масштабе на комплексной плоскости совмещенную векторную диаграмму напряжений и токов.

5.2.3. По данным табл. 5.3 начертить электрическую схему трехфазной цепи синусоидального тока с напряжением источника питания $U_{\text{л}}$, начальной фазой фазного Ψ_a или линейного $\Psi_{\text{ав}}$ напряжений и схемой соединения приемника, указанной во 2-й колонке 3 таблицы («звезда» – Y, «звезда» с нулевым проводом – Y, «треугольник» – Δ).

Для полученной схемы выполнить следующее:

- 1) определить фазные и линейные токи, ток нулевого провода (для четырехпроводной цепи);
- 2) определить активную, реактивную и полную мощность цепи;
- 3) определить коэффициент мощности цепи;
- 4) построить на комплексной плоскости в масштабе совмещенную векторную диаграмму токов и напряжений.

Таблица 5.1

№ в-та	Номер ветви и ее «начало» и «конец»								R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R ₄ , Ом	R ₅ , Ом	R ₆ , Ом	R ₇ , Ом	R ₈ , Ом	Источники ЭДС, В		Найти	
	1	2	3	4	5	6	7	8									U, В	I, А		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
0	23	35	56	64	41	12	52	34	140	460	650	530	320	230	350	560	E ₂ =500	E ₈ =600	13	I ₁
1	34	46	62	21	15	53	63	41	510	120	260	640	430	340	460	620	E ₂ =200	E ₅ =600	54	I ₂
2	34	45	52	21	16	63	53	41	610	120	230	540	430	340	450	520	E ₄ =200	E ₆ =500	64	I ₅
3	34	45	52	21	16	63	53	41	610	120	250	540	430	340	450	520	E ₅ =200	E ₇ =500	64	I ₈
4	35	56	61	12	24	43	63	52	420	210	160	650	530	350	560	610	E ₆ =100	E ₈ =600	45	I ₃
5	34	45	51	12	26	63	53	42	620	210	150	540	430	340	450	510	E ₇ =500	E ₇ =100	64	I ₆
6	34	45	51	12	26	63	53	42	620	210	150	540	430	340	450	510	E ₂ =500	E ₈ =100	64	I ₁
7	35	56	61	14	42	23	63	54	240	410	160	650	530	350	560	610	E ₁ =100	E ₂ =600	25	I ₄
8	24	46	61	13	35	52	62	43	530	310	160	640	420	460	240	610	E ₁ =100	E ₂ =600	54	I ₇
9	24	45	51	13	36	62	52	43	630	310	150	540	420	240	450	510	E ₃ =100	E ₅ =500	64	I ₂
10	34	46	62	25	51	13	63	45	150	520	260	640	430	340	460	620	E ₄ =200	E ₆ =600	14	I ₅
11	24	46	63	31	15	52	62	41	510	130	360	640	420	240	460	530	E ₄ =300	E ₆ =600	54	I ₇
12	24	45	53	31	16	62	52	41	610	130	350	540	420	240	450	530	E ₅ =300	E ₇ =500	64	I ₂
13	24	45	53	31	16	62	52	41	610	130	350	540	420	240	450	530	E ₅ =300	E ₈ =500	64	I ₅
14	25	56	63	31	14	42	62	51	410	130	360	650	520	250	560	630	E ₁ =600	E ₇ =300	45	I ₈
15	24	45	53	31	16	62	52	41	610	130	350	540	420	240	450	530	E ₇ =500	E ₈ =300	64	I ₃
16	24	45	53	31	16	62	52	41	610	130	350	540	420	240	450	230	E ₁ =300	E ₃ =500	64	I ₆
17	25	56	63	34	41	12	62	54	140	430	360	650	520	250	560	630	E ₇ =300	E ₄ =600	15	I ₁
18	14	46	62	23	35	51	61	43	530	320	260	640	410	140	460	620	E ₃ =200	E ₄ =600	54	I ₄
19	14	45	52	23	36	61	51	43	530	320	250	540	410	140	450	520	E ₄ =200	E ₆ =500	64	I ₇
20	24	46	63	35	51	12	62	45	150	530	360	640	420	240	460	630	E ₃ =300	E ₇ =600	14	I ₂
21	23	36	64	41	15	52	62	31	510	140	460	630	320	230	360	640	E ₃ =400	E ₇ =600	53	I ₄
22	23	35	54	41	16	62	52	31	610	140	450	530	320	230	350	540	E ₆ =400	E ₈ =500	63	I ₇
23	23	35	54	41	16	62	52	31	610	140	450	530	320	230	350	540	E ₁ =500	E ₇ =400	63	I ₂
24	24	46	65	51	13	32	62	41	310	150	560	640	420	240	460	650	E ₂ =600	E ₈ =500	34	I ₅
25	23	35	54	41	16	62	52	31	610	140	450	530	320	230	350	540	E ₁ =400	E ₃ =500	63	I ₈
26	23	35	54	41	16	62	52	31	610	140	450	530	320	230	350	540	E ₂ =400	E ₄ =500	63	I ₃
27	24	46	65	53	31	12	62	43	130	350	560	640	420	240	460	650	E ₃ =500	E ₅ =600	14	I ₆

Окончание табл. 5.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
28	13	36	64	42	25	51	61	32	520	240	460	630	310	130	360	640	E ₄ =400	E ₆ =600	53	I ₁
29	13	35	54	42	26	61	51	32	620	240	450	530	310	130	350	540	E ₅ =400	E ₇ =500	63	I ₄
30	23	36	64	45	51	12	62	35	150	540	460	630	320	230	360	640	E ₆ =400	E ₈ =600	13	I ₇
31	23	36	65	51	14	42	62	31	410	150	560	630	320	230	360	650	E ₆ =500	E ₈ =600	43	I ₁
32	23	35	54	41	16	62	52	31	610	140	450	530	320	230	350	540	E ₁ =500	E ₇ =400	63	I ₄
33	23	35	54	41	16	62	52	31	610	140	450	530	320	231	350	540	E ₂ =500	E ₈ =600	63	I ₇
34	24	46	65	51	13	32	62	41	310	150	560	640	420	240	460	650	E ₁ =500	E ₃ =600	34	I ₂
35	23	35	54	41	16	62	52	31	610	140	450	510	320	230	350	540	E ₂ =400	E ₄ =500	63	I ₅
36	23	35	54	41	16	62	52	31	610	140	450	510	320	230	350	540	E ₃ =400	E ₅ =500	63	I ₈
37	24	46	65	53	31	12	62	43	130	350	560	640	420	240	460	650	E ₄ =500	E ₆ =600	14	I ₃
38	13	36	64	42	25	51	61	32	520	240	460	630	310	130	360	640	E ₅ =400	E ₇ =600	53	I ₆
39	13	35	54	42	26	61	51	32	620	240	450	530	310	130	350	540	E ₆ =400	E ₈ =500	63	I ₁
40	23	36	65	54	41	12	62	34	140	450	560	630	320	230	360	650	E ₁ =400	E ₇ =500	13	I ₄
41	23	35	56	61	14	42	52	31	410	160	650	530	320	230	350	560	E ₁ =500	E ₇ =600	43	I ₆
42	23	34	45	51	16	62	42	31	610	150	540	430	320	230	340	450	E ₂ =400	E ₈ =500	63	I ₁
43	23	34	45	51	16	62	42	31	610	150	540	430	320	230	340	450	E ₁ =500	E ₃ =400	63	I ₄
44	24	45	56	61	13	32	52	41	310	160	650	540	420	240	450	560	E ₂ =600	E ₄ =500	34	I ₇
45	23	34	45	51	16	42	31	62	610	150	540	430	320	230	340	450	E ₃ =500	E ₅ =400	63	I ₂
46	23	34	45	51	16	42	31	610	150	540	430	320	230	340	450	560	E ₄ =500	E ₆ =600	63	I ₅
47	24	45	56	63	31	12	52	43	160	360	650	540	420	240	450	560	E ₅ =600	E ₇ =500	14	I ₈
48	13	35	56	62	24	41	51	32	420	260	650	530	310	130	350	560	E ₆ =600	E ₈ =500	43	I ₃
49	13	34	45	52	26	61	41	32	620	250	540	430	310	130	340	450	E ₁ =400	E ₇ =500	63	I ₆

Таблица 5.2

№ вет-та	Uм, В	ψ _н , град	Номер ветви и ее «начало» и «конец»				R ₁ Ом	L ₁ мГн	C ₁ мкФ	R ₂ Ом	L ₂ мГн	C ₂ мкФ	R ₃ Ом	L ₃ мГн	C ₃ мкФ	R ₄ Ом	L ₄ мГн	C ₄ мкФ	U _н , В
			1	2	3	4													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	141	0	12	23	23	12	25	96	200	-	127	106	10	-	53	30	-	-	12
1	71	30	12	23	23	-	60	-	106	100	509	20	30	191	-	-	-	-	23
2	282	45	12	23	-	12	30	191	250	50	-	53	-	-	-	10	127	106	18
3	282	60	12	23	23	12	-	32	320	20	191	-	15	159	40	-	127	-	12
4	369	-45	12	23	23	12	80	191	-	-	238	106	40	159	-	25	32	-	12
5	71	-30	12	23	23	-	30	-	315	100	-	20	70	251	-	-	-	-	23
6	282	-60	12	-	23	12	100	127	400	-	-	-	20	-	53	30	64	53	23
7	100	0	12	-	23	12	50	-	320	-	-	-	50	16	106	50	-	53	13
8	564	45	12	23	-	12	10	16	250	45	238	106	-	-	-	-	64	-	12
9	128	30	12	23	23	-	70	127	-	25	64	53	25	-	20	-	-	-	23
10	141	-30	12	-	23	12	2	-	637	-	-	-	4	15,9	-	3	-	300	23
11	71	-45	12	23	23	-	40	19,1	-	-	637	-	40	31,8	-	-	-	-	23
12	85	0	12	23	-	12	8	15,9	-	10	-	318	-	-	-	4	-	-	13
13	282	-60	12	23	-	12	-	8	637	3	15,9	300	-	-	-	4	-	-	13
14	180	45	12	-	23	12	10	15,9	-	-	-	-	100	115	100	4	1000	-	13
15	114	-30	12	23	23	-	35	-	-	20	15,9	159	-	31,8	-	-	-	-	12
16	71	0	12	23	23	-	10	31,8	-	8	-	1600	10	95	-	-	-	-	12
17	141	-60	12	-	23	12	15	-	637	-	-	-	10	-	159	-	95	-	23
18	564	45	12	23	-	12	15	-	637	10	-	159	-	-	-	-	95	-	23
19	71	30	12	23	23	-	4	9,55	-	40	-	318	4	-	-	-	-	-	13
20	86	60	12	-	23	12	35	15,9	-	-	-	-	20	-	-	-	31,8	-	12
21	71	60	12	-	23	12	2	-	637	-	-	-	3	-	300	4	15,9	-	12
22	86	-30	12	23	23	-	10	15,9	-	4	1000	-	100	115	100	-	-	-	23
23	114	45	12	23	23	12	10	15,9	637	4	1000	-	100	115	-	10	-	-	13
24	34	0	12	23	-	12	5	15,9	637	10	-	-	-	-	-	8	6,37	-	23

Окончание табл. 5.2

25	141	30	12	23	23	-	5	-	637	10	15,9	-	8	6,37	-	-	-	-	13
26	114	-60	12	-	23	12	10	31,8	-	-	-	-	2	-	1600	10	95	-	23
27	141	-45	12	23	-	12	15	-	-	10	-	159	-	-	-	-	95	-	23
28	128	0	12	-	23	12	15	-	637	-	-	-	10	-	159	-	95	-	12
29	141	60	12	23	-	12	6	25	-	4	9	-	-	-	-	-	-	159	23
30	564	-30	12	23	23	12	-	96	200	-	127	106	-	-	53	-	95	-	13
31	100	30	12	23	-	12	8	15,9	-	10	-	318	-	-	-	4	-	-	23
32	71	0	12	-	23	12	40	15,9	-	-	-	-	-	-	637	10	31,8	-	13
33	71	60	12	23	-	12	8	15,9	-	10	-	318	-	-	-	4	-	-	12
34	282	45	-	23	23	12	-	-	-	15	-	637	6	10	159	-	95	-	23
35	71	-60	12	23	-	12	5	-	637	10	15,9	-	-	-	-	8	6,37	-	12
36	142	-45	12	23	-	12	5	15,9	-	10	-	318	-	-	-	-	31,8	-	23
37	180	-45	-	23	23	12	-	-	-	25	96	-	-	127	-	10	-	53	13
38	141	-30	12	-	23	12	-	159	106	-	-	-	100	-	20	-	-	43	12
39	71	30	12	23	-	12	50	-	320	-	127	-	-	-	-	50	-	53	12
40	282	0	-	23	23	12	-	-	-	60	238	-	40	106	-	25	32	-	13
41	34	0	12	23	-	12	50	64	-	70	-	20	-	-	-	50	-	-	23
42	564	30	12	-	23	12	10	-	250	-	-	-	45	238	-	-	127	-	12
43	128	-60	12	23	-	12	10	31,8	-	2	-	1600	-	-	-	10	95	-	23
44	141	-45	-	23	23	12	-	-	-	6	25	-	4	9	-	-	-	637	12
45	71	0	-	23	23	12	-	-	-	8	-	-	10	15,9	318	4	-	-	23
46	100	60	12	23	23	12	6	25	-	4	9	-	-	-	637	-	-	159	13
47	564	-30	12	23	-	12	40	19,1	-	-	-	637	-	-	-	40	31,8	-	23
48	282	0	-	23	23	12	-	-	-	35	15,9	-	20	-	159	-	31,8	-	13
49	114	45	-	23	23	12	-	12	-	5	15,9	318	10	31,8	-	-	-	-	23

Таблица 5.3

№ в-га	Схема соединения приемника	U _н , В	ψ, град	Z _a (Z _{ab}), Ом		Z _b (Z _{bc}), Ом		Z _c (Z _{ca}), Ом	
				R	±jX	R	±jX	R	±jX
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	Δ	127	ψ _{ab} = 0	0	+j16,8	8	0	14,2	-j6
1	Δ	127	ψ _{ab} = 30°	4	+j6	0	-j10	12	+j16
2	Δ	220	ψ _{ab} = 0	16	+j12	8	+j14,2	0	+j14,2
3	Δ	380	ψ _{ab} = 0	20	0	4	+j10	20	+j14,2
4	Δ	380	ψ _{ab} = 30°	8	-j15	8	+j12	16,2	+j14,2
5	Δ	220	ψ _{ab} = 30°	12	+j10	0	-j10	12	+j10
6	Y	380	ψ _a = 0	0	+j8	12	+j14	14	0
7	Y	127	ψ _a = 30°	8	+j6	10	0	12	-j15
8	Y	220	ψ _{ab} = 0	9	+j8	0	+j10	24	+j18
9	Y	220	ψ _{ab} = 30°	16	-j15	4	+j16,2	15	-j16
10	Y	380	ψ _{ab} = 30°	0	+j10	12	+j16,2	0	-j10
11	Y	127	ψ _a = 0	16,8	+j14	6	+j8	14	-j16,2
12	Δ	220	ψ _{ab} = 0	7	-j15	14,2	0	20	+j24
13	Δ	380	ψ _{ab} = 0	4	0	8	-j16,2	10	0
14	Δ	127	ψ _{ab} = 30°	18	-j12	6	+j12	4	+j3
15	Δ	220	ψ _{ab} = 30°	24	+j30	22	+j20	8	+j6
16	Y	220	ψ _a = 0	6	+j8	8	+j6	3	+j4
17	Y	220	ψ _a = 30°	6	0	8	+j6	4	+j3
18	Y	220	ψ _{ab} = 0	8	+j6	8	0	6	+j8
19	Y	220	ψ _{ab} = 30°	10	+j8	5	+j9	3	0
20	Δ	220	ψ _{ab} = 0	5	+j7	0	+j10	8	+j6
21	Δ	220	ψ _{ab} = 0	0	+j5	8	+j6	3	+j4
22	Y	380	ψ _a = 0	10	0	12	-j16	10	+j20
23	Y	380	ψ _a = 30°	4	+j6	0	-j12	5	+j8
24	Y	380	ψ _{ab} = 0	16	-j12	8	-j6	6	+j8
25	Y	380	ψ _{ab} = 30°	6	+j8	3	-j4	15	+j8

52

Окончание табл. 5.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
26	Δ	380	ψ _{ab} = 0	8	+j15	6	-j8	4	+j3
27	Δ	380	ψ _{ab} = 30°	8	-j6	15	+j8	3	+j5
28	Δ	220	ψ _{ab} = 0	10	+j4	3	+j4	9	-j12
29	Δ	380	ψ _{ab} = 30°	10	+j3	4	-j3	12	+j9
30	Y	380	ψ _a = 0	20	0	0	+j12	0	-j12
31	Δ	220	ψ _{ab} = 0	11	+j13	6	+j8	18	-j24
32	Δ	380	ψ _{ab} = 0	19	+j16	8	-j8	24	+j18
33	Y	220	ψ _{ab} = 0	20	0	12	+j16	18	-j24
34	Y	380	ψ _{ab} = 30°	20	+j16	16	-j12	12	+j9
35	Y	380	ψ _{ab} = 30°	22	+j17	3	+j2	9	-j12
36	Y	380	ψ _{ab} = 30°	0	+j38	2	-j2	6	+j8
37	Y	220	ψ _a = 30°	0	+j20	18	+j24	4	-j3
38	Y	380	ψ _a = 0	24	-j18	0	+j19	3	+j4
39	Δ	127	ψ _{ab} = 0	8	+j8	8	+j6	6	-j6
40	Δ	220	ψ _{ab} = 30°	8	-j8	8	+j6	6	+j8
41	Δ	380	ψ _{ab} = 0	8	+j4	6	-j4	3	+j8
42	Δ	127	ψ _{ab} = 0	16,8	+j8	3	-j14,2	6	+j4
43	Δ	220	ψ _{ab} = 30°	6	-j4	14,2	+j3	16,8	+j8
44	Δ	380	ψ _{ab} = 0	4	+j8	6	+j3	4	+j8
45	Y	127	ψ _a = 30°	16,8	+j8	8	+j14,2	6	+j4
46	Y	220	ψ _a = 0	8	-j16,8	14,2	+j8	4	+j6
47	Y	380	ψ _{ab} = 0	16,8	+j14,2	8	-j8	6	-j4
48	Y	127	ψ _{ab} = 30°	16	+j8	8	+j6	14,2	+j8
49	Y	380	ψ _a = 0	4	+j8	6	+j3	4	+j8

53

Таблица 5.4

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
K_1	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	0,5	0,6	0,7	0,8
K_2	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
K_3	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,7	1,6	1,9	1,8
№	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
K_1	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	0,5	0,6	0,7
K_2	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,3	1,5	1,4
K_3	0,5	2,0	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1	1,0	2,0	1,9	1,8	1,7	1,5	1,2	1,3

ЛИТЕРАТУРА

1. Электротехника: учебник для неэлектротехнических специальностей вузов/ Под редакцией В.Г. Герасимова. – М.: Высшая школа, 1985. – 480 с.
2. Иванов И.И., Равдоник В.С. Электротехника: учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1984. – 375 с.
3. Рекус Г.Г., Белоусов А.И. Сборник задач по электротехнике и электротехнике: учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1991. – 416 с.
4. Сборник задач по электротехнике и электронике (под ред. В.Г. Герасимова): учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1987. – 288 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Программа раздела «Электрические цепи»	4
2. Электрические цепи постоянного тока	6
2.1. Общие сведения	6
2.2. Расчет цепей постоянного тока	7
2.3. Расчет сложных электрических цепей	10
2.4. Вопросы для проверки	16
2.5. Задачи	18
3. Однофазные электрические цепи синусоидального тока .	20
3.1. Общие сведения	20
3.2. Комплексный метод расчета электрических цепей синоидального тока	21
3.3. Пассивные элементы в цепи синусоидального тока . . .	22
3.4. Законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме	23
3.5. Мощность однофазной цепи синусоидального тока . . .	23
3.6. Методы расчета однофазных цепей синусоидального тока	24
3.7. Анализ простых однофазных цепей синусоидального тока	24
3.8. Методика расчета однофазных цепей синусоидального тока	30
3.9. Построение векторной диаграммы	30
3.10. Вопросы для самопроверки	31
3.11. Задачи	32

4. Трехфазные электрические цепи	34
4.1. Общие сведения	34
4.2. Мощность трехфазной цепи	35
4.3. Анализ трехфазных электрических цепей.....	36
4.4. Вопросы для самопроверки	41
4.5. Задачи	42
5. Контрольная работа	44
5.1. Общие методические указания	44
5.2. Задачи	46
Литература	55

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Составители: **Горошко** Владимир Иванович
Краевская Наталья Павловна
Ларионов Алексей Александрович
Полищук Александр Александрович

Редактор М.Ф. Мурашко

Подписано в печать 22.06.2005. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 3,3. Уч.-изд. л. 3,4.
Тираж 600 экз. Заказ 439.

Учреждение образования
«Белорусский государственный технологический университет»
220050. Минск, Свердлова, 13а.
ЛИ № 02330/0133255 от 30.04.2004.

Отпечатано в лаборатории полиграфии учреждения образования
«Белорусский государственный технологический университет».
220050. Минск, Свердлова, 13.
ЛП № 02330/0056739 от 22.01.2004.