

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Л.Н. Горбунова, С.А. Гусева

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Часть первая

Учебное пособие

Рекомендовано

*Дальневосточным региональным учебно-методическим центром
(ДВ РУМЦ) в качестве учебного пособия
для студентов направления подготовки бакалавров
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» вузов региона
(Протокол №12 от 16.02.2015 г.)*

Благовещенск
Издательство ДальГАУ
2015

УДК 621.3 (075.8)

ББК 31.21

Горбунова Л.Н. Теоретические основы электротехники / Горбунова Л.Н., Гусева С.А. – Благовещенск: ДальГАУ, 2015. – 116 с.

Учебное пособие подготовлено в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

Предназначено для выполнения самостоятельных и контрольных работ студентами всех форм обучения по направлению подготовки 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника.

Рецензенты:

И.А. Худоногов,

д-р техн.наук, профессор кафедры электроснабжения железнодорожного транспорта Иркутского государственного университета;

А.Н. Козлов,

канд.техн.наук, доцент кафедры энергетики
Амурского государственного университета

© Горбунова Л.Н., Гусева С.А., 2015

ISBN 978-5-9642-0269-1

© Издательство ДальГАУ, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ.....	6
1 ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	8
1.1 Основные понятия и величины электрических цепей постоянного тока.....	8
1.2 Законы электрических цепей постоянного тока.....	12
1.3 Некоторые методы расчетов электрических цепей постоянного тока.....	15
1.3.1 Составление уравнений для расчета токов в схеме с помощью законов Кирхгофа	15
1.3.2 Запись законов Кирхгофа в матричной форме.....	17
1.3.3 Метод контурных токов	18
1.3.4 Метод узлового напряжения (двух узлов).....	20
1.3.5 Потенциальная диаграмма замкнутого контура	21
1.4 Пример расчета задачи Линейные электрические цепи постоянного тока.....	22
1.4.1 Определение токов по законам Кирхгофа.....	23
1.4.2 Матричная форма записи уравнений по законам Кирхгофа	24
1.4.3 Метод контурных токов	25
1.4.4 Метод узлового напряжения	27
1.4.5 Составление баланса мощностей для заданной схемы	28
1.4.6 построение потенциальной диаграммы	29
Задание для самостоятельного выполнения.....	31
Тестовое задание №1 Электрические цепи постоянного тока	39
2 ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА	44
2.1 Основные понятия и величины электрических цепей переменного тока.....	44
2.2 Способы изображения синусоидальных величин	46
2.2.1 Графические способы изображения синусоидальных величин	46
2.2.2 Аналитические способы изображения синусоидальных величин	47
2.3 Основные элементы электрической цепи переменного тока	49
2.3.1 Цепь переменного тока с активным сопротивлением.....	49
2.3.2 Цепь переменного тока с индуктивностью	50

2.3.3 Цепь переменного тока с емкостью	53
2.4 Пример расчета задачи. Линейные электрические цепи однофазного синусоидального тока.....	54
2.4.1 Определение эквивалентного сопротивления цепи Z в алгебраической и показательной формах	55
2.4.2 Определение токов во всех ветвях цепи	57
2.4.3 Определение напряжений на отдельных участках цепи.....	57
2.4.4 Баланс мощностей.....	58
2.4.5 Построение топографической диаграммы напряжений и векторной диаграммы токов	59
Задание для самостоятельного выполнения	61
Тестовое задание №2 Электрические цепи переменного однофазного тока.....	65
3 ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ	70
3.1 Трехфазная система. Источник трехфазного напряжения.....	70
3.2 Способы соединения обмоток трехфазной системы	72
3.2.1 Соединение обмоток генератора и приемников энергии в звезду....	72
3.2.2 Соединение обмоток генератора и приемников энергии в треугольник.....	75
3.3 Пример расчета задачи. Трехфазные электрические цепи	77
3.3.1 Составление электрической схемы трехфазной системы.....	78
3.3.2 Расчет токов в фазах нагрузки и линейных проводах.....	79
3.3.3 Определение напряжений на отдельных участках цепи.....	83
3.3.4 Расчет мощности трехфазной несимметричной системы.....	84
3.3.5 Построение совмещенной векторной диаграммы токов и топографической диаграммы напряжений	85
Задание для самостоятельного выполнения	88
Тестовое задание №3 Трёхфазные электрические цепи переменного тока.....	108
ТАБЛИЦА ОТВЕТОВ НА ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ.....	113
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	114
Приложение 1 (справочное)	
Пример оформления титульного листа РГЗ.....	115
Приложение 2 (справочное)	
Пример оформления титульного листа контрольной работы.....	116

ВВЕДЕНИЕ

Расчетно-графическое задание (РГЗ), так же, как и контрольная работа, является самостоятельной работой студента в курсе изучения дисциплины «Теоретические основы электротехники». Выполнение данной работы позволит закрепить и углубить знания, полученные во время изучения теоретического материала, а также выработать навыки применения теоретических знаний для решения конкретных практических задач с умением оформлять технические документы.

В соответствии с действующей программой курса «Теоретические основы электротехники» работа должна содержать:

- титульный лист (приложение 1,2);
- содержание;
- основная часть;
- заключение;
- список использованной литературы.

Количество задач в работе определяется ведущим преподавателем.

Методические указания к выполнению работы

Расчетно-графическое задание (контрольная работа) выполняется на одной стороне листа писчей бумаги формата А4 (297х210мм). Вся работа выполняется в текстовом редакторе Microsoft Word, шрифт Times New Roman 14, интервал 1,5. По всем четырем сторонам листа оставляются поля: верхнее, нижнее и правое - 15 мм, левое - 30 мм. Страница должна содержать не менее 28 строк.

Вся графическая часть работы (схемы, диаграммы) выполняется с помощью графического редактора (например, Microsoft Visio).

Каждая задача работы должна начинаться с листа, на котором представлено задание: схема, исходные данные к ней, а также величины, которые необходимо определить.

При выполнении заданий необходимо выполнять следующие требования:

1. Уяснить содержание задачи, изобразить электрическую схему, выяснить возможность упрощения схемы и наглядного её изображения.

2. Составить план решения задачи. При этом полезно изучить методику решения задач данного типа по рекомендуемой литературе, указать, какие физические законы или расчётные методы предполагается использовать, привести математическую запись этих законов и методов. Обязательно сопровождать решение задачи пояснительным текстом и комментировать полученные результаты.

3. В ходе решения задачи не следует изменять уже принятые ранее направления электрических величин, название узлов, а также обозначения, заданные исходными условиями.

4. Формулы должны нумероваться арабскими цифрами в пределах раздела. Номер формулы состоит из номера раздела и порядкового номера формулы и его записывают справа в круглых скобках, на одинаковом расстоянии от правого поля на всех страницах текста. Ссылки в тексте на порядковые

номера формул дают в круглых скобках, например: в формуле (1.1). Уравнения и системы уравнений нумеруются вместе с формулами.

5. При нахождении каждой определяемой величины расчёт необходимо выполнять сначала в общем виде, а затем в полученную формулу подставить числовые значения и привести окончательный результат с указанием единиц измерения (единицы физических величин должны соответствовать ГОСТу).

6. Промежуточные расчёты, если они сравнительно невелики, можно опускать. Расчёты рекомендуется выполнять до трёх или четырёх значащих цифр.

7. Таблицы должны иметь точное краткое название, подписываться сверху в соответствии с номером раздела и порядкового номера таблицы.

8. Электрические схемы вычерчивают с соблюдением ГОСТов с помощью графического редактора. Буквенные обозначения элементов схемы должны соответствовать ГОСТу.

9. Диаграммы и графики вычерчивают с помощью графического редактора в масштабе. Векторные диаграммы строят в масштабе, который указывается в виде: $m_U = В/мм$; $m_I = А/мм$. При построении кривых нужно выбирать такой масштаб, чтобы на 1см оси координат приходилось $1 \cdot 10^{\pm n}$ или $2 \cdot 10^{\pm n}$ единиц измерения физической величины, где n - целое число. Градуировку осей выполнять, начиная с нуля, равномерно через один или два сантиметра. Весь график в целом и отдельные кривые на нём должны иметь названия.

10. Иллюстрации должны быть расположены после первого упоминания в тексте записи. Она должна иметь наименование и пояснительные данные (подрисуночный текст).

11. Если работа не зачтена или зачтена при условии внесения исправлений, то все необходимые поправки делают на белой стороне листа, при этом не внося какие-либо исправления в текст, расчёты или графики, просмотренные преподавателем.

1 ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1 Основные понятия и величины электрических цепей постоянного тока

Электрическая цепь - это совокупность электротехнических устройств, предназначенных для производства, передачи, преобразования и использования электрического тока.

Электрическую цепь принято изображать в виде различного рода схем: монтажные, принципиальные, замещения. На них показываются основные и вспомогательные элементы схемы, а также соединение.

Электрическая схема - это графическое изображение электрической цепи, включающее в себя условные обозначения устройств и показывающее соединение этих устройств.

Все электротехнические устройства по назначению, принципу действия и конструктивному оформлению можно разделить на три большие группы:

1 Источники энергии (генерирующие устройства) - устройства, вырабатывающие электрический ток. Эти устройства любой вид энергии преобразуют в электрическую энергию. Примерами таких устройств могут быть генераторы, термоэлементы, фотоэлементы, химические элементы и т.д.

2 Нагрузка (приемные устройства или потребители)- устройства, потребляющие электрический ток. Эти устройства электрическую энергию преобразуют в любой другой вид энергии(механическая, химическая, тепловая, световая и д.р.).Примерами таких устройств могут быть электродвигатели, электролампы, электромеханизмы и т.д.

3 Вспомогательные элементы– проводники (соединительные провода), а также различная *коммутационная аппаратура* (ключи, выключатели, реле, контакторы и т.д.), электроизмерительные приборы.

По способу соединения схем (по сложности) выделяются два вида:

а) неразветвленные (простые) – последовательное соединение элементов (рис.1, а);

б) разветвленные (сложные) – параллельное или смешанное соединение элементов (рис.1,б).

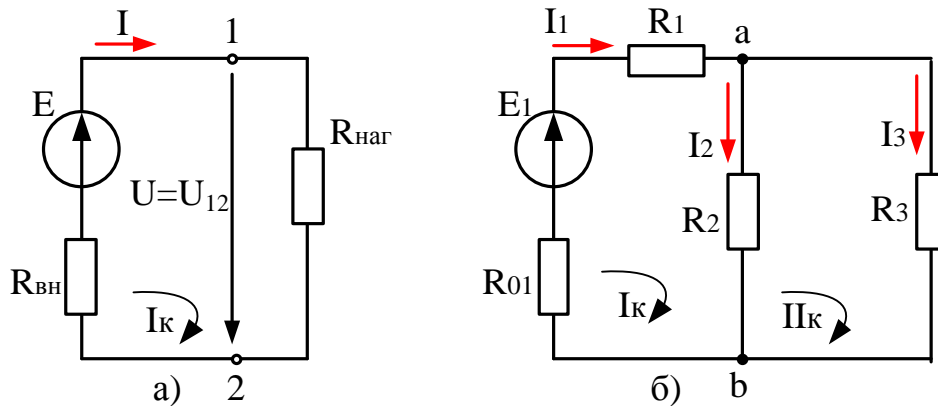


Рис.1. Электрическая схема цепи постоянного тока:
а) неразветвленная; б) разветвленная

Последовательным называют такой вид соединения участков цепи, при котором через все элементы проходит один и тот же ток (рис.1, а).

При параллельном соединении все участки цепи присоединяются к одной паре узлов, находятся под одним и тем же напряжением (рис.1, б – элементы R_2 и R_3).

Разветвленные электрические схемы всегда содержат ветвь, узел, контур. Участок электрической цепи, по которому проходит один и тот же ток, называется ветвью (в схеме рис.1,б – три ветви).

Место соединения двух и более ветвей электрической цепи называется узлом (рис.1,б – два узла).

Любой замкнутый путь, включающий в себя несколько ветвей, называется контуром (рис.1,а – один контур, рис.1,б – два контура).

Для работы электрической цепи необходимо наличие источников энергии. В любом источнике за счет сторонних сил неэлектрического происхождения создается электродвижущая сила (ЭДС).

На зажимах источника возникает разность потенциалов или напряжение, под воздействием которого во внешней, присоединенной к источнику части цепи возникает электрический ток.

Направленное движение электрических зарядов называют *электрическим током*. Электрический ток, направление и величина которого неизменны, называют *постоянным* током. Единицей силы тока является ампер.

$$I = \frac{q}{t}; \quad \left[\frac{\text{Кл}}{\text{с}} = \text{А} \right], \quad (1.1)$$

где q – электрический заряд, Кл;

t – время перемещения заряда, с.

Плотность тока

$$J = \frac{I}{S}; \quad \left[\frac{\text{А}}{\text{мм}^2} \right], \quad (1.2)$$

где S – площадь поперечного сечения, мм².

Для перемещения заряда по замкнутой электрической цепи источник электрической энергии должен совершать работу, численно равную ЭДС (рис.1, а).

$$E = \frac{A}{q}; \quad \left[\frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В} \right]. \quad (1.3)$$

В этом случае мощность, развиваемая источником

$$P = E \cdot I; \quad [\text{В} \cdot \text{А} = \text{Вт}]. \quad (1.4)$$

Значит, чтобы поддерживать ток, источник электрической энергии должен создавать *разность потенциалов* на входных зажимах электрической цепи.

Разность потенциалов между двумя точками цепи называют *напряжением* или *падением напряжения* (рис.1,а).

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2, \quad [\text{В}]. \quad (1.5)$$

Напряжение – работа, связанная с перемещением единичного электрического заряда из одной точки цепи в другую под действием электрического поля

$$U = \frac{I}{q}; \left[\frac{A}{\text{Кл}} = B \right]. \quad (1.6)$$

Напряжение в цепи постоянного тока всегда направлено в противоположную сторону ЭДС, хотя единица измерения для этих величин одинаковая (рис.1,а).

Различают активные и пассивные цепи, участки и элементы цепей. *Активными* называют электрические цепи, содержащие источники энергии, *пассивными* - электрические цепи, не содержащие источников энергии.

Элемент цепи, в котором происходит необратимый процесс преобразования электрической энергии в тепловую энергию, называется *электрическим сопротивлением*.

В реальной цепи электрическим сопротивлением обладают не только реостат или резистор, но и проводники, катушки, конденсаторы и т.д.

Сопротивление проводника – противодействие электрической цепи прохождению электрического тока.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}; \left[\text{Ом} \cdot \text{мм} \cdot \frac{\text{мм}}{\text{мм}^2} = \text{Ом} \right], \quad (1.7)$$

где ρ – удельное сопротивление, Ом·мм;

l – длина проводника, мм;

S – сечение проводника, мм².

Величина, обратная сопротивлению, называется *проводимостью*. Это есть способность проводника пропускать электрический ток.

$$g = \frac{1}{R}; \left[\frac{1}{\text{Ом}} = \text{Ом}^{-1} = \text{См} \right]. \quad (1.8)$$

Сопротивление пассивного участка цепи в общем случае определяется

$$R = \frac{P}{I^2}; \left[\frac{\text{Вт}}{\text{А}^2} = \frac{\text{А} \cdot \text{В}}{\text{А} \cdot \text{А}} = \frac{\text{В}}{\text{А}} = \text{Ом} \right]. \quad (1.9)$$

1.2 Законы электрических цепей постоянного тока

Закон Джоуля-Ленца

Количество теплоты, выделенное при прохождении постоянного тока в проводнике равно

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t = U \cdot I \cdot t = P \cdot t; \quad [B \cdot A \cdot c = Дж]. \quad (1.10)$$

Закон Ома

Взаимосвязь трех основных электрических величин – тока, напряжения и сопротивления – есть закон Ома.

Этот закон рассматривается для активного и пассивного участков цепи.

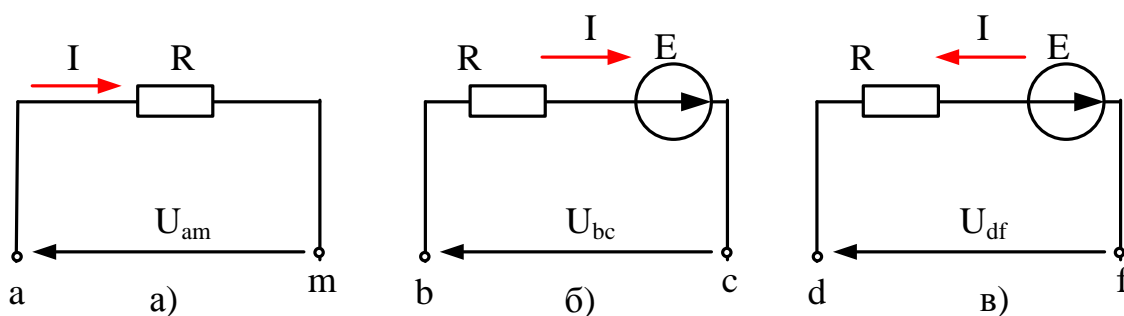


Рис.2. Участки электрической цепи постоянного тока:

а) пассивный участок; б) и в) активный участок.

Закон Ома для пассивного участка электрической схемы (рис.2, а)

$$I = \frac{U_{am}}{R} = \frac{\varphi_a - \varphi_m}{R}; \quad \left[\frac{B}{\text{Ом}} \right. \\ \left. = A \right]. \quad (1.11)$$

Закон Ома для активных участков электрической схемы, изображенных на рисунке 2:

$$\text{для рисунка 2(б)} \quad I = (E - U_{bc})/R;$$

$$\text{для рисунка 2 (в)} \quad I = (-E + U_{df})/R.$$

Примечание: если ЭДС и напряжение совпадают с выбранным направлением тока, то перед ЭДС и напряжением ставится знак «+».

Так как ЭДС и напряжение направлению не совпадают, то, обобщенный закон Ома для активного участка цепи имеет вид

$$I = \frac{\pm E \mp U}{R}; \left[\frac{B}{O_M} = A \right]. \quad (1.12)$$

Законы Кирхгофа

Первый закон Кирхгофа применяется к узлам электрических цепей.

Алгебраическая сумма токов, проходящих через узел схемы, равна нулю

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (1.13)$$

Примечание: входящие в узел токи записываются со знаком «+», выходящие из узла -со знаком «-».

Для схемы (рис. 1,б) первый закон Кирхгофа имеет вид $I_1 - I_2 - I_3 = 0$.

Физический смысл данного закона – заряд в узле не накапливается.

Второй закон Кирхгофа применяется для любого замкнутого контура. Закон устанавливает зависимость ЭДС от напряжения в замкнутом контуре. Так как контур может быть пассивным (нет источников питания) или активным (есть источники питания), то второй закон Кирхгофа имеет два вида.

В замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма напряжений на его ветвях равна нулю (пассивный контур)

$$\sum_{k=1}^n U_k = 0. \quad (1.14)$$

В замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма падений напряжения в пассивных элементах равна алгебраической сумме ЭДС этого контура (активный контур)

$$\sum_{k=1}^n I_k \cdot R_k = \sum_{k=1}^m E_k. \quad (1.15)$$

Для рисунка 1 (б) второй закон Кирхгофа имеет вид:

И к – активный контур: $I_1 \cdot (R_{01} + R_1) + I_2 \cdot R_2 = E_1$;

II к – пассивный контур: $I_3 \cdot R_3 - I_2 \cdot R_2 = 0$.

Примечание: если ЭДС и ток совпадают с выбранным направлением обхода контура, то перед ЭДС и током ставится знак «+».

Баланс мощностей

Составление уравнения баланса мощностей позволяет проверять правильность решения рассматриваемых задач.

В любой электрической цепи сумма мощностей всех источников электрической энергии должна быть равна сумме мощностей всех приемников и вспомогательных элементов этой цепи

$$\sum_{K=1}^m E_K \cdot I_K = \sum_{K=1}^n R_K \cdot I_K^2, \quad (1.16)$$

где $\sum_{K=1}^m E_K \cdot I_K$ – сумма мощностей, развиваемых источниками схемы;

$\sum_{K=1}^n R_K \cdot I_K^2$ – сумма мощностей всех приемников схемы.

Примечание: если положительное направление тока совпадает с направлением ЭДС и в результате расчета получено положительное значение тока, то источник вырабатывает (генерирует) электрическую энергию, то есть работает в режиме генератора. Если же получено отрицательное значение тока, то произведение $E_K \cdot I_K$ отрицательно, значит, источник работает в режиме потребителя и является приемником электрической энергии.

Для рисунка 1(б) уравнение баланса мощностей будет записано в следующем виде:

Левая часть уравнения – это мощность источника (генератора) электрической энергии, правая – мощность потребителя (нагрузки).

1.3 Некоторые методы расчетов электрических цепей постоянного тока

1.3.1 Составление уравнений для расчета токов в схеме с помощью законов Кирхгофа

Все электрические цепи подчиняются двум законам Кирхгофа. Законы Кирхгофа используют для определения токов в ветвях схемы.

Перед составлением уравнений необходимо

- 1) произвольно выбрать положительные направления токов в ветвях;
- 2) выбрать положительные направления обхода (Н.О.) контуров для составления уравнений по второму закону Кирхгофа (с целью единообразия рекомендуется для всех контуров выбирать одно направление, например, по часовой стрелке).

Число необходимых уравнений для электрической цепи равно числу ветвей в схеме.

Для схемы (рис.3) необходимо составить шесть уравнений, так как в схеме шесть ветвей.

Для получения линейно независимых уравнений по первому закону Кирхгофа составляют в количестве, на единицу меньшем количеству узлов в схеме, то есть $(y - 1)$ уравнений.

Недостающее число уравнений составляем по второму закону в количестве $(b - y + 1)$.

Всего в схеме четыре узла, поэтому составляем три уравнения по первому закону Кирхгофа для трех независимых узлов:

$$\begin{cases} \text{узел (1): } I_2 + I_5 - I_6 = 0; \\ \text{узел (2): } -I_1 - I_4 + I_6 = 0; \\ \text{узел (3): } -I_3 + I_4 - I_5 = 0. \end{cases} \quad (1.17)$$

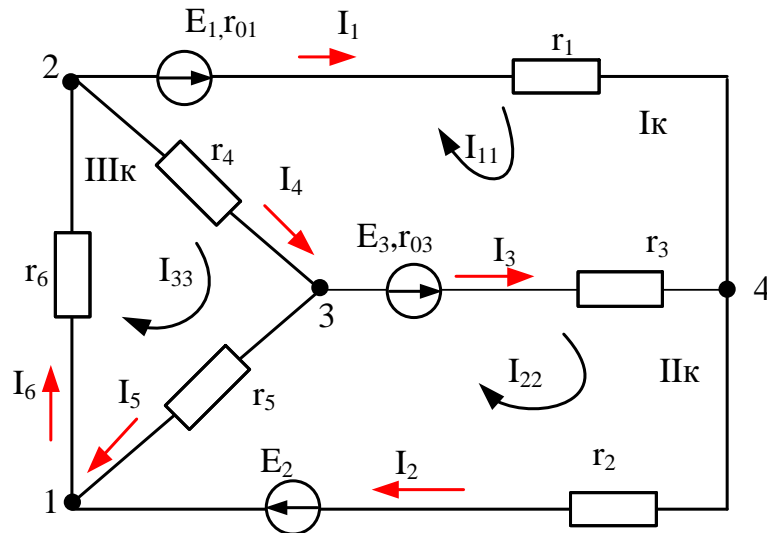


Рис.3. Электрическая схема

Составляя уравнения по второму закону Кирхгофа, необходимо охватить все ветви схемы, исключая ветви с источниками тока (если таковые есть в схеме). При этом в каждый контур должна входить хотя бы одна ветвь, не вошедшая в предыдущий контур. Такие контуры называются независимыми. Это условие является необходимым и достаточным для однозначного определения токов.

Так как неизвестных токов шесть (в схеме шесть ветвей), то составляем еще три уравнения по второму закону Кирхгофа

$$\left\{ \begin{array}{l} I \text{ контур: } I_1(r_1 + r_{01}) - I_3 \cdot (r_3 + r_{03}) - I_4 \cdot r_4 = E_1 - E_3; \\ II \text{ контур: } I_2 \cdot r_2 + I_3(r_3 + r_{03}) - I_5 \cdot r_5 = E_2 + E_3; \\ III \text{ контур: } I_4 \cdot r_4 + I_5 \cdot r_5 + I_6 \cdot r_6 = 0. \end{array} \right. \quad (1.18)$$

Примечание: при составлении уравнений падения напряжения, ЭДС записываются с положительным знаком, если направление тока в сопротивлении контура и ЭДС совпадают с Н.О. контура.

Объединим системы (1.17) и (1.18) в одну, получим систему уравнений для определения токов по закону Кирхгофа

$$\left\{ \begin{array}{l} I_2 + I_5 - I_6 = 0 \\ -I_1 - I_4 + I_6 = 0 \\ -I_3 + I_4 - I_5 = 0 \\ I_1(r_1 + r_{01}) - I_3 \cdot (r_3 + r_{03}) - I_4 \cdot r_4 = E_1 - E_3 \\ I_2 \cdot r_2 + I_3(r_3 + r_{03}) - I_5 \cdot r_5 = E_2 + E_3 \\ I_4 \cdot r_4 + I_5 \cdot r_5 + I_6 \cdot r_6 = 0. \end{array} \right. \quad (1.19)$$

Решая полученную систему из шести уравнений, можно определить токи в ветвях.

Недостатком этого метода является громоздкое решение. Поэтому существуют другие методы расчетов.

1.3.2 Запись законов Кирхгофа в матричной форме

Систему (1.19) можно представить в виде одного матричного уравнения

$$[A] \cdot [I] = [B] \cdot [E], \quad (1.20)$$

где $[A]$ и $[B]$ – квадратные матрицы при токах и напряжениях;

$[I]$ и $[E]$ – матрицы – столбцы токов и ЭДС.

Элементами матрицы $[A]$ являются коэффициенты при токах в левой части уравнения, составленных по законам Кирхгофа.

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 0 \\ (r_1 + r_{01}) & 0 & -(r_3 + r_{03}) & -r_4 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & (r_3 + r_{03}) & 0 & -r_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_4 & r_5 & r_6 \end{bmatrix}.$$

Элементы матрицы $[B]$ равны коэффициентам при ЭДС в правой части уравнений системы (1.19).

Первые три строки матрицы имеют нулевые значения, так как ЭДС в правой части уравнений, записанных по первому закону Кирхгофа, отсутствуют. Остальные строки содержат элементы (1; -1) в зависимости от того, с каким знаком входит ЭДС в уравнения, и 0, если ЭДС в уравнение не входит.

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

$[I]$ и $[E]$ - матрицы-столбцы неизвестных токов и заданных ЭДС

$$[I] = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix}; [E] = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \\ E_6 \end{bmatrix}$$

Подставим матрицы в матричное уравнение (1.20)

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 0 \\ (r_1 + r_{01}) & 0 & (r_3 + r_{03}) & -r_4 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & (r_3 + r_{03}) & 0 & -r_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_4 & r_5 & r_6 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \\ E_6 \end{bmatrix}$$

Рассмотренный метод применения законов Кирхгофа является громоздким из-за большого количества уравнений.

1.3.3 Метод контурных токов

Более простым методом расчета токов в электрических схемах, по сравнению с вышеизложенными, является метод контурных токов (МКТ).

В основу этого метода положено два предположения:

- 1) в каждом независимом контуре протекает свой контурный ток;
- 2) токи в ветвях схемы равны алгебраической сумме контурных токов, протекающих через данную ветвь.

Для МКТ неизвестными являются контурные токи, поэтому число уравнений для решения снижается до числа независимых контуров, то есть до числа уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа.

Действительные токи в ветвях внешних контуров на схеме (рис.3) имеют вид

$$I_1 = I_{11}; I_2 = I_{22}; I_6 = I_{33} \quad .$$

$$(1.21)$$

Токи на участках смежных ветвей равны

$$I_3 = I_{22} - I_{11}; I_4 = I_{33} - I_{11}; I_5 = I_{33} - I_{22}. \quad (1.22)$$

Примечание: если выбранное направление контурного тока совпадает с направлением действительного тока ветви, то перед контурным током ставится знак «+» и наоборот.

Три уравнения для контурных токов составляются, опираясь на второй закон Кирхгофа

$$\begin{cases} I_{11} \cdot r_{11} - I_{22} \cdot r_{12} - I_{33} \cdot r_{13} = E_{11}; \\ -I_{11} \cdot r_{21} + I_{22} \cdot r_{22} - I_{33} \cdot r_{23} = E_{22}; \\ -I_{11} \cdot r_{31} - I_{22} \cdot r_{32} + I_{33} \cdot r_{33} = E_{33}, \end{cases} \quad (1.23)$$

где r_{11}, r_{22}, r_{33} – собственные сопротивления контуров;

$r_{12} = r_{21}; r_{13} = r_{31}; r_{23} = r_{32}$ – сопротивления смежных контуров;

$E_{11}; E_{22}; E_{33}$ – контурные ЭДС.

Для схемы (рис. 3) сопротивления контуров и ЭДС имеют следующий вид:

$$r_{11} = (r_1 + r_{01} + r_3 + r_{03} + r_4); r_{22} = (r_2 + r_3 + r_{03} + r_5); r_{33} = (r_4 + r_5 + r_6);$$

$$r_{12} = r_{21} = (r_3 + r_{03}); r_{13} = r_{31} = r_4; r_{23} = r_{32} = r_5;$$

$$E_{11} = E_1 - E_3; E_{22} = E_2 + E_3; E_{33} = 0.$$

Дальнейший расчёт ведётся методом определителей.

Главный определитель системы составляется с помощью контурных сопротивлений

$$\Delta = \begin{vmatrix} r_{11} & -r_{12} & -r_{13} \\ -r_{21} & r_{22} & -r_{23} \\ -r_{31} & -r_{32} & r_{33} \end{vmatrix}$$

Частные определители контуров получаются заменой в главном определителе столбца сопротивлений столбцом контурных ЭДС.

При нахождении тока в первом контуре ($k=1$) частный определитель имеет вид

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} E_{11} & -r_{12} & -r_{13} \\ E_{22}r_{22} & -r_{23} & \\ E_{33} & -r_{32}r_{33} & \end{vmatrix}$$

Частные определители второго и третьего контура

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} r_{11}E_{11} & -r_{13} \\ -r_{21}E_{22} & -r_{23} \\ -r_{31}E_{33}r_{33} & \end{vmatrix}; \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} r_{11} & -r_{12}E_{11} \\ -r_{21}r_{22}E_{22} & \\ -r_{31} & -r_{32}E_{33} \end{vmatrix}$$

Значения контурных токов определяются с помощью определителей

$$\begin{aligned} I_{11} &= \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad I_{22} = \frac{\Delta_2}{\Delta}; \quad I_{33} \\ &= \frac{\Delta_3}{\Delta}. \end{aligned} \quad (1.24)$$

Определив значения контурных токов, находят действительные токи внешних и смежных ветвей с помощью выражений (1.21) и (1.22).

1.3.4 Метод узлового напряжения (двух узлов)

Это наиболее распространенный метод расчета для схем, содержащих только два узла. В методе двух узлов сначала определяется напряжение между этими узлами, а затем с помощью величины этого напряжения определяются токи ветвей.

Узловое напряжение (напряжение между двумя узлами)

$$\begin{aligned} U_{\text{узн}} \\ &= \frac{\sum_{k=1}^m E_k \cdot g_k}{\sum_{k=1}^n g_k}, \end{aligned} \quad (1.25)$$

где $\sum_{k=1}^m E_k \cdot g_k$ — алгебраическая сумма произведения ЭДС на проводимости соответствующих ветвей;

$\sum_{k=1}^n g_k$ — сумма проводимостей всех ветвей схемы;

m — количество активных ветвей;

n — количество всех ветвей схемы.

Примечание: если выбранное направление узлового напряжения совпадает с направлением ЭДС, то перед выражением $E_K \cdot g_K$ ставится знак «-».

Токи в ветвях рассчитываются по обобщенному закону Ома

$$I = \frac{\pm E \mp U_{\text{узл}}}{R} = (\pm E \mp U_{\text{узл}}) \cdot g. \quad (1.24)$$

Примечание: Если выбранное направление узлового напряжения и ЭДС совпадают с выбранным направлением тока ветви, то перед величинами E и $U_{\text{узл}}$ ставится знак «+».

1.3.5 Потенциальная диаграмма замкнутого контура

Потенциальная диаграмма – это графическое изображение изменения потенциала в электрической цепи в зависимости от сопротивлений участков при обходе замкнутого контура, то есть график зависимости $\varphi = f(R)$.

Чтобы построить потенциальную диаграмму, необходимо выполнить следующие пункты:

- 1) рассчитать электрическую цепь;
- 2) разбить цепь характерными точками, которые разделяют сопротивления и ЭДС;
- 3) заземлить любую точку, потенциал которой будет равен нулю, а потенциалы других точек вычислить. *Примечание:* если Н.О. совпадает с направлением тока, то потенциал уменьшается; при совпадении Н.О. с направлением ЭДС потенциал увеличивается;
- 4) на оси абсцисс в выбранном масштабе откладываются сопротивления между характерными точками, начало координат должно соответствовать нулевой точке;
- 5) на оси ординат в масштабе откладываются потенциалы характерных точек;
- 6) полученные точки соединяются прямыми линиями.

1.4 Пример расчета задачи

Линейные электрические цепи постоянного тока

Для электрической схемы (рис.4) выполнить следующее:

1. Составить систему уравнений, необходимых для определения токов по законам Кирхгофа.
2. Записать для цепи законы Кирхгофа в матричной форме.
3. Определить токи во всех ветвях схемы методом контурных токов (МКТ).
4. Проверить правильность решения, применив метод узлового напряжения, предварительно упростив схему, заменив пассивный треугольник сопротивлений эквивалентной звездой. Начертить расчётную схему с эквивалентной звездой и показать на ней токи.
5. Составить баланс мощностей для заданной схемы.
6. Построить в масштабе потенциальную диаграмму для любого замкнутого контура цепи, включающего в себя обе ЭДС.

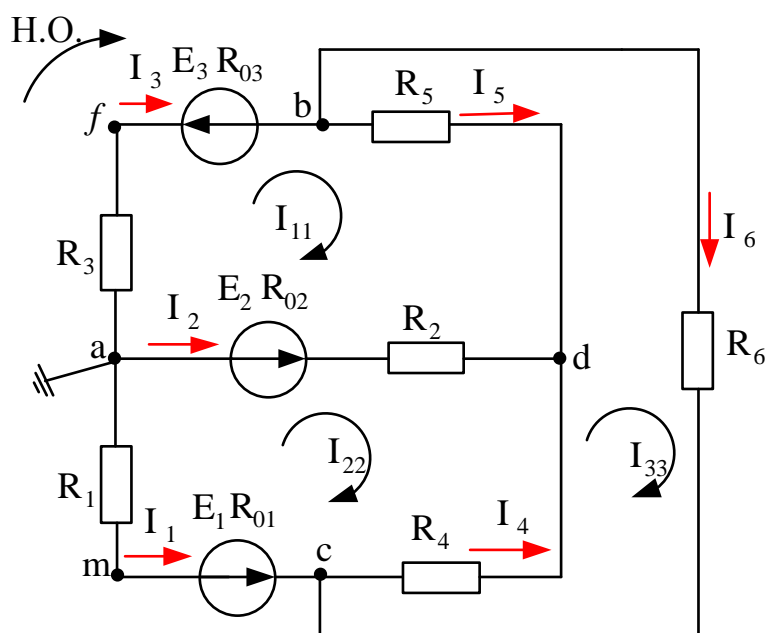


Рис.4. Исходная схема цепи постоянного тока

Исходные данные

Вариант	Рис.	$E_1,$ В	$E_2,$ В	$E_3,$ В	$R_{01},$ Ом	$R_{02},$ Ом	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$R_4,$ Ом	$R_5,$ Ом	$R_6,$ Ом
31	1.32	22	24	10	0,2	1,2	2	1	8	4	10	6

1.4.1 Определение токов по законам Кирхгофа

Произвольно задаёмся положительными направлениями токов в ветвях и Н.О. (в данном случае по часовой стрелке). Число необходимых уравнений для электрической цепи равно числу ветвей. Так как в анализируемой электрической цепи 6 ветвей, то необходимо составить 6 уравнений.

Составляются уравнения по первому закону Кирхгофа в количестве, на единицу меньшем количеству узлов в схеме. Так как в схеме 4 узла, то необходимо составить 3 уравнения.

$$\begin{cases} \text{узел (a): } -I_1 - I_2 - I_3 = 0; \\ \text{узел (b): } I_3 - I_5 - I_6 = 0; \\ \text{узел (c): } I_1 - I_4 + I_6 = 0. \end{cases} \quad (1.27)$$

Недостающее число уравнений в количестве $(b - y + 1) = 6 - 4 + 1 = 3$, уравнения составляется по второму закону Кирхгофа.

При составлении уравнений падения напряжения ЭДС записываются с положительным знаком, если направление тока в сопротивлении контура и ЭДС совпадают с направлением обхода контура и наоборот.

$$\begin{cases} \text{контур "abda": } -R_2 \cdot I_2 + (R_3 + R_{03}) \cdot I_3 + R_5 \cdot I_5 = -E_2 - E_3; \\ \text{контур "adca": } R_2 \cdot I_2 - (R_1 + R_{01}) \cdot I_1 - R_4 \cdot I_4 = E_2 - E_1; \\ \text{контур "bcdb": } R_4 \cdot I_4 - R_5 \cdot I_5 + R_6 \cdot I_6 = 0. \end{cases} \quad (1.28)$$

Решая полученную систему из шести уравнений, можно определить токи в ветвях электрической схемы. Если какой-то ток в результате расчёта получается отрицательным, то это означает, что его действительное направление противоположно выбранному направлению в исходной схеме.

Для общности записи в уравнения (1.28) включены в ветвях 4, 5, 6 равные нулю ЭДС.

$$\begin{cases} \text{контур "abda": } -R_2 \cdot I_2 + (R_3 + R_{03}) \cdot I_3 + R_5 \cdot I_5 = -E_2 - E_3 - E_5; \\ \text{контур "adca": } R_2 \cdot I_2 - (R_1 + R_{01}) \cdot I_1 - R_4 \cdot I_4 = E_2 - E_1 - E_4; \\ \text{контур "bcdb": } R_4 \cdot I_4 - R_5 \cdot I_5 + R_6 \cdot I_6 = E_4 + E_5 + E_6. \end{cases} \quad (1.30)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.31)$$

1.4.3 Метод контурных токов

Метод заключается в том, что вместо действительных токов в ветвях на основании второго закона Кирхгофа определяют контурные токи в независимых контурах.

Контурным будет такой расчетный ток, который замыкается только по своему контуру.

Действительный ток в любой ветви, принадлежащей только одному контуру, численно равен контурному току, а в ветви, принадлежащей нескольким контурам, равен алгебраической сумме контурных токов. Число уравнений, составляемых по второму закону Кирхгофа, равно числу независимых контуров $N = b - y + 1$.

Задается положительное Н.О. в каждом независимом контуре, совпадающем с направлением контурного тока. Контурные токи для схемы (рис.4) будут иметь вид I_{11} ; I_{22} ; I_{33} .

Составляем для каждого контура уравнение по второму закону Кирхгофа. В результате получаем систему трех уравнений относительно контурных токов:

$$\begin{cases} I_{11} \cdot (R_2 + R_3 + R_{03} + R_5) - I_{22} \cdot R_2 - I_{33} \cdot R_5 = -E_2 - E_3; \\ -I_{11} \cdot R_2 + I_{22} \cdot (R_2 + R_1 + R_{01} + R_4) - I_{33} \cdot R_4 = E_2 - E_1; \\ -I_{11} \cdot R_5 - I_{22} \cdot R_4 + I_{33} \cdot (R_4 + R_5 + R_6) = 0. \end{cases} \quad (1.32)$$

В систему подставляются значения контурных сопротивлений и ЭДС

$$\begin{aligned} I_{11} \cdot 20,2 - I_{22} \cdot 1 - I_{33} \cdot 10 &= -34; \\ -I_{11} \cdot 1 + I_{22} \cdot 7,2 - I_{33} \cdot 4 &= 2; \\ -I_{11} \cdot 10 - I_{22} \cdot 4 + I_{33} \cdot 20 &= 0. \end{aligned}$$

Дальнейший расчет ведется методом определителей.

Определяем главный определитель (детерминант) системы

$$\Delta = \begin{vmatrix} 20,2 & -1 & -10 \\ -1 & 7,2 & -4 \\ -10 & -4 & 20 \end{vmatrix} = 1765,6.$$

Каждый частный определитель Δ_k получают путем замены в главном определителе системы Δ k -го столбца сопротивлений столбцом контурных ЭДС, записанных в левой части системы уравнений (пункт 1.3.3).

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \begin{vmatrix} -34 & -1 & -10 \\ 2 & 7,2 & -4 \\ 0 & -4 & 20 \end{vmatrix} = -4232; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} 20,2 & -34 & -10 \\ -1 & 2 & -4 \\ -10 & 0 & 20 \end{vmatrix} = -1432; \\ \Delta_3 &= \begin{vmatrix} 20,2 & -1 & -34 \\ -1 & 7,2 & 2 \\ -10 & -4 & 0 \end{vmatrix} = -2402,4. \end{aligned}$$

Контурные токи системы определяют по выражению (1.24)

$$\begin{aligned} I_{11} &= \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{-4232}{1765,6} = -2,4 \text{ A}; \quad I_{22} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{-1432}{1765,6} = -0,81 \text{ A}; \\ I_{33} &= \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{-2402,4}{1765,6} = -1,36 \text{ A}. \end{aligned}$$

Находим значения действительных токов в ветвях схемы (рис.4) и их истинное направление.

Токи внешних ветвей:

$$I_1 = -I_{22} = 0,81 \text{ A}; \quad I_3 = I_{11} = -2,4 \text{ A}; \quad I_6 = I_{33} = -1,36 \text{ A}.$$

Токи смежных ветвей:

$$I_2 = -I_{11} + I_{22} = -(-2,4) - 0,81 = 1,59 \text{ A};$$

$$I_4 = -I_{22} + I_{33} = -(-0,81) + (-1,36) = -0,55 \text{ A};$$

$$I_5 = I_{11} - I_{33} = -2,4 - (-1,36) = -1,04 \text{ A}.$$

Действительные направления токов I_3 ; I_4 ; I_5 ; I_6 противоположно принятому в схеме (рис.4), так как при расчете эти значения токов получились отрицательными.

1.4.4 Метод узлового напряжения

Этот метод используется только для схем с двумя узлами. Поэтому сначала нужно преобразовать исходную схему (рис.4). Для этого пассивный треугольник сопротивлений R_4, R_5, R_6 заменяется эквивалентной звездой из сопротивлений R_b, R_c, R_d , получается эквивалентная схема (рис.5).

Сопротивления лучей эквивалентной звезды определяются из выражения

$$R_b = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{10 \cdot 6}{4 + 10 + 6} = 3 \text{ Ом};$$

$$R_d = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{6 \cdot 10}{4 + 10 + 6} = 2 \text{ Ом};$$

$$R_c = \frac{R_4 \cdot R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{4 \cdot 6}{4 + 10 + 6} = 1,2 \text{ Ом}.$$

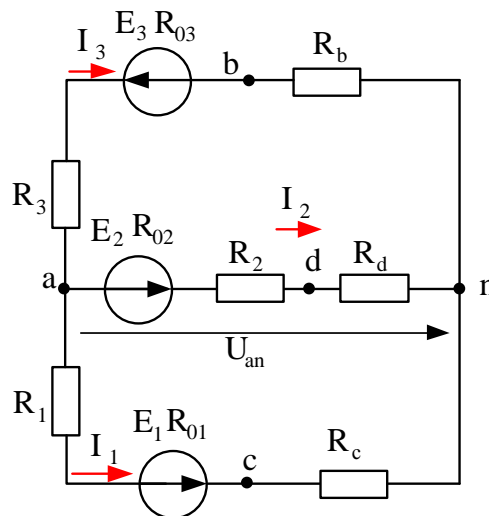


Рис. 5. Преобразованная электрическая схема для метода узлового напряжения

Схема (рис.5) имеет два узла и три ветви. Произвольно выбирается направление узлового напряжения U_{na} . Величина напряжения определяется из выражения (1.25). Поэтому сначала находим значения проводимостей ветвей

$$g_1 = \frac{1}{R_1 + R_{01} + R_c} = \frac{1}{2 + 0,2 + 1,2} = 0,294 \text{ См};$$

$$g_2 = \frac{1}{R_2 + R_{02} + R_d} = \frac{1}{1 + 0 + 2} = 0,33 \text{ См};$$

$$g_3 = \frac{1}{R_3 + R_{03} + R_b} = \frac{1}{8 + 1,2 + 3} = 0,082 \text{ См}.$$

Узловое напряжение равно

$$\begin{aligned} U_{na} &= \frac{-E_1 \cdot g_1 - E_2 \cdot g_2 + E_3 \cdot g_3}{g_1 + g_2 + g_3} = \frac{-22 \cdot 0,294 - 24 \cdot 0,33 + 10 \cdot 0,082}{0,294 + 0,33 + 0,082} = \\ &= -19,2 \text{ В}. \end{aligned}$$

Условные положительные направления токов в ветвях остаются такие же, что в исходной схеме (рис.4). В соответствии с обобщенным законом Ома для активных ветвей записываем уравнения токов

$$I_1 = (E_1 + U_{na}) \cdot g_1 = (22 + (-19,2)) \cdot 0,294 = 0,82 \text{ А};$$

$$I_2 = (E_2 + U_{na}) \cdot g_2 = (24 + (-19,2)) \cdot 0,33 = 1,58 \text{ А};$$

$$I_3 = (-E_3 + U_{na}) \cdot g_3 = (-10 + (-19,2)) \cdot 0,082 = -2,4 \text{ А}.$$

Знак «-» указывает на то, что действительное направление тока третьей ветви противоположно условно принятому направлению в схеме (рис.5).

1.4.5 Составление баланса мощностей для заданной схемы

Составление энергетического баланса позволяет проверить правильность выполненных расчетов. В общем случае энергетический баланс определяется из выражения (1.16). В этом уравнении знак мощности будет положителен при совпадении направлений ЭДС и тока, проходящего через источник, и отрицателен при взаимно противоположных направлениях ЭДС и тока.

Мощность источника(генератора):

$$P_{\text{ист}} = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 - E_3 \cdot I_3 = 22 \cdot 0,81 + 24 \cdot 1,59 - 10 \cdot (-2,4) = 79,98 \text{ Вт.}$$

Мощность потребителя (нагрузки):

$$\begin{aligned} P_{\text{потр}} &= I_1^2(R_1 + R_{01}) + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2(R_3 + R_{03}) + I_4^2 \cdot R_4 + I_5^2 \cdot R_5 + I_6^2 \cdot R_6 = \\ &= 0,81^2 \cdot 2,2 + 1,59^2 \cdot 1 + (-2,4)^2 \cdot 9,2 + (-0,55)^2 \cdot 4 + (-1,04)^2 \cdot 10 + (-1,36)^2 \cdot 6 = 79,64 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Расчет уравнения баланса мощностей подтвердил правильность решения предыдущих пунктов задачи, так как $P_{\text{ист}} = P_{\text{потр}}$

$$79,98 \text{ Вт} \approx 79,64 \text{ Вт.}$$

1.4.6 построение потенциальной диаграммы

В данной задаче потенциальная диаграмма строится для внешнего контура исходной электрической цепи (рис.4). Последовательность построения потенциальной диаграммы представлена в пункте 1.3.5.

Заземляется точка a (потенциал в этой точке равный нулю), а далее рассчитываются потенциалы в каждой отдельной точке схемы и строится потенциальная диаграмма (рис.6).

Примечание: если Н.О. совпадает с направлением тока, то потенциал уменьшается; при совпадении Н.О. с направлением ЭДС потенциал увеличивается.

$$\varphi_a = 0 \text{ В;}$$

$$\varphi_f = \varphi_a - I_3 \cdot R_3 = 0 - (-2,4) \cdot 8 = 19,2 \text{ В;}$$

$$\varphi_b = \varphi_f - E_3 - I_3 \cdot R_3 = 19,2 - 10 - (-2,4) \cdot 1,2 = 12,08 \text{ В;}$$

$$\varphi_c = \varphi_b - I_6 \cdot R_6 = 12,08 - (-1,36) \cdot 6 = 20,24 \text{ В;}$$

$$\varphi_m = \varphi_c - E_1 + I_1 \cdot R_{01} = 20,24 - 22 + 0,81 \cdot 0,2 = -1,598 \text{ В;}$$

$$\varphi_a = \varphi_m + I_1 \cdot R_1 = -1,598 + 0,81 \cdot 2 = 0,022 \approx 0 \text{ В.}$$

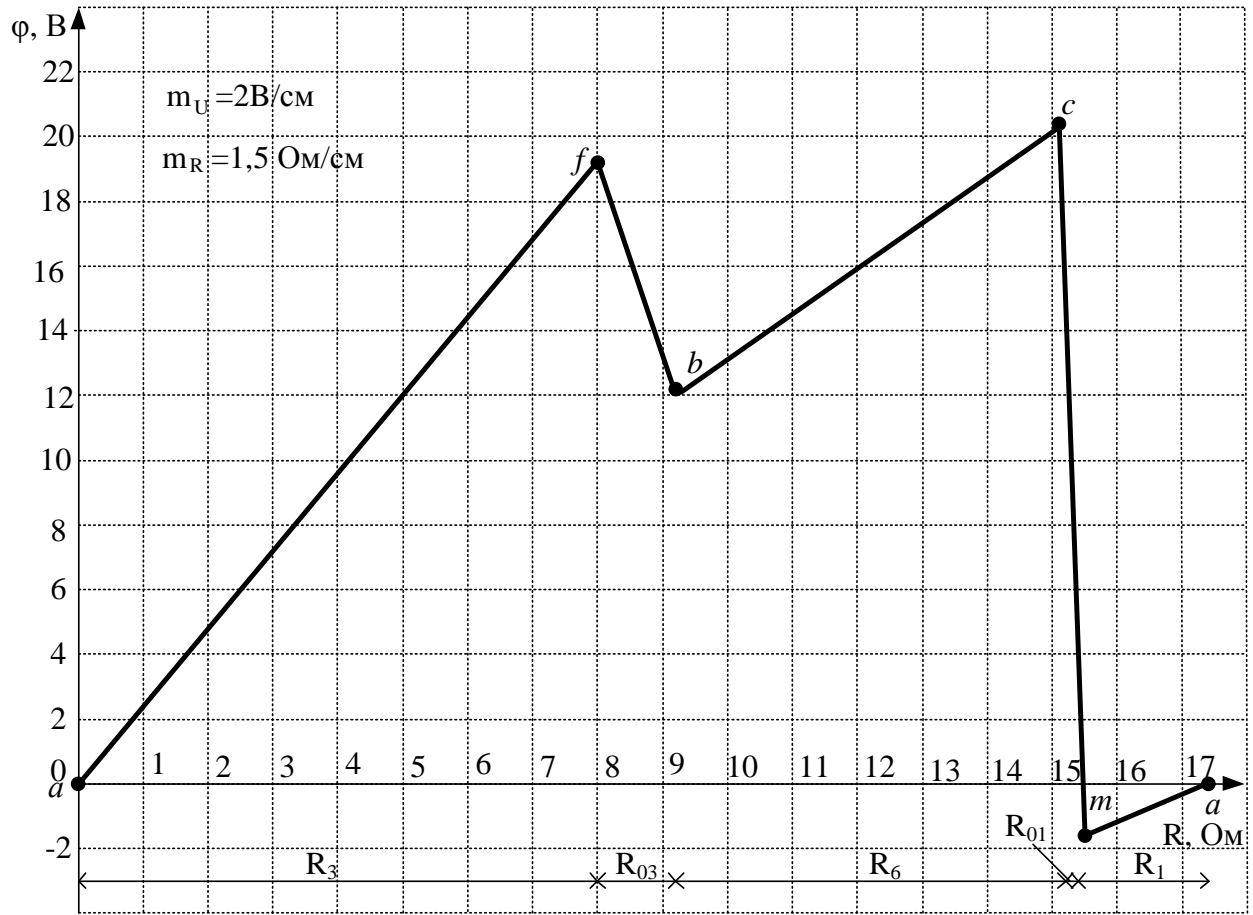


Рис.6. Потенциальная диаграмма для внешнего контура

Задание для самостоятельного выполнения

Для схемы, соответствующей вашему варианту, изображенной на рисунке 1.1 – 1.30, необходимо выполнить следующие расчеты:

1. Составить систему уравнений для определения токов в схеме по первому и второму законам Кирхгофа.
2. Записать для цепи законы Кирхгофа в матричной форме.
3. Определить все токи во всех ветвях схемы методом контурных токов (МКТ).
4. Проверить правильность решения, применив метод узлового напряжения. Предварительно упростить схему, заменив треугольник сопротивлений эквивалентной звездой. Начертить расчетную схему с эквивалентной звездой и показать на ней токи.
5. Записать баланс мощностей для преобразованной схемы.
6. Построить потенциальную диаграмму в масштабе для внешнего контура схемы.

Исходные данные приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Исходные данные

Вариант	Рис.	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	R_5 , Ом	R_6 , Ом	E_1 , В	E_2 , В	E_3 , В
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2	3	4	5	6	7	8	-	10	11
1	1.1	13	5	2	8	11	15	-	12	16
2	1.2	8	10	6	15	21	28	-	25	14
3	1.3	7	12	4	9	15	8	-	20	8
4	1.4	110	60	45	150	80	50	-	60	12
5	1.5	4	11	5	12	7	8	-	45	25
6	1.6	5	10	12	7	8	15	-	15	13
7	1.7	130	40	60	80	110	45	-	18	12
8	1.8	55	80	100	40	70	120	-	26	10

Продолжение таблицы 1.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
9	1.9	4	13	9	10	5	6	62	16	-
10	1.10	12	35	22	12	35	22	8	10	-
11	1.11	20	60	100	35	150	40	-	100	150
12	1.12	15	12	10	9	8	7	-	14	13
13	1.13	4	7	10	12	20	5.5	15	20	-
14	1.14	9	20	16	40	30	22	10	-	40
15	1.15	13	5	9	7	10	4	-	10	21
16	1.16	4	8	6	10	13	10	12	30	-
17	1.17	10	18	5	10	8	6	-	20	30
18	1.18	30	40	22	10	14	50	15	23	-
19	1.19	5	7	10	4	15	20	15	20	-
20	1.20	6	5	8	14	7	8	20	-	14
21	1.21	20	20	1	20	50	30	-	20	45
22	1.22	10	5	6	50	20	30	60	-	100
23	1.23	5	10	3	30	20	50	315	210	-
24	1.24	20	2	4	10	30	60	180	170	-
25	1.25	2	10	5	10	30	60	170	80	-
26	1.26	10	20	16	20	30	50	200	-	330
27	1.27	30	10	27	50	10	40	-	190	115
28	1.28	10	25	31	70	5	95	47	100	-
29	1.29	12	37	15	18	56	75	-	48	15
30	1.30	19	4	21	350	100	210	150	100	-
31	1.1	25	31	47	22	5	36	-	16	12
32	1.2	2	5	4	17	12	9	-	14	25
33	1.3	3	2	6	10	10	20	-	8	20
34	1.4	15	13	5	40	7	50	-	12	60
35	1.5	5	15	4	34	67	30	-	25	45
36	1.6	4	2	5	12	15	40	-	13	15
37	1.7	21	44	31	10	20	30	-	12	18

Продолжение таблицы 1.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
38	1.8	13	15	6	12	50	43	-	10	26
39	1.9	4	5	14	33	54	44	16	62	-
40	1.10	2	1	6	46	54	21	10	8	-
41	1.11	10	30	25	100	250	150	-	15	100
42	1.12	7	13	2	15	10	45	-	13	14
43	1.13	2	5	7	31	45	20	18	10	-
44	1.14	34	45	50	100	120	60	30	-	30
45	1.15	31	27	6	5	130	25	-	15	21
46	1.16	2	5	7	14	50	43	30	12	-
47	1.17	10	15	5	110	15	45	-	25	10
48	1.18	16	12	7	30	45	20	9	24	-
49	1.19	5	10	1	14	25	30	20	15	-
50	1.20	4	2	7	30	20	11	14	-	20
51	1.21	5	6	9	21	44	25	-	45	20
52	1.22	23	4	46	100	210	50	100	-	60
53	1.23	30	20	45	100	350	20	210	315	-
54	1.24	20	35	10	350	70	145	170	180	-
55	1.25	25	6	17	35	210	44	80	170	-
56	1.26	40	30	15	170	345	150	330	-	200
57	1.27	35	10	20	155	430	75	-	115	190
58	1.28	54	32	6	105	50	60	45	25	-
59	1.29	5	10	8	100	50	35	-	35	25
60	1.30	30	4	6	35	70	150	100	150	-

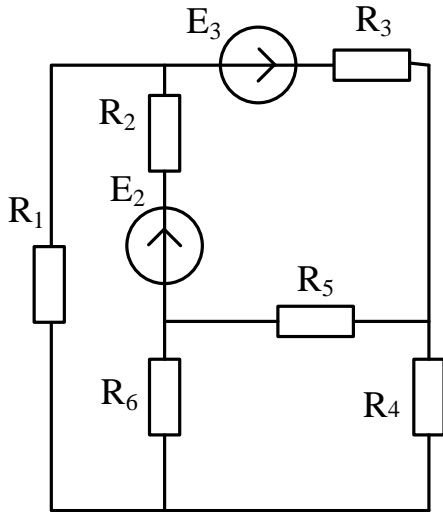


Рис. 1.1.

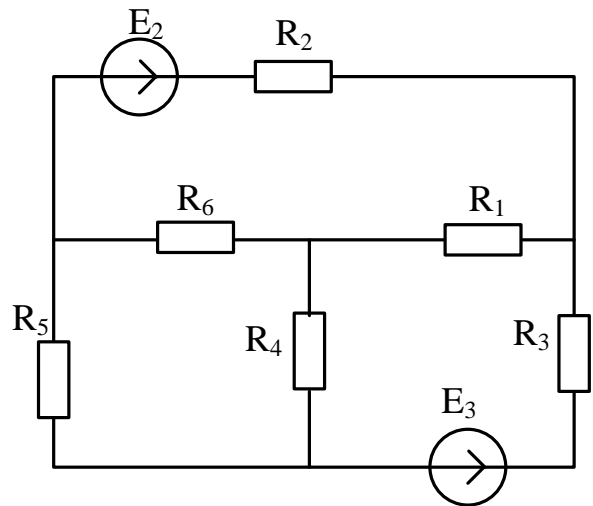


Рис. 1.2.

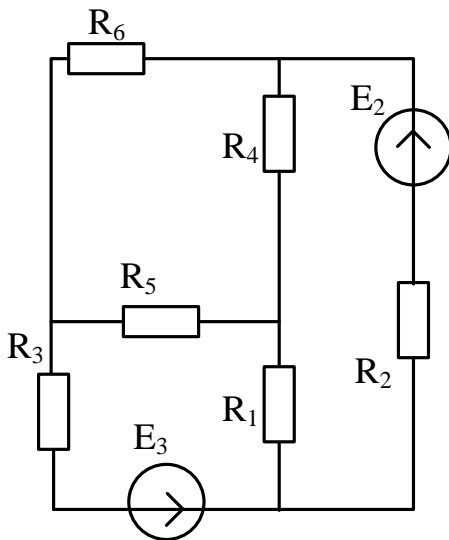


Рис. 1.3.

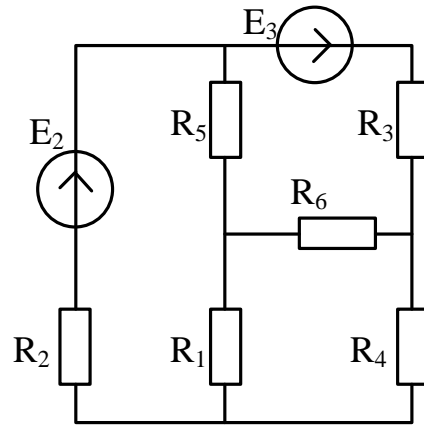


Рис. 1.4.

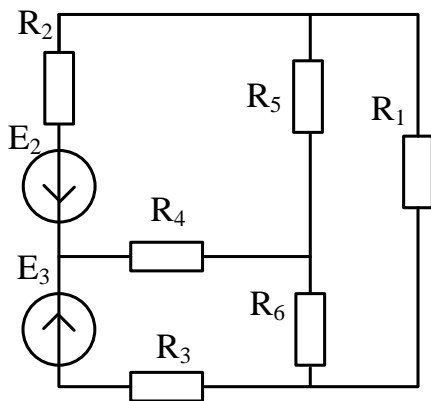


Рис. 1.5.

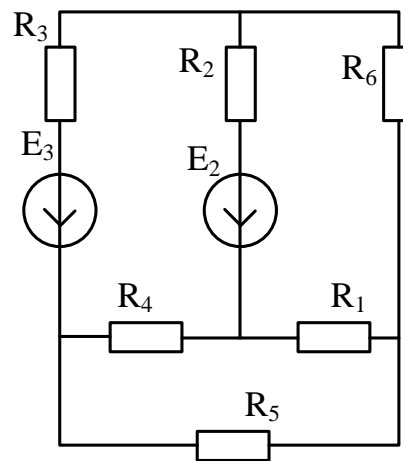


Рис. 1.6.

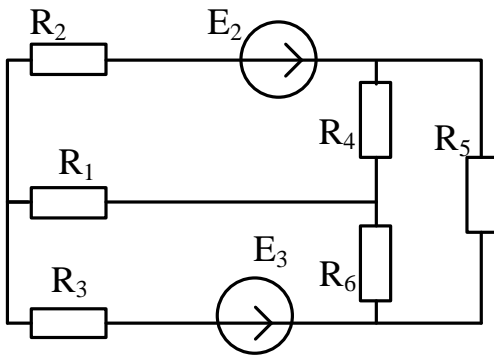


Рис. 1.7.

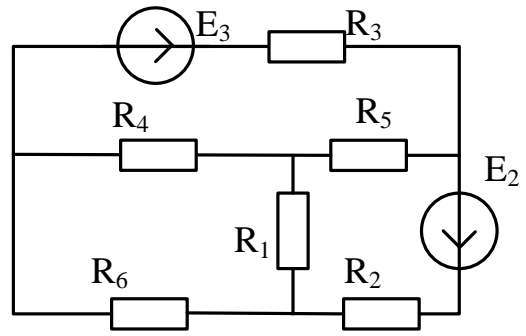


Рис. 1.8.

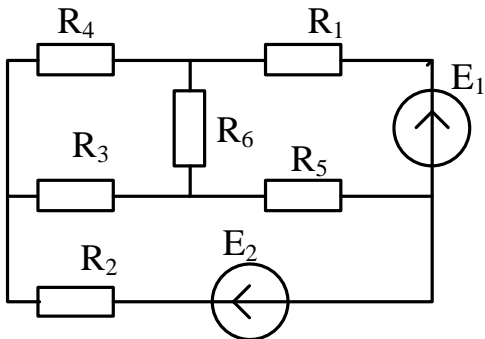


Рис. 1.9.

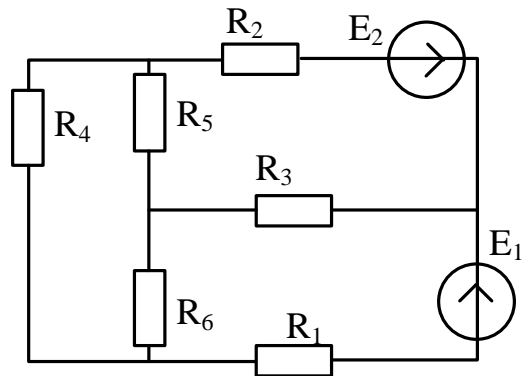


Рис. 1.10.

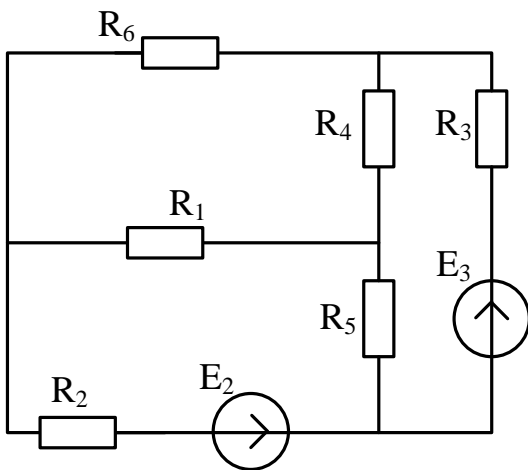


Рис. 1.11.

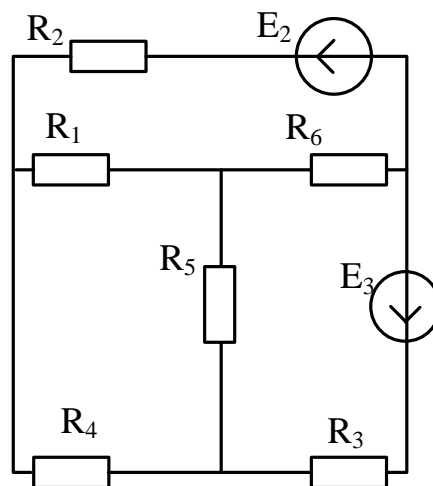


Рис. 1.12.

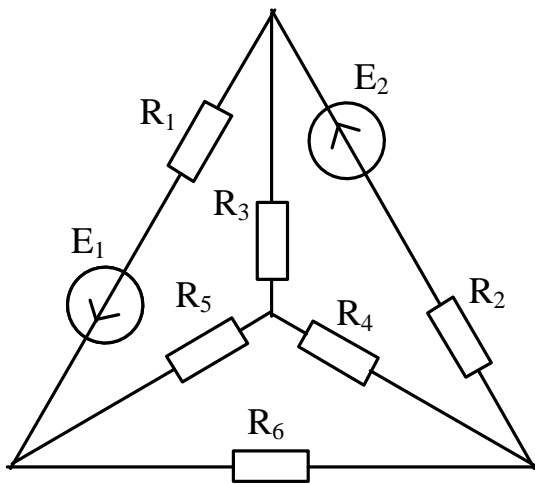


Рис. 1.13.

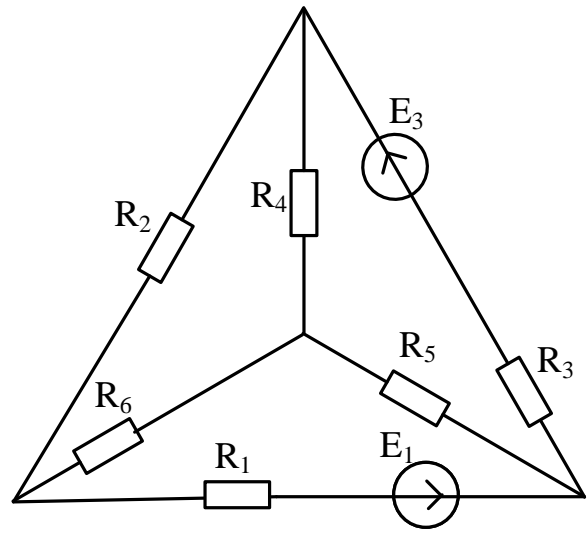


Рис. 1.14.

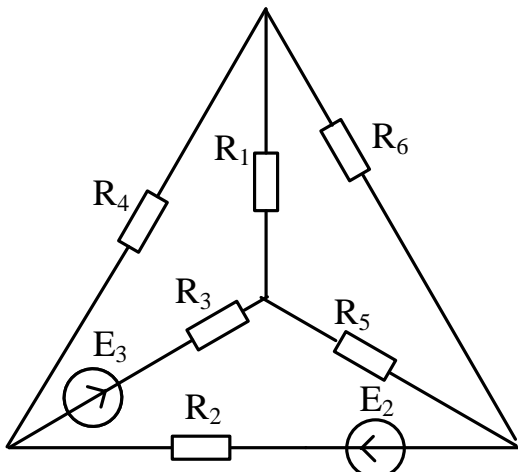


Рис. 1.15.

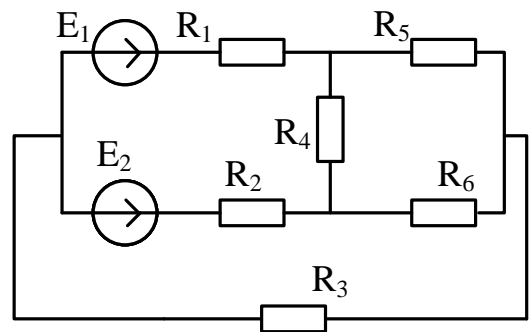


Рис. 1.16.

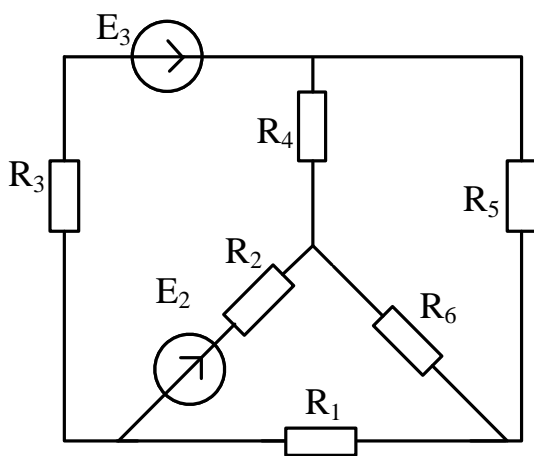


Рис. 1.17.

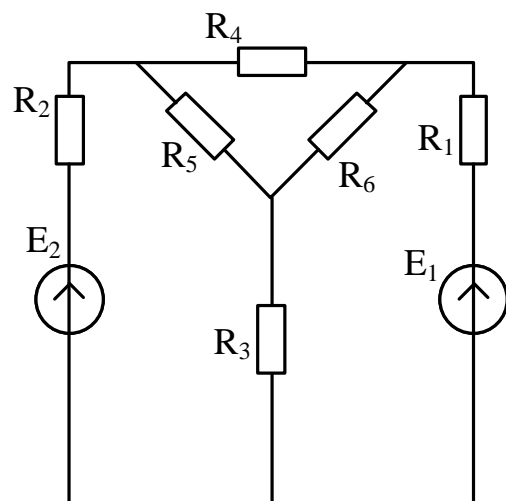


Рис. 1.18.

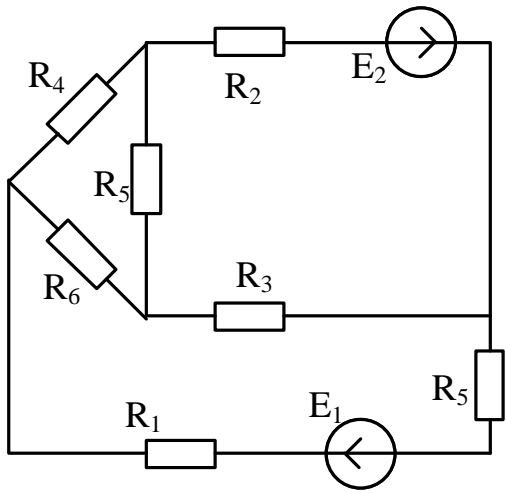


Рис. 1.19.

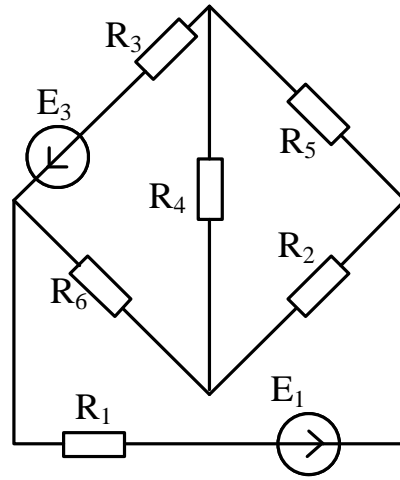


Рис. 1.20.

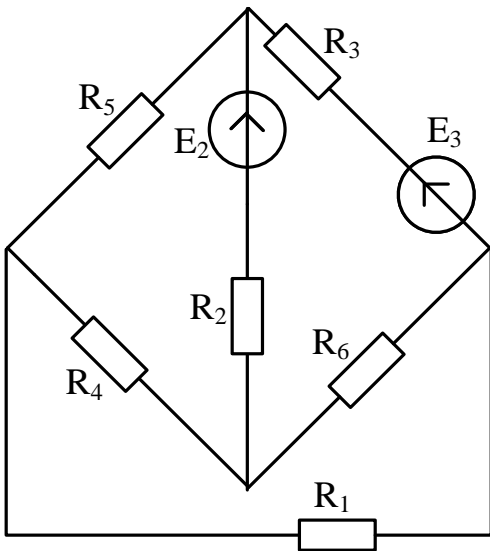


Рис. 1.21.

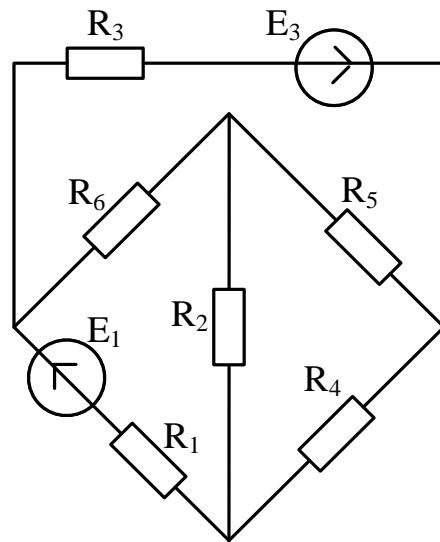


Рис. 1.22.

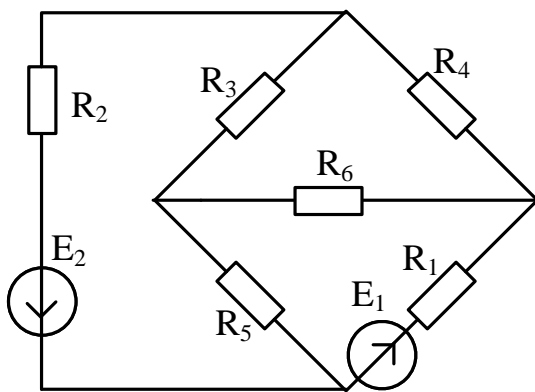


Рис. 1.23.

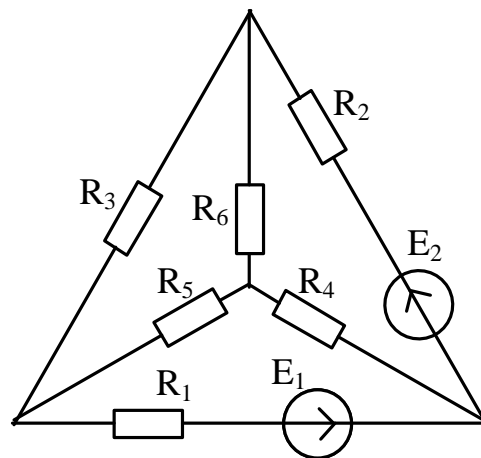


Рис. 1.24.

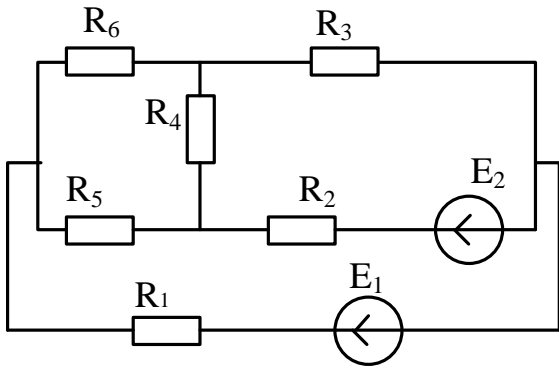


Рис. 1.25.

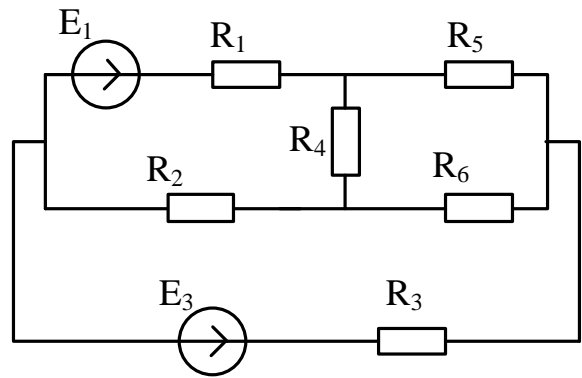


Рис. 1.26.

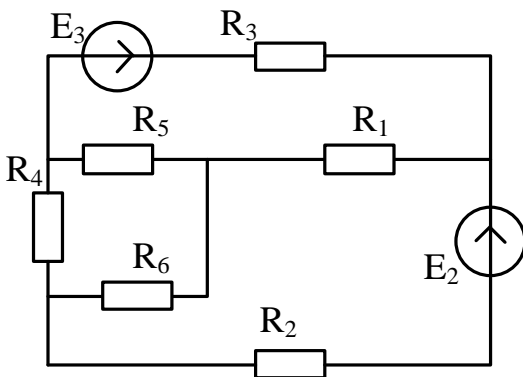


Рис. 1.27.

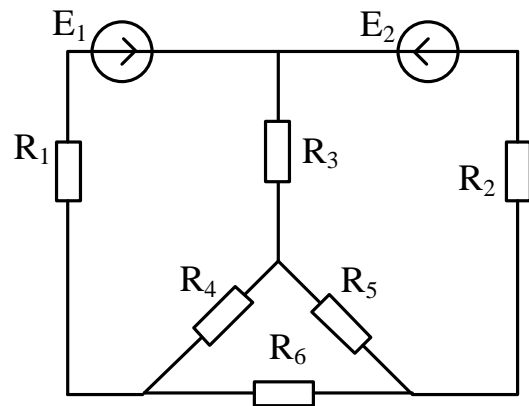


Рис. 1.28.

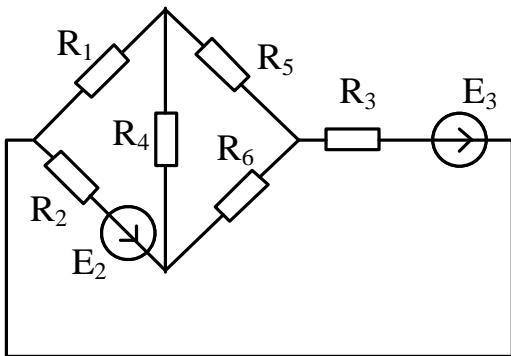


Рис. 1.29.

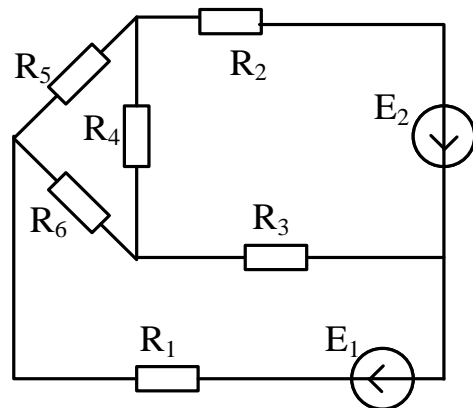


Рис. 1.30.

Тестовое задание №1

Электрические цепи постоянного тока

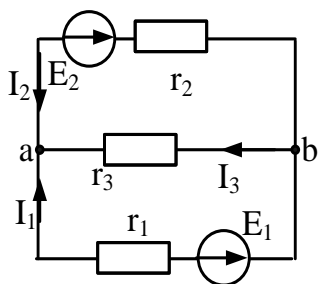
№1. Сопротивление провода 10 Ом. Чему равна его проводимость?

1. 10 Ом.
2. 0,1 Ом.
3. 0,1 Ом⁻¹.
4. Нет правильного ответа.

№2. Какие равенства нужно использовать, чтобы из выражения $A = P \cdot t$ получить выражение $A = I^2 \cdot R \cdot t$?

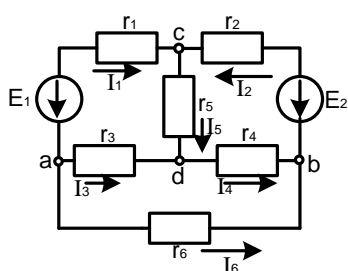
1. $I = P/U$; $I = U/R$.
2. $P = A/t$; $U = I \cdot R$.
3. $P = U \cdot I$; $U = I \cdot R$.
4. Нет правильного ответа.

№3. Для данной схемы определить U_{ab} , если $E_1 = 24 \text{ В}$; $I_2 = 6 \text{ А}$; $R_2 = 100 \text{ Ом}$.



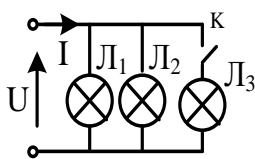
1. Недостаточно данных.
2. 60 В.
3. 24 В.
4. 30 В.

№4. а) сколько контуров в цепи; б) сколько уравнений 2-го закона Кирхгофа нужно составить для данной электрической схемы?



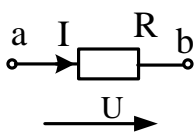
1. а) 7; б) 3.
2. а) 3; б) 3.
3. а) 3; б) 4.
4. а) 4; б) 7.

№5. Как изменится входной ток после включения третьей лампы?



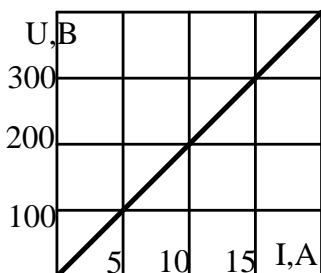
1. уменьшится.
2. увеличится.
3. не изменится.

№6. Определить количество тепла, выделившегося в сопротивлении R , если $I = 0,5A$; $R = 1000\Omega$, $t = 1\text{ мин}$.



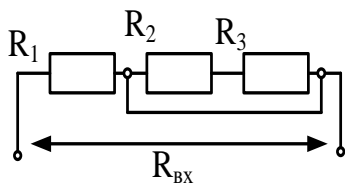
1. 6 калорий.
2. 60 калорий.
3. 360 калорий.
4. Нет правильного ответа.

№7. При заданной вольт - амперной характеристике приемника его проводимость равна...



1. 20 См;
2. 0,02 См;
3. 0,5 См;
4. 0,05 См.

№8. Если резисторы имеют сопротивления: $R_1 = 20\Omega$; $R_2 = 4\Omega$; $R_3 = 6\Omega$, то эквивалентное сопротивление цепи равно...



1. 2 Ом.
2. 10 Ом.
3. 4,4 Ом.
4. 12 Ом.

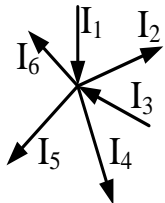
№9. Источник электрической энергии, напряжение, на выводах которого не зависит от электрического тока в нем, это ...

1. Идеальный источник тока.
2. Реальный источник тока.
3. Идеальный источник напряжения.
4. Реальный источник напряжения.

№10. Длина и площадь поперечного сечения провода увеличены в три раза. Как изменилась проводимость провода?

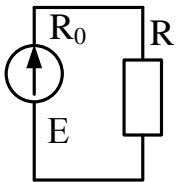
1. Осталась неизменной.
2. Уменьшилась в три раза;
3. Увеличилась в три раза;
4. Уменьшилась в шесть раз.

№11. Возможно ли такое направление токов для узла?



1. Нет.
2. Возможно только после расчета схемы.
3. Да.
4. Нет никакой разницы, как направлять токи.

№12. Выражение для мощности P , выделяющейся в нагрузке с сопротивлением R , имеет вид....



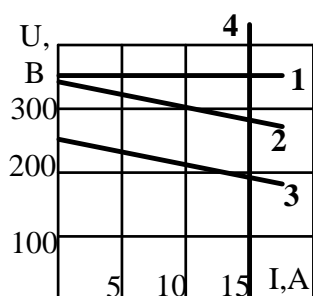
$$1. P = \frac{E^2 \cdot R_0}{(R_0 + R)^2}.$$

$$2. P = \frac{E^2 \cdot R_0}{(R_0 - R)^2}.$$

$$3. P = \frac{E^2 \cdot R}{(R_0 + R)^2}.$$

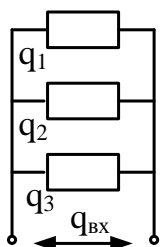
$$4. P = \frac{E^2}{R}.$$

№13. Идеальному источнику ЭДС на данной вольт - амперной характеристике соответствует внешняя характеристика под номером...



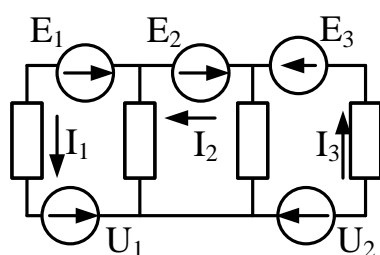
1. Четыре.
2. Два.
3. Один.
4. Три.

№14. Определите эквивалентную проводимость данной схемы при значениях проводимостей: $q_1 = 0,1 \text{ Ом}^{-1}$; $q_2 = 0,2 \text{ Ом}^{-1}$; $q_3 = 0,3 \text{ Ом}^{-1}$.



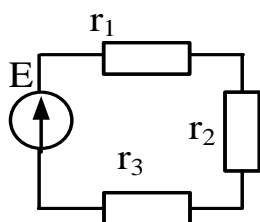
1. $0,6 \text{ Ом}^{-1}$.
2. $0,06 \text{ Ом}^{-1}$.
3. Недостаточно данных.
4. $0,3 \text{ Ом}^{-1}$.

№15. Какие из машин с ЭДС E_1, E_2, E_3 и напряжениями U_1, U_2 отдают энергию и какие потребляют? Укажите неправильный ответ.



1. Машина с U_1 потребляет.
2. Машина с E_2 потребляет.
3. Машина с E_3 отдает.
4. Машина с E_1 отдает.

№16. Если $R_1 = 1 \text{ кОм}$; $R_2 = 200 \text{ Ом}$; $R_3 = 20 \text{ Ом}$, то на резисторах будут наблюдаться следующие напряжения...



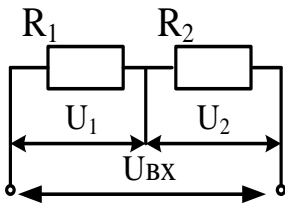
1. На $R_3 \rightarrow \text{max}$, на $R_1 \rightarrow \text{min}$.
2. На $R_2 \rightarrow \text{max}$, на $R_1 \rightarrow \text{min}$.
3. На $R_1 \rightarrow \text{max}$, на $R_3 \rightarrow \text{min}$.
4. На всех одно и то же напряжение.

№17. Единицей измерения проводимости электрической ветви является...

1. Ом.
2. Вольт.
3. Ампер.
4. Сименс.

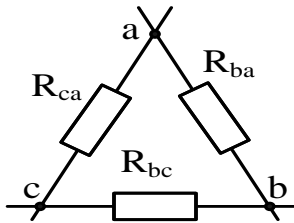
№18. Определить эквивалентную входную проводимость для данной схемы,

если $R_1 = 150\text{ Ом}$; $R_2 = 5\text{ Ом}$.



1. 20 Ом^{-1} .
2. $0,05\text{ Ом}$.
3. 20 Ом .
4. $0,05\text{ Ом}^{-1}$.

№19. Преобразовать треугольник в эквивалентную звезду, найти сопротивления лучей эквивалентной звезды, если $R_{ab} = R_{bc} = R_{ca} = 6\text{ Ом}$.



1. $R_a = R_b = R_c = 2\text{ Ом}$.
2. $R_a = R_b = R_c = 3\text{ Ом}$.
3. $R_a = 20\text{ Ом}$; $R_b = 4\text{ Ом}$; $R_c = 6\text{ Ом}$.
4. $R_a = 10\text{ Ом}$; $R_b = 2\text{ Ом}$; $R_c = 3\text{ Ом}$.

№20. ЭДС $E = 220\text{ В}$ и внутреннее сопротивление источника $R_0 = 0,4\text{ Ом}$. Определить ток короткого замыкания и максимальную мощность потерь внутри источника.

1. $I = 88\text{ А}$; $P_0 = 19,3\text{ кВт}$.
2. $I = 1000\text{ А}$; $P_0 = 235\text{ кВт}$.
3. $I = 550\text{ А}$; $P_0 = 121\text{ кВт}$.
4. $I = 550\text{ А}$; $P_0 = 101\text{ кВт}$.

2 ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

В настоящее время переменный ток находит широкое применение в технике, так как он легко трансформируется и передается на большие расстояния при высоком напряжении и малых потерях. Экономический эффект при этом огромен. Кроме этого, электрические машины и другие электротехнические устройства, предназначенные для работы в цепях переменного тока, относительно просты и достаточно надежны в эксплуатации. В электротехнике наибольшее распространение получил синусоидальный переменный ток, то есть ток, величина которого изменяется по закону синуса.

2.1 Основные понятия и величины электрических цепей переменного тока

Электрический ток, изменяющийся с течением времени, называется *переменным* током. Если его мгновенные значения и направления через равные промежутки времени (периодически) повторяются, то его называют *периодически* изменяющимся.

Однофазной электрической цепью синусоидального тока называют цепь, содержащую один или несколько источников электрической энергии переменного тока, имеющих одинаковую частоту и начальную фазу.

Наибольшее распространение получил переменный синусоидальный ток (ЭДС, напряжение), являющийся синусоидальной функцией времени.

Переменный синусоидальный сигнал характеризуется периодом T , или величиной, обратной периоду и называемой *частотой* электрического тока (ЭДС, напряжение)

$$f = \frac{1}{T}; \left[\frac{1}{c} = c^{-1} \right. \\ \left. = \Gamma_{\text{ц}} \right], \quad (2.1)$$

где T – период, это время одного полного колебания синусоидальной величины.

Мгновенные значения синусоидальных величин выражаются формулами

$$i(t) = I_m \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} t + \psi_i\right) = I_m \cdot \sin(\omega t \pm \psi_i); \\ u(t) = U_m \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} t + \psi_u\right) = U_m \cdot \sin(\omega t \pm \psi_u); \quad (2.2) \\ e(t) = E_m \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} t + \psi_e\right) = E_m \cdot \sin(\omega t \pm \psi_e),$$

где I_m, U_m, E_m – амплитудные (максимальные) значения переменного тока, напряжения и ЭДС;

$(\omega t \pm \psi_i), (\omega t \pm \psi_u), (\omega t \pm \psi_e)$ – аргумент синуса, то есть фаза;

ω – угловая частота; $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ c}^{-1}$;

ψ_i, ψ_u, ψ_e – начальная фаза тока, напряжения, ЭДС;

t – время.

Амплитудными (максимальными) значениями называются наибольшее значение периодически изменяющихся токов, напряжений или ЭДС.

$$I_m = \sqrt{2} \cdot I; U_m = \sqrt{2} \cdot U; E_m = \sqrt{2} \cdot E, \quad (2.3)$$

где $I; U; E$ – действующие значения тока, напряжения и ЭДС;

Действующее значение переменного тока (ЭДС, напряжения) – это среднеквадратическое значение переменного тока (ЭДС, напряжения) за период T

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 \cdot dt}; E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 \cdot dt}; U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 \cdot dt}. \quad (2.4)$$

Фаза – это аргумент синусоидальной функции, который характеризует значение синусоидальной величины в момент времени t .

Начальная фаза тока (ЭДС, напряжения) – это значение фазы в момент времени $t = 0$.

Разность начальных фаз двух синусоидальных величин одной и той же частоты называют *сдвигом фаз*.

Сдвиг фаз между напряжением и током определяется вычитанием начальной фазы напряжения из начальной фазы тока

$$\varphi = \psi_u - \psi_i. \quad (2.5)$$

Если ток, ЭДС или напряжение изменяются по синусоидальному закону, то его действующее значение составляет 0,707 амплитудного значения

$$\begin{aligned} I &= \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 \cdot I_m; \\ E &= \frac{E_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 \cdot E_m; \\ U &= \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 \cdot U_m. \end{aligned} \quad (2.6)$$

2.2 Способы изображения синусоидальных величин

Представление синусоидальных величин возможно графически или аналитически.

К графическим способам относятся временные диаграммы или векторные диаграммы.

Аналитические способы представления: тригонометрическая форма записи (выражение 2.2) или комплексные числа.

2.2.1 Графические способы изображения синусоидальных величин

Синусоидально изменяющиеся величины изображают либо графически как функция времени t или угла ωt (рис 7, рис.9 - 11), либо вращающимися векторами на комплексной плоскости (рис. 8 - 11).

В последнем случае длина вектора в выбранном масштабе представляет собой амплитудное или действующее значение этой величины. Угол между этим вектором и положительным направлением оси абсцисс в начальный момент времени равен начальной фазе ψ , а угловая частота вращения вектора равна угловой частоте ω (рис. 8).

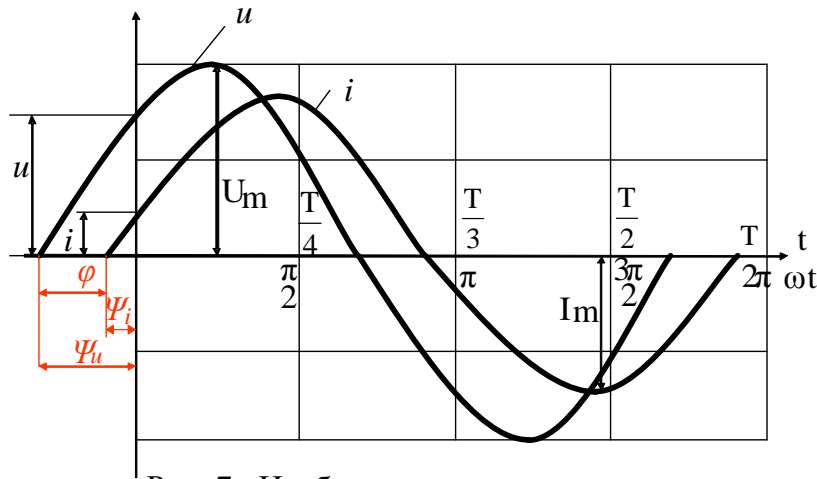


Рис. 7. Изображение синусоидальных величин в функции времени

2.2.2 Аналитические способы изображения синусоидальных величин

Метод представления синусоидальных функций комплексными числами позволяет производить алгебраические операции над комплексными числами, учитывая как абсолютные значения этих величин (модули), так и их фазы (аргументы).

Метод основан на представлении векторов на комплексной плоскости и на записи их комплексными числами. Комплексное число – комплексная сумма действительного и мнимого числа, представленного формулой.

Комплексные числа позволяют для цепей синусоидального тока использовать те же методы расчета, что и для цепей постоянного тока.

Комплексное число можно записать в алгебраической, показательной и тригонометрической формах:

- 1) алгебраическая форма записи

$$\dot{A} = a + jb, \quad (2.7)$$

где \dot{A} – комплексное число;

a – действительная часть комплексного числа;

b – мнимая часть комплексного числа;

j – мнимая единица, $j = \sqrt{-1}$.

2) показательная форма записи

$$\dot{A} = A \cdot e^{j\varphi}, \quad (2.8)$$

где A – модуль комплексного числа; $A = \sqrt{a^2 + b^2}$;

$e^{j\varphi}$ – множитель, называется формулой Эйлера; $e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi$;

φ – значение аргумента комплексного числа, (фаза); $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{b}{a}$;

3) тригонометрическая форма записи представлена выражением (2.2).

Переход показательной формы записи комплексного числа к алгебраической форме записи происходит по формуле Эйлера

$$\dot{A} = A \cdot (\cos \varphi + j \sin \varphi). \quad (2.9)$$

Кроме этого для наглядности используются изображения вектора на комплексной плоскости (рис. 8).

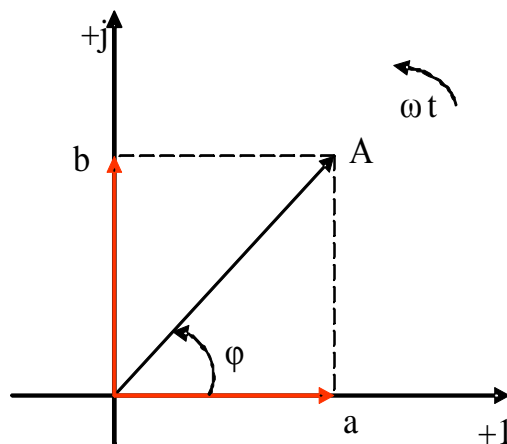


Рис. 8. Изображение синусоидальных величин вращающимися векторами на плоскости

За положительное направление вращающегося вектора на комплексной плоскости принимают направление против часовой стрелки.

$a = A \cdot \cos \varphi$ – реальная часть комплексного числа \dot{A} (проекция вектора на ось абсцисс – вещественная ось);

$b = A \cdot \sin \varphi$ – мнимая часть комплексного числа \dot{A} (проекция вектора на ось ординат – мнимая ось);

Стоит отметить, что вектора на комплексной плоскости могут располагаться в любой четверти плоскости. Это зависит от числовых значений действительной и мнимой частей комплексного числа.

2.3 Основные элементы электрической цепи переменного тока

Основными элементами электрической цепи переменного тока являются активное сопротивление (резисторы), катушка индуктивности и конденсатор емкости. В реальной цепи электрическим сопротивлением обладают не только реостат или резистор, но и проводники, катушки, конденсаторы и т.д. Общим свойством всех устройств, обладающих сопротивлением, является необратимое преобразование электрической энергии в тепловую энергию.

2.3.1 Цепь переменного тока с активным сопротивлением

Сопротивление резистивного элемента R (рис.9,а) называется *активным сопротивлением*.

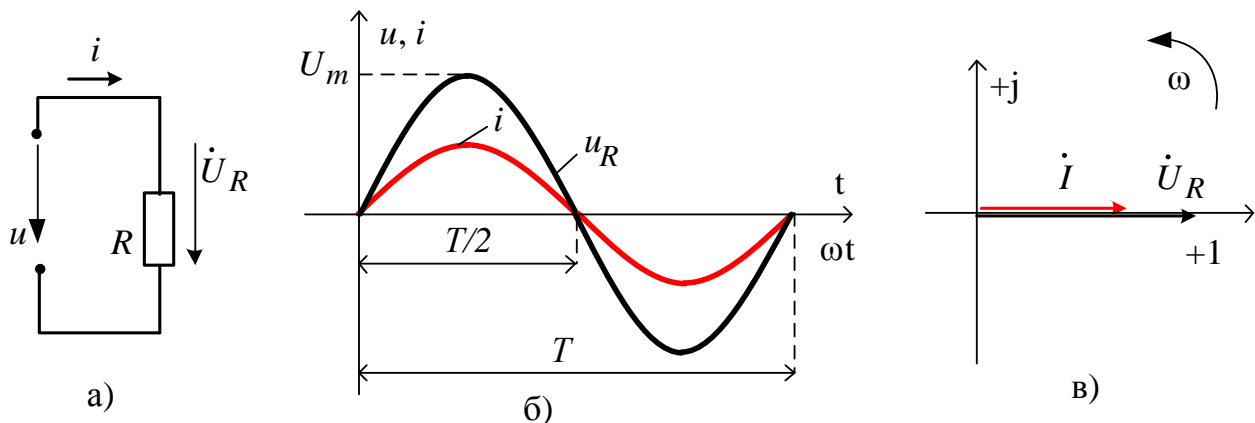


Рис. 9. Цепь переменного тока с активным сопротивлением:
а) электрическая схема; б) временная диаграмма; в) векторная диаграмма

Напряжение между зажимами ветви с сопротивлением R и ток в нем связаны законом Ома

$$u_R = R \cdot i. (2.10)$$

Если ток синусоидален, то есть $i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$, то напряжение будет равно

$$u_R = R \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i) = U_{Rm} \cdot \sin(\omega t + \psi_i), \quad (2.11)$$

где U_{Rm} – амплитудное значение напряжения на резистивном элементе, В;

I_m – амплитудное значение тока, А;

ψ_i – начальная фаза тока, в данном случае $\psi_i = 0$.

Действующее значение тока в цепи определяется по закону Ома

$$I = \frac{U}{R}. \quad (2.12)$$

Напряжение и ток в цепи с активным сопротивлением совпадают по фазе, то есть $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$ (рис.9, б; 9 в), и в любой момент времени мгновенные значения тока и напряжения пропорциональны друг другу.

Активное сопротивление связано с *активной мощностью*. Активная мощность есть энергия обмена между источником и приемником. Например, в резистивном элементе происходит преобразование электрической энергии в тепловую, у лампы накаливания – электрическая энергия преобразуется в световую. Процесс передачи активной энергии необратим.

Активная мощность электрической цепи

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}; \left[B \cdot A = A^2 \cdot \text{Ом} = \frac{\text{В}^2}{\text{Ом}} = \text{Вт} \right]. \quad (2.13)$$

2.3.2 Цепь переменного тока с индуктивностью

Индуктивностью называется идеальный элемент схемы замещения (рис.10,а), характеризующий способность цепи накапливать магнитное поле. Полагают, что индуктивностью обладают только индуктивные катушки. Индуктивностью других элементов электрической цепи пренебрегают.

Индуктивность катушки определяется по формуле

$$L = \frac{W \cdot \Phi}{i}; \left[\frac{\text{вит.} \cdot \text{Вб}}{\text{А}} = \text{Гн} \right], \quad (2.14)$$

где W – число витков катушки;

Φ – магнитный поток катушки, возбуждаемый током.

Реальная катушка индуктивности обладает активным сопротивлением R и индуктивностью L . Примером может служить катушка двигателя, трансформатора, прибора и т. д. Единицы измерения индуктивности – Генри.

Катушка индуктивности обладает *индуктивным сопротивлением*

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = \omega \cdot L; [\text{с}^{-1} \cdot \text{Гн} = \text{Ом}]. \quad (2.15)$$

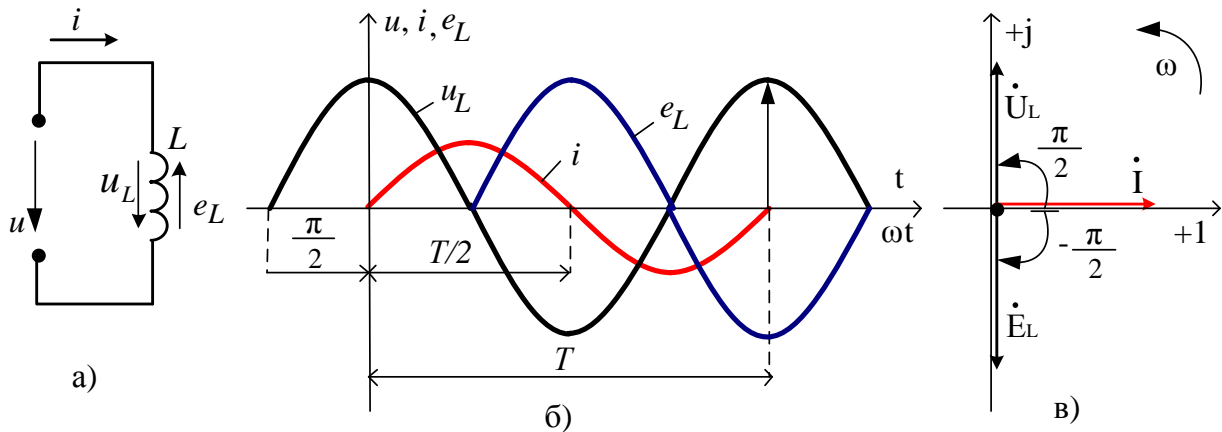


Рис. 10. Цепь переменного тока с индуктивным сопротивлением: а) электрическая схема; б) временная диаграмма; в) векторная диаграмма

Если электрическая цепь обладает только индуктивностью (активное сопротивление катушки $R=0$), по ней проходит синусоидальный ток (рис. 10,а)

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i). \quad (2.16)$$

В выражении (2.16) начальная фаза тока равна нулю, то есть $\psi_i = 0$ (рис.10,б; рис.10,в).

Амплитудное значение тока в цепи, содержащей индуктивность

$$I_m = \frac{U_m}{X_L}. \quad (2.17)$$

Если по ветви протекает ток, то в катушке возникает ЭДС самоиндукции

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = E_{Lm} \cdot \sin(\omega t - \psi_e), \quad (2.18)$$

где $E_{Lm} = \omega \cdot L \cdot I_m$ – амплитуда ЭДС самоиндукции;

$\psi_e = (\psi_i - \frac{\pi}{2})$ – начальная фаза ЭДС самоиндукции.

Связь $u_L = L \frac{di}{dt}$ показывает, что условные положительные направления тока i и напряжения u_L должны быть одинаковы и направление их стрелок на электрических схемах должно быть одним и тем же. Условные положительные направления ЭДС e_L и напряжения u_L должны быть также одинаковыми, так как в соответствии с равенством $e_L = -u_L = -L \frac{di}{dt}$ действительное направление ЭДС будет противоположно по направлению напряжению u_L .

По второму закону Кирхгофа сумма приложенного к ветви напряжения u_L и ЭДС самоиндукции e_L равна нулю

$$u_L + e_L = 0. \quad (2.19)$$

Отсюда напряжение на зажимах ветви

$$u_L = -e_L = L \cdot \frac{di}{dt} = \omega \cdot L \cdot I_m \cdot \sin\left(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}\right) = U_{Lm} \cdot \sin(\omega t + \psi_u). \quad (2.20)$$

Из анализа выражений i , e_L , u_L следует:

- 1) ЭДС самоиндукции e_L отстает по фазе от тока на угол $\pi / 2$;
- 2) напряжение u_L опережает ток на угол $\pi / 2$;
- 3) напряжение u_L и ЭДС самоиндукции e_L всегда равны по величине друг другу и находятся в противофазе.

Векторная диаграмма ветви с индуктивностью будет иметь вид, показанный на рисунке 10,в.

Цепь с индуктивностью обладает только *реактивной мощностью*, которая называется *индуктивной*, единицы измерения – вольт амперы реактивные

$$Q_L = U_L \cdot I = I^2 \cdot X_L, [var]. \quad (2.21)$$

2.3.3 Цепь переменного тока с емкостью

Емкостью называется идеальный элемент схемы замещения, характеризующий способность участка электрической цепи накапливать электрическое поле. Полагают, что емкостью обладают только *конденсаторы*. Емкостью остальных элементов цепи пренебрегают (рис.11,а).

Емкость конденсатора определяется по формуле

$$C = \frac{q}{U_C}; \left[\frac{\text{Кл}}{\text{В}} = \Phi \right], \quad (2.22)$$

где q – заряд на обкладках конденсатора, Кл;

U_C – напряжение на конденсаторе, В.

Конденсатор обладает *емкостным сопротивлением*. *Емкостное сопротивление* - это сопротивление переменному току, которое оказывает электрическое поле, возникающее вокруг зарядов, накапливаемых на пластинах конденсатора.

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}; \left[\frac{1}{\text{с}^{-1} \cdot \Phi} = \text{Ом} \right]. \quad (2.23)$$

Единицы измерения емкости – Фарады.

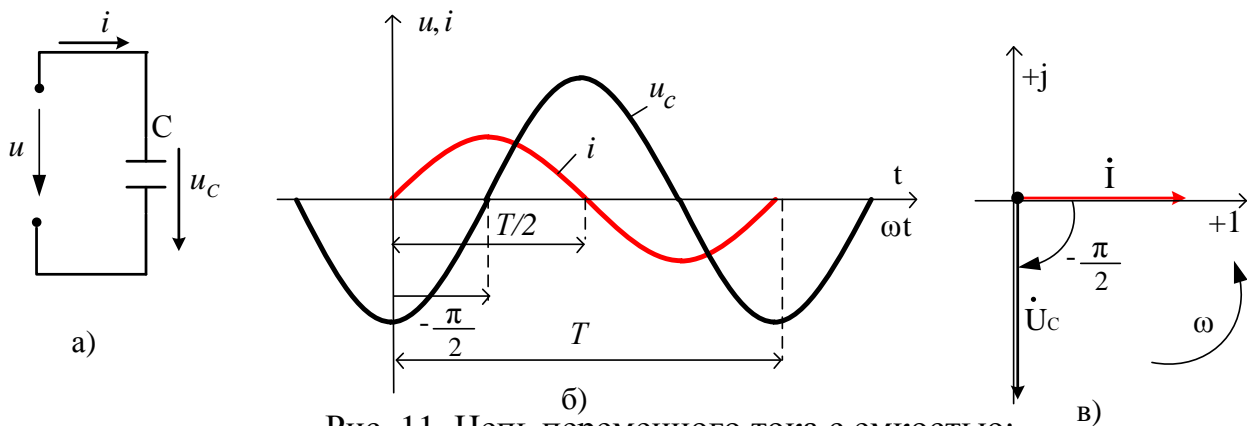


Рис. 11. Цепь переменного тока с емкостью:

а) электрическая схема; б) временная диаграмма; в) векторная диаграмма

При протекании по ветви синусоидального тока $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$ напряжение на конденсаторе будет равно

$$\begin{aligned}
 u_C &= \frac{1}{C} \int i \cdot dt = \frac{1}{C} \int I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i) dt = -\frac{I_m}{\omega C} \cos(\omega t + \psi_i) = \\
 &= \frac{I_m}{\omega C} \sin\left(\omega t + \psi_i - \frac{\pi}{2}\right) \\
 &= U_{Cm} \cdot \sin\left(\omega t + \psi_i - \frac{\pi}{2}\right). \tag{2.24}
 \end{aligned}$$

Из зависимости $i = C \frac{du_C}{dt}$ следует, что условные положительные направления тока и напряжения на конденсаторе должны совпадать.

Из сравнения выражений тока i и напряжения u_C видно, что напряжение на конденсаторе отстает по фазе от тока на угол $\pi/2$ (рис.11,б; рис.11,в).

Амплитудное значение тока в цепи

$$I_m = \frac{U_m}{X_C}. \tag{2.25}$$

Цепь обладает реактивной мощностью, которая называется *емкостной*

$$Q_L = U_L \cdot I = I^2 \cdot X_L, [var]. \tag{2.26}$$

2.4 Пример расчета задачи.

Линейные электрические цепи однофазного синусоидального тока

Для электрической схемы, соответствующей номеру варианта и изображённой на рисунке 12, выполнить следующие расчеты:

1. Определить эквивалентное сопротивление цепи \underline{Z} в алгебраической и показательной формах.

2. Определить токи во всех ветвях цепи и напряжения на отдельных участках. Найти комплексы действующих значений токов и их мгновенные значения.

3. Составить баланс мощностей для исходной электрической схемы.

4. Построить в масштабе совмещенную векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений.

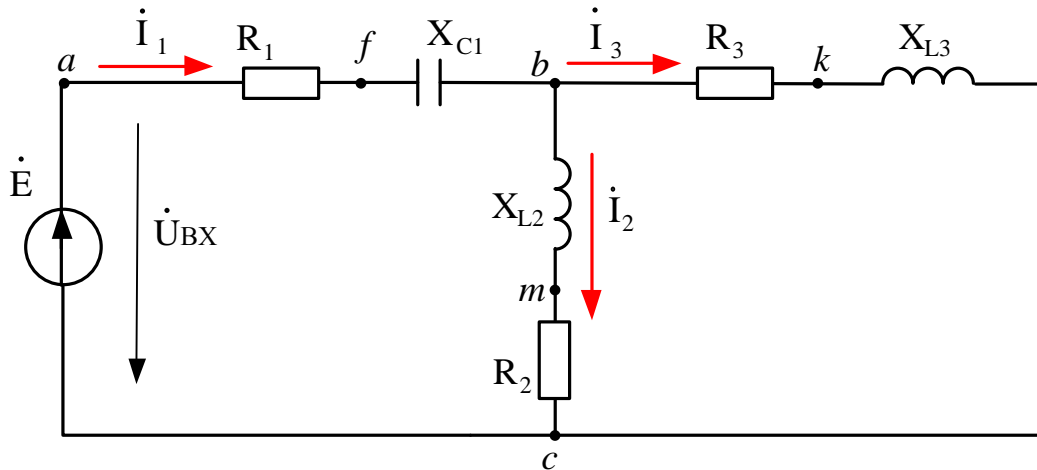


Рис.12. Линейная электрическая цепь переменного синусоидального тока

Таблица 2

Исходные данные

Вар.	E , В	f , Гц	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ	C_3 , мкФ	L_1 , мГн	L_2 , мГн	L_3 , мГн	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом
31	80	50	280	-	-	-	15,7	6,5	4	2	3

2.4.1 Определение эквивалентного сопротивления цепи \underline{Z} в алгебраической и показательной формах

Расчет выполняется в комплексной форме с последующим переходом к аналитическим выражениям токов.

1. Задается положительное направление токов в ветвях цепи (рис. 12).
2. Определяются реактивные сопротивления цепи:

Индуктивные сопротивления:

$$X_{L2} = \omega \cdot L_2 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_2 = 314 \cdot 15,7 \cdot 10^{-3} = 4,93 \text{ Ом};$$

$$X_{L3} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_3 = \omega \cdot L_3 = 314 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3} = 2,04 \text{ Ом}.$$

Емкостное сопротивление:

$$X_{C1} = \frac{1}{\omega \cdot C_1} = \frac{10^6}{314 \cdot 280} = 11,4 \text{ Ом}.$$

3. Записываются электрические сопротивления ветвей цепи в комплексной форме:

1) первая ветвь:

$$\underline{Z}_1 = R_1 - jX_{C1} = 4 - j11,4 = \sqrt{4^2 + 11,4^2} \cdot e^{-j \cdot \arctg \frac{11,4}{4}} = 12,08 \cdot e^{-j70,62} \text{ Ом};$$

2) вторая ветвь:

$$\underline{Z}_2 = R_2 + jX_{L2} = 2 + j4,93 = 5,32 \cdot e^{j67,9} \text{ Ом};$$

3) третья ветвь:

$$\underline{Z}_3 = R_3 + jX_{L3} = 3 + j2,04 = 3,63 \cdot e^{j34,2} \text{ Ом}.$$

4. Электрическая схема (рис.12) заменяется эквивалентной (рис. 13,а)с изображением ветвей полных электрических сопротивлений в комплексной форме.

5. Путем эквивалентных преобразований схема (рис.13, б) упрощается до схемы с одним эквивалентным сопротивлением (рис.13, в).

Сопротивление параллельных ветвей:

$$\underline{Z}_{23} = \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{5,32 \cdot e^{j67,9} \cdot 3,63 \cdot e^{j34,2}}{2 + j4,93 + 3 + j2,04} = 2,25 \cdot e^{j47,8} = (1,51 + j1,67) \text{ Ом}.$$

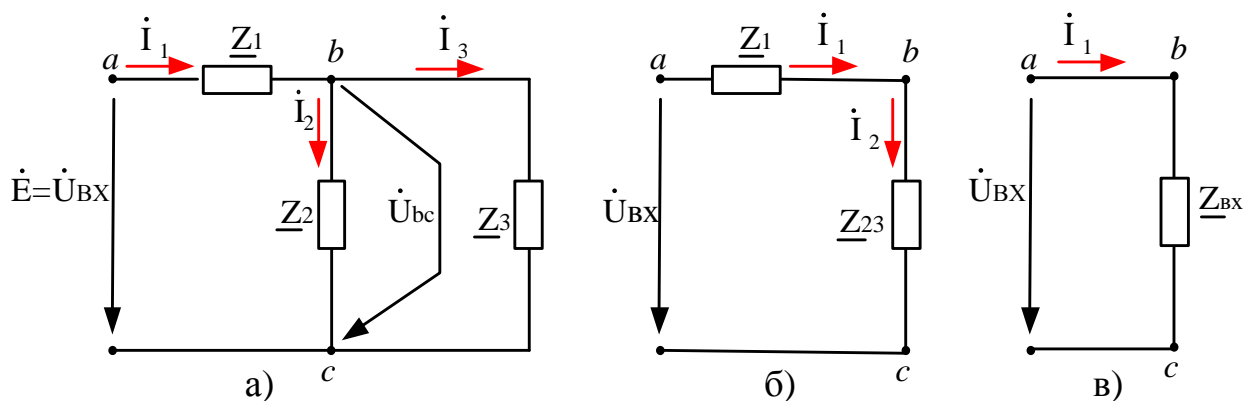


Рис.13. Схемы замещения линейной электрической цепи переменного синусоидального тока

В получившейся схеме (рис.13, б) два последовательно соединенных сопротивления заменяем эквивалентным (рис.13, в). Таким образом, эквивалентное сопротивление всей цепи равно

$$\underline{Z}_{\text{BX}} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{23} = 4 - j11,4 + 1,51 + j1,67 = 5,51 - j9,7 = 11,16 \cdot e^{-j60,41} \text{ Ом}.$$

2.4.2 Определение токов во всех ветвях цепи

По закону Ома находится ток на входе цепи (рис.13,в)

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{\underline{Z}_{\text{ВХ}}} = \frac{\dot{U}_{\text{ВХ}}}{\underline{Z}_{\text{ВХ}}} = \frac{80 \cdot e^{j0}}{11,16 \cdot e^{-j60,41}} = 7,17 \cdot e^{j60,41} = (3,54 + j6,23)A.$$

Для определения значений токов в параллельных ветвях между узлами "b" и "c" необходимо сначала найти значение напряжения на параллельном участке "bc" электрической схемы (рис.13,а).

Для этого выражается напряжение U_{bc} из закона Ома

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 = \dot{U}_3 = \dot{U}_{bc} &= \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_{23} = 7,17 \cdot e^{j60,41} \cdot 2,25 \cdot e^{j47,8} = 16,12 \cdot e^{j108,2} = \\ &= (-5,03 + j17,5)V. \end{aligned}$$

Токи в параллельных ветвях

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_2} = \frac{16,12 \cdot e^{j108,2}}{5,32 \cdot e^{j67,9}} = 3,03 \cdot e^{j40,3} = (2,31 + j1,96) A;$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_3} = \frac{16,12 \cdot e^{j108,2}}{3,63 \cdot e^{j34,2}} = 4,44 \cdot e^{j74} = (1,23 + j4,27)A.$$

Расчитанные токи изображаются на ВДТ (рис.14).

Мгновенные значения токов записываются с помощью выражения (2.2)

$$i_1 = 2,25 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314t + 47,8^\circ) = 3,18 \cdot \sin(314t + 47,8^\circ) A;$$

$$i_2 = 3,03 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314t + 40,3^\circ) = 4,29 \cdot \sin(314t + 40,3^\circ) A;$$

$$i_3 = 4,44 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314t + 74^\circ) = 6,28 \cdot \sin(314t + 74^\circ) A.$$

Правильность расчета величин тока проверяется по первому закону Кирхгофа. Для узла "b" уравнение имеет вид $\dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_3 = 0$. Подставляются значения $3,54 + j6,23 - 2,31 - j1,96 - 1,23 - j4,27 = 0A$. Расчет верен.

2.4.3 Определение напряжений на отдельных участках цепи

$\dot{U}_{fa} = \dot{I}_1 \cdot r_1 = 7,17 \cdot e^{j60,41} \cdot 4 = 28,7 \cdot e^{j60,41}V$ – напряжение на активном элементе первой ветви совпадает с направлением тока \dot{I}_1 ;

$\dot{U}_{bf} = \dot{I}_1 \cdot (-jx_{C1}) = 7,17 \cdot e^{j60,41} \cdot 11,4 \cdot e^{-j90} = 81,5 \cdot e^{-j29,59} B$ – напряжение на емкостном элементе первой ветви отстает от тока \dot{I}_1 на $\varphi = 90^\circ$;

$\dot{U}_{cm} = \dot{I}_2 \cdot R_2 = 3,03 \cdot e^{j40,3} \cdot 2 = 6,06 \cdot e^{j40,3} B$ – напряжение на активном элементе второй ветви совпадает с направлением тока \dot{I}_2 ;

$\dot{U}_{mb} = \dot{I}_2 \cdot jx_{L2} = 3,03 \cdot e^{j40,3} \cdot 4,93 \cdot e^{j90} = 14,94 \cdot e^{j130,3} B$ – напряжение на индуктивном элементе второй ветви опережает ток \dot{I}_2 на $\varphi = 90^\circ$;

$\dot{U}_{kb} = \dot{I}_3 \cdot R_3 = 4,44 \cdot e^{j74} \cdot 3 = 13,3 \cdot e^{j74} B$ – напряжение на активном элементе третьей ветви совпадает с направлением тока \dot{I}_3 ;

$\dot{U}_{ck} = \dot{I}_3 \cdot jx_{L3} = 4,44 \cdot e^{j74} \cdot 2,04 \cdot e^{j90} = 9,07 \cdot e^{j164} B$ – напряжение на индуктивном элементе второй ветви опережает ток \dot{I}_3 на $\varphi = 90^\circ$;

$\dot{U}_{ba} = \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 = 7,17 \cdot e^{j60,41} \cdot 12,08 \cdot e^{-j70,62} = 86,6 \cdot e^{-j10,24} B$ – напряжение первой ветви.

2.4.4 Баланс мощностей

Баланс мощностей заключается в равенстве суммарных мощностей, отдаваемых источником электрической энергии и потребляемой электрофизическими элементами электрической цепи

$$\sum \underline{S}_{\text{ист}} = \sum \underline{S}_{\text{потр}}, \quad (2.27)$$

где $\sum \underline{S}_{\text{ист}} = \sum \dot{E}_k \cdot \dot{I}_k$ – сумма комплексных мощностей источников электрической энергии (\dot{I}_k – сопряженное значение токов);

$\sum \underline{S}_{\text{потр}} = \sum \underline{Z}_k \cdot \dot{I}_k^2$ – сумма комплексных мощностей электрофизических элементов электрической цепи.

Отсюда полная мощность источника в данной задаче будет равна

$$\sum \underline{S}_{\text{ист}} = 80 \cdot e^{j0} \cdot 7,17 \cdot e^{-j60,41} = 573,3 \cdot e^{-j60,41} = (283,1 - j498,6) \text{ ВА.}$$

Активная мощность источника $P_{\text{ист}} = 283,1$ Вт.

Реактивная мощность источника $Q_{\text{ист}} = -498,6$ вар.

Для определения полной мощности потребителя в данной задаче учитываются все три ветви с тремя комплексными сопротивлениями в показатель-

ной форме записи, а значения токов каждой ветви берутся только по модулю и возводятся в квадрат

$$\begin{aligned}\Sigma \underline{S}_{\text{потр}} &= \underline{Z}_1 \cdot I_1^2 + \underline{Z}_2 \cdot I_2^2 + \underline{Z}_3 \cdot I_3^2 = 12,08 \cdot e^{-j70,62} \cdot 7,17^2 + \\ &+ 5,32 \cdot e^{j67,9} \cdot 3,03^2 + 3,63 \cdot e^{j34,2} \cdot 4,44^2 = 573,3 \cdot e^{-j60,4} = \\ &= (283,1 - j498,6) \text{ ВА}.\end{aligned}$$

Активная мощность потребителя $P_{\text{потр}} = 283,1$ Вт.

Реактивная мощность потребителя $Q_{\text{потр}} = -498,6$ вар.

Знак «-» перед значением реактивной мощности говорит о том, что по реактивным составляющим схема носит емкостный характер. Вся же схема носит активно-емкостный характер, так как в выражении полной мощности присутствует значение активной и реактивной мощности.

2.4.5 Построение топографической диаграммы напряжений и векторной диаграммы токов

Для построения совмещенной ВДТ и ТДН сначала строится ВДТ. Откладываются токи \dot{I}_2 и \dot{I}_3 в масштабе $m_I = 1 \text{ А/см}$ под углами φ_2 и φ_3 соответственно. Сложив векторы токов \dot{I}_2 и \dot{I}_3 по правилу параллелограмма, мы должны получить вектор входного тока \dot{I}_1 (соответствовать расчетным данным).

Далее из начала комплексной плоскости строится вектор входного напряжения U_{ca} по вещественной осев масштабе $m_U = 5 \text{ В/см}$.

Затем в масштабе откладываются рассчитанные вектора напряжений (пункт 2.4.3) под соответствующими углами относительно вещественной оси (+1; -1).

Совмещенная векторная диаграмма токов (ВДТ) и топографическая диаграмма напряжений (ТДН) представлена на рисунке 14.

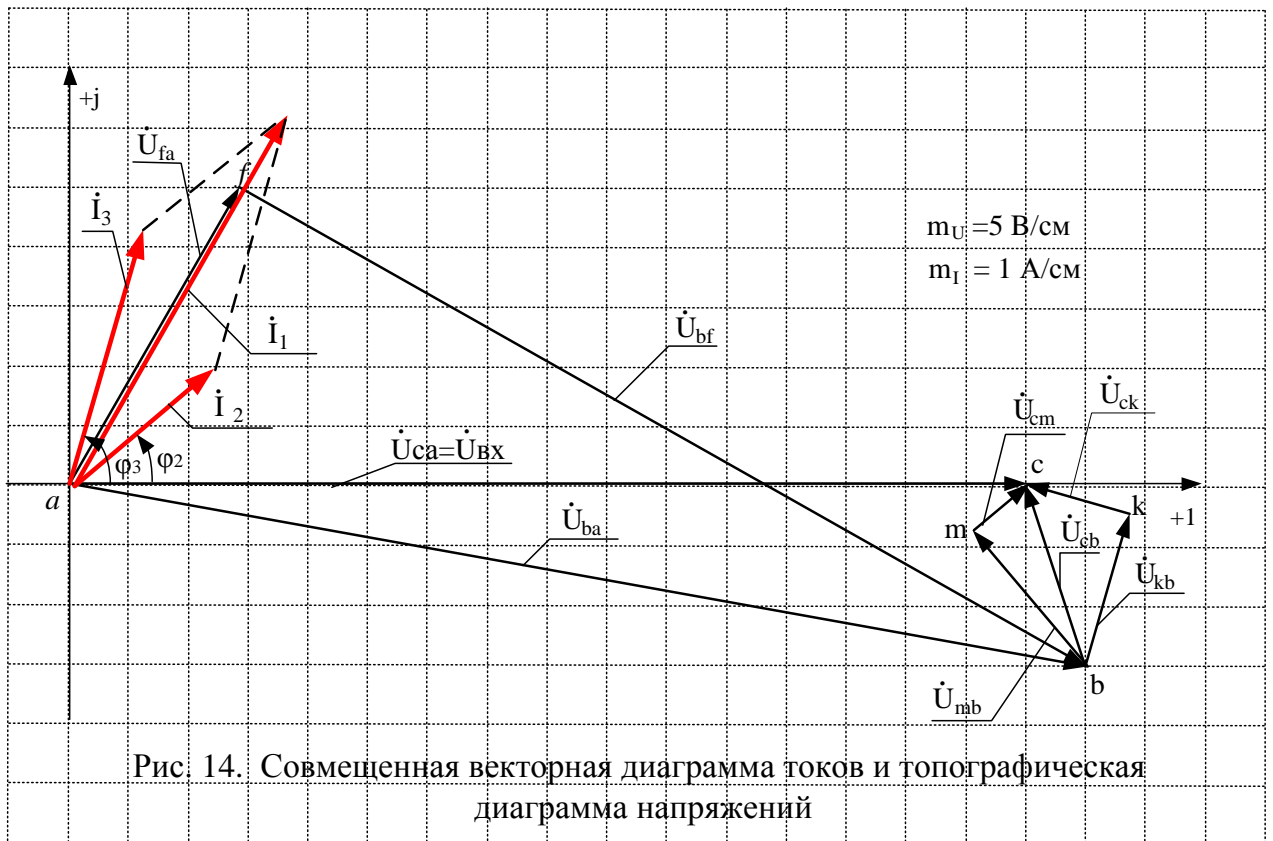


Рис. 14. Совмещенная векторная диаграмма токов и топографическая диаграмма напряжений

Задание для самостоятельного выполнения

Для электрической схемы (рис.15) в соответствии с вариантом выполнить следующие расчеты:

1. По исходным данным, представленным в таблице 2.1., изобразить электрическую схему с источником и потребителями электрической схемы.

2. Определить эквивалентное сопротивление цепи $\underline{Z}_в$ алгебраической и показательной форм.

3. Определить токи во всех ветвях цепи и напряжения на отдельных участках схемы. Найти комплексы действующих значений токов и их мгновенные значения.

4. Составить баланс мощностей.

5. Построить в масштабе совмещенную векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений.

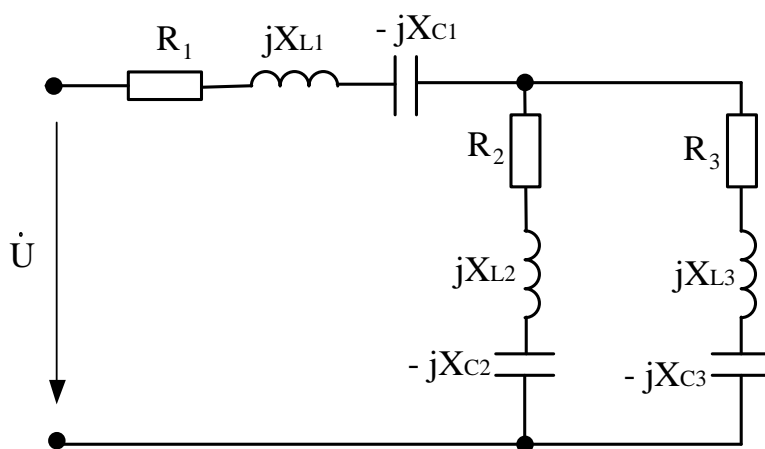


Рис. 15. Исходная электрическая цепь синусоидального тока

Таблица 2.1

Исходные данные

Вариант	Данные для расчета									
	U , В	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	X_{L1} , Ом	X_{L2} , Ом	X_{L3} , Ом	X_{C1} , Ом	X_{C2} , Ом	X_{C3} , Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	100	8	10	12	6	—	—	—	12	—
2	120	—	14	—	24	30	—	10	—	25
3	140	15	—	5	—	10	—	18	—	8

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	160	40	–	20	–	30	15	26	–	–
5	180	–	28	–	35	20	–	–	–	42
6	190	10	–	15	–	–	20	24	36	–
7	195	30	16	36	–	–	40	–	–	26
8	200	–	32	45	–	24	–	14	–	–
9	80	–	48	–	20	–	20	–	26	35
10	100	22	–	14	–	17	–	30	35	–
11	120	18	–	28	–	–	12	–	32	21
12	140	–	22	25	36	26	–	12	–	–
13	160	–	34	18	11	–	24	20	–	–
14	180	30	33	–	–	–	40	–	44	–
15	200	12	24	–	18	–	34	–	–	20
16	220	–	40	30	–	–	30	80	50	–
17	50	1	2	4	–	4	–	–	–	2
18	60	10	20	20	–	10	–	–	–	10
19	70	–	3	–	7	–	6	–	4	8
20	100	6	10	–	6	–	–	4	–	10
21	40	–	1	1	3	7	–	–	–	3
22	45	2	5	–	–	11	–	2	–	14
23	50	3	10	8	–	8	–	–	4	–
24	60	10	10	–	15	–	20	–	10	–
25	70	25	–	70	–	–	10	50	50	–
26	80	5,5	–	3,5	7,5	–	4,5	–	5	–
27	90	6	4,5	8	–	3	–	–	–	6
28	100	–	5	–	–	–	5	4	–	–
29	110	10	–	7	12	16	–	15	–	10
30	120	–	8	–	10	–	6	–	8	9
31	50	6	–	4,5	–	4	–	8	10	–
32	60	–	6,4	15	10	–	–	5	–	10
33	70	7	2	4,4	–	–	6	–	3	–
34	80	10	3	8	–	–	–	3,5	3	4
35	90	10	20	30	6	6	8	–	–	–
36	100	3	2,5	6	–	5	–	4	–	10
37	100	15	20	–	18	–	8	–	25	15

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
38	50	–	5	–	8	–	–	6	–	5
39	60	4	–	4	4,5	3	–	10	–	7
40	80	6	10	–	–	9,5	–	–	5,5	7,5
41	50	3	4	6	3	–	–	–	5	–
42	55	7	15	–	–	10	–	4	–	6
43	70	–	6	–	–	–	7	3	–	–
44	80	3	–	10	2	5	5	–	–	–
45	90	6	2	10	8	–	–	–	–	8
46	100	7	–	5	5	–	5	–	8	–
47	110	–	10	10	7	20	–	–	6	–
48	120	8	5	–	5	5	–	–	8	8
49	130	14	–	8	–	10	–	14	–	8
50	40	–	5	–	9	–	–	5	–	5
51	45	3	6	–	5	–	4	–	8	–
52	55	–	12	10	18	–	14	–	30	–
53	70	15	–	10	22	–	10	–	14	–
54	75	–	16	–	20	14	8	–	–	18
55	80	6	12	6	–	–	6	4	–	–
56	100	–	10	–	17	16	10	–	–	14
57	120	–	9	20	16	18	–	–	–	37
58	135	15	–	7	–	19	–	28	8	16
59	150	15	–	26	12	14	–	–	–	13
60	180	–	24	–	22	17	–	8	–	30
61	200	10	80	40	5	–	–	–	10	–
62	210	20	30	–	40	–	–	–	30	40
63	220	30	–	40	–	–	50	–	20	–
64	230	20	–	30	50	–	–	–	40	30
65	240	–	50	–	30	–	40	–	50	–
66	250	10	–	15	9	12	–	16	–	12
67	40	–	10	–	12	–	2	8	–	6
68	65	–	15	8	–	10	–	10	12	–
69	100	12	16	10	–	–	8	–	10	–
70	105	4	–	6	8	–	6	–	6	–
71	120	14	8	19	6	–	–	–	7	6

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
72	150	23	28	–	39	–	–	–	21	17
73	165	18	–	12	–	28	18	–	20	–
74	180	55	–	32	20	–	25	–	24	–
75	200	–	17	–	8	–	32	–	21	–
76	205	–	22	11	28	39	–	17	–	17
77	210	–	14	–	7	–	8	14	–	15
78	215	–	40	33	–	–	18	–	27	–
79	220	71	29	–	24	–	21	–	29	–
80	225	51	–	16	21	–	20	–	30	–
81	50	4	4	2	–	–	–	4	–	5
82	70	–	12	13	–	5	–	13	13	–
83	110	4	7	8	–	–	5	–	–	–
84	160	–	20	15	8	–	–	10	–	20
85	220	12	15	9	4	–	–	–	10	–
86	250	15	9	6	–	–	–	20	12	–
87	50	15	8	–	–	–	4	6	–	–
88	60	–	12	13	–	7	–	8	13	–
89	65	–	13	10	5	–	10	–	–	8
90	70	–	8	–	12	–	8	10	6	–
91	80	4	5	6	3	–	–	–	12	–
92	90	–	70	–	24	30	–	10	–	25
93	120	30	–	15	–	12	–	24	–	30
94	140	20	20	–	–	25	8	13	–	–
95	160	12	14	6	–	10	–	–	–	21
96	170	6	–	3	–	–	4	5	7	–
97	180	15	8	18	–	–	–	–	–	14
98	190	6	12	–	9	10	17	–	–	10
99	200	–	16	23	–	19	–	17	–	10
100	210	50	24	30	100	–	40	–	18	–

Тестовое задание №2

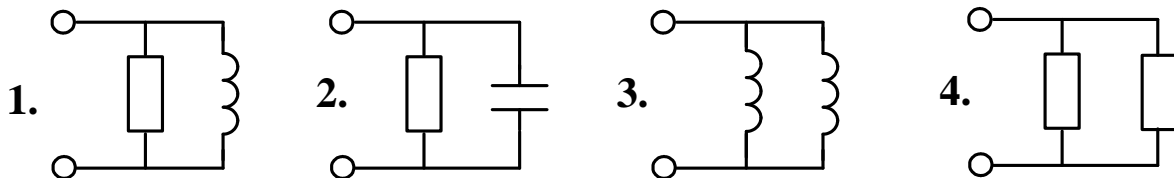
Электрические цепи переменного однофазного тока

№1. Величина синусоидального тока задана тригонометрической формулой $i(t) = I_m \cdot \sin \cdot (\omega t - \pi/2)$, А. Чему равны: а) фаза тока; б) начальная фаза?

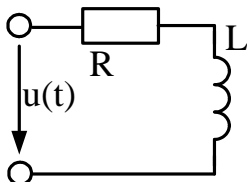
1. а) $(\omega t - \pi/2)$; б) $\pi/2$. 3. а) $(\omega t - \pi/2)$; б) $-\pi/2$.

2. а) $(\omega t + \pi/2)$; б) $\pi/2$. 4. а) (ωt) ; б) $-\pi/2$.

№2. Дана комплексная проводимость цепи $\underline{Y} = (0,7 - j0,05)$ См. Укажите, какая это цепь.



№3. Определить действующее значение тока для схемы, если $R = 80 \text{ Ом}$; $X_L = 60 \text{ Ом}$ напряжение источника $u(t) = 141 \cdot \sin \cdot 314t$, В.



1. 14,1 А. 3. 10 А.

2. 28 А. 4. 11,7 А.

№4. Дана комплексная величина тока $\dot{I} = 20 \cdot e^{j20}$, А. Выберите соответствующую ему тригонометрическую запись синусоидального тока.

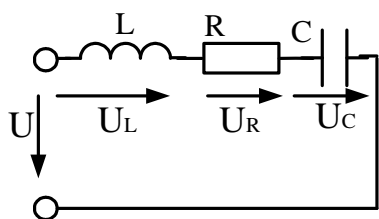
1. $i(t) = 20 \cdot \sin \cdot (314t - 20^\circ)$, А.

2. $i(t) = 28,3 \cdot \sin \cdot (\omega t - 20^\circ)$, А.

3. $i(t) = 28,3 \cdot \sin \cdot (\omega t + 20^\circ)$, А.

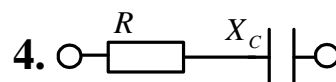
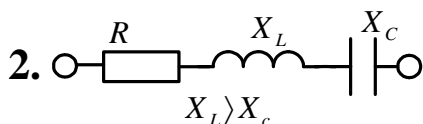
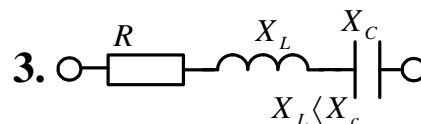
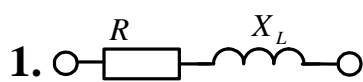
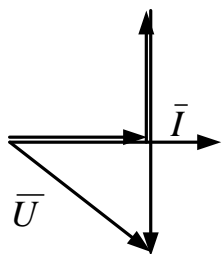
4. $i(t) = 20 \cdot \sin \cdot (314t + 20^\circ)$, А.

№5. Определить значение напряжения в схеме на индуктивном элементе, если $U_R = 30\text{ В}$; $U_C = 20\text{ В}$; $U = 50\text{ В}$.

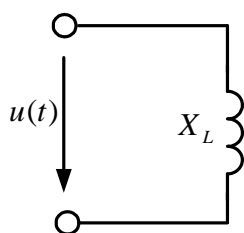


1. 60В.
2. 80В.
3. 90В.
4. 110В.

№6. Какая схема будет соответствовать данной топографической диаграмме напряжений?

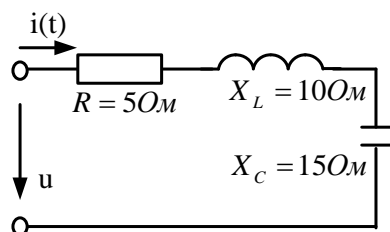


№7. Напишите мгновенное значение тока для представленной схемы, если напряжение $u(t) = 100 \cdot \sin \cdot 314t, \text{ В}$, сопротивление $X_L = 10\text{ Ом}$.



1. $i(t) = 100 \cdot \sin \cdot (314t - \pi/2), \text{ А}$.
2. $i(t) = 10 \cdot \sin \cdot (314t - \pi/2), \text{ А}$.
3. $i(t) = 10 \cdot \sin \cdot (314t + \pi/2), \text{ А}$.
4. $i(t) = 100 \cdot \sin \cdot (314t - \pi), \text{ А}$.

№8. Определить входное сопротивление для исходной схемы.



1. $\underline{Z} = (5 - j25)\text{ Ом}$.
2. $\underline{Z} = (15 - j5)\text{ Ом}$.
3. $\underline{Z} = (10 + j25)\text{ Ом}$.
4. $\underline{Z} = (5 - j5)\text{ Ом}$.

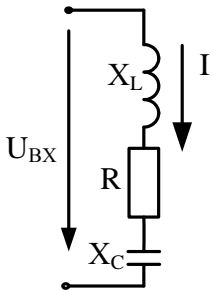
№9. Период тока равен 0,02 с. Чему равны значения: а) угловая частота; б) частота?

1. а) 314с^{-1} ; б) 100 Гц.
2. а) 100 Гц; б) 50 Гц.
3. а) 314с^{-1} ; б) 50 Гц.
4. а) 50 Гц; б) 314с^{-1} .

№10. Какие приборы дают возможность точно зафиксировать момент резонанса?

1. Вольтметр.
2. Амперметр.
3. Вольтметр и амперметр.

№11. Возможно ли явление резонанса для данной схемы. Если да, назовите, какой резонанс возможен?

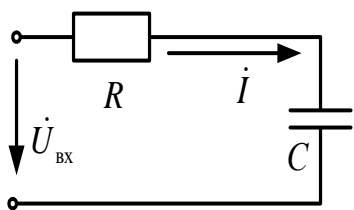


1. Не возможен.
2. Да, любой вид резонанса.
3. Только резонанс токов.
4. Только резонанс напряжений.

№12. Выберите правильную формулу для определения резонансной частоты.

1. $f_{\text{рез}} = 1/(L \cdot C)$.
2. $f_{\text{рез}} = 1/2(L \cdot C)$.
3. $f_{\text{рез}} = 1 / \sqrt{L \cdot C}$.
4. $f_{\text{рез}} = 1 / 2 \cdot \sqrt{L \cdot C}$.

№13. При увеличении частоты f полное сопротивление цепи Z ...



1. Уменьшится.
2. Достигнет минимума, а затем увеличится.
3. Останется неизменным.
4. Увеличится.

№14. Какова показательная форма записи тока, если комплексная форма записи имеет вид: $\dot{I} = (-6 + j8), A$?

1. $\sqrt{6^2 + 8^2} \cdot e^{j[180^\circ + \arctg(6/8)]}$.
2. $\sqrt{6^2 + 8^2} \cdot e^{-j\arctg(8/6)}$.
3. $\sqrt{6^2 + 8^2} \cdot e^{j[180^\circ + \arctg(8/6)]}$.
4. $\sqrt{6^2 + 8^2} \cdot e^{j[180^\circ - \arctg(8/6)]}$.

№15. Укажите основную форму энергии конденсатора.

1. Тепловая энергия.
2. Энергия магнитного поля.
3. Энергия электрического поля.

№16. Какое из приведённых выражений неправильно определяет $\cos\varphi$ приёмника энергии?

1. $\cos\varphi = R/Z$.
2. $\cos\varphi = g/y$.
3. $\cos\varphi = Q/S$.
4. $\cos\varphi = P/S$.

№17. Угол сдвига фаз между напряжением $u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$ и током $i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$ определяется как...

1. $\varphi = \psi_i - \psi_u$;
2. $\varphi = \psi_u - \psi_i$;
3. $\varphi = -\psi_i - \psi_u$;
4. $\varphi = \psi_u + \psi_i$.

№18. Комплексная форма записи величины тока имеет вид $\dot{I} = (-5 - j8), A$.

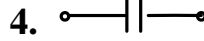
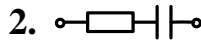
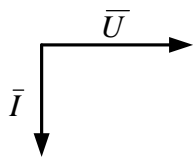
В каком квадранте комплексной плоскости находится вектор тока?

1. Первом.
2. Втором.
3. Третьем.
4. Четвертом.

№19. Угол сдвига фаз между напряжением $u(t) = 150 \cdot \sin(\omega t - \pi/4)$ и током $i(t) = 5 \cdot \sin(\omega t + \pi/6)$ определяется как...

1. $\varphi = \pi/6$.
2. $\varphi = -(5\pi/12)$.
3. $\varphi = -\pi/4$.
4. $\varphi = -\pi/6$.

№20. Какая схема будет соответствовать данной изображённой векторной диаграмме?



3 ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Объединение в одной линии электропередачи нескольких цепей переменного тока с независимыми источниками электроэнергии называется *многофазной системой*.

Наибольшее распространение получила трёхфазная система переменного тока, которая была изобретена и разработана выдающимся русским инженером М. О. Доливо-Добровольским в 1889-1891 гг.

Трёхфазные электрические цепи имеют ряд преимуществ по сравнению с однофазными цепями:

а) возможность использования наиболее простых, надёжных и дешёвых асинхронных электродвигателей;

б) меньший расход проводниковых материалов на сооружение линий электропередач и электрических сетей;

в) возможность получения двух эксплуатационных напряжений (660/380 В; 380/220 В; 220/127 В);

г) лучшие экономические показатели трёхфазных генераторов и трансформаторов.

Благодаря своим преимуществам трёхфазные цепи получили более широкое применение по сравнению с другими видами многофазных электрических цепей.

3.1 Трёхфазная система. Источник трёхфазного напряжения

Трёхфазной симметричной системой ЭДС называется совокупность трёх ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых друг относительно друга по фазе на 120° . Эти три ЭДС можно изобразить на временной (рис. 15,а) и векторной (рис. 15,б) диаграммах.

В качестве источника электрической энергии в трёхфазных цепях используют трёхфазные синхронные генераторы. В трех обмотках синхронного

генератора, называемых *фазами*, индуцируются указанные электродвижущие силы $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$.

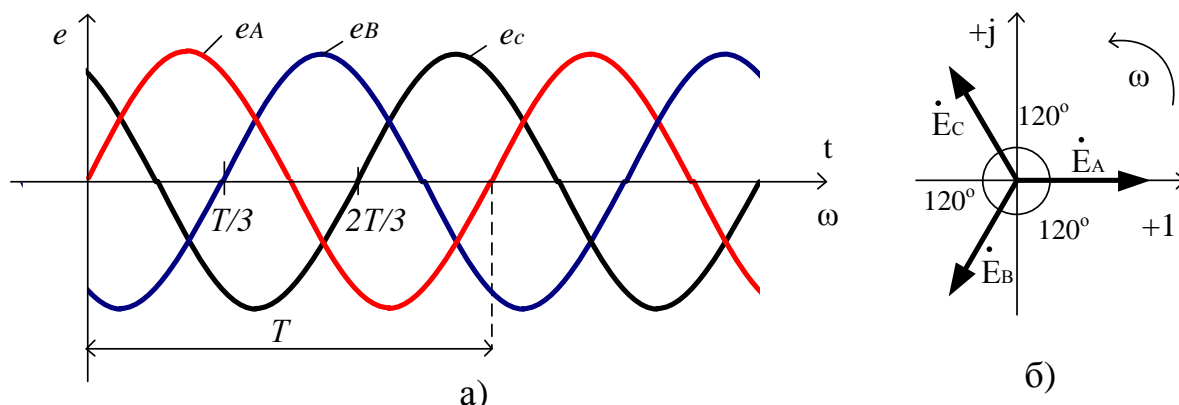


Рис. 15. Графическое изображение трехфазной симметричной системы: а) временная диаграмма; б) векторная диаграмма.

Простейший трехфазный генератор – устройство, аналогичное однофазному генератору, но имеющее в отличие от последнего три одинаковые обмотки (фазы) на якоре, начала и концы которых обозначаются соответственно A, B, C и X, Y, Z . Эти обмотки сдвинуты в пространстве относительно друг друга на равные углы $2\pi/3 = 120^\circ$.

При вращении якоря в обмотках генератора индуцируется ЭДС одной частоты и равной амплитуды, сдвинутые по фазе на 120° относительно друг друга.

Все вышесказанное относится также к величине тока и напряжения, то есть трехфазная система электрических токов (ЭДС, напряжений).

При равенстве амплитудных токов (ЭДС, напряжений) во всех фазах систему называют *симметричной*.

Если отдельные одноименные фазы генератора и приемника соединены между собой, то такую систему называют связанной трехфазной системой, в которой фазы могут быть соединены в *звезду* или *треугольник*.

Провода, соединяющие начала фаз приёмников с началами фаз генератора называются *линейными проводами*.

От трехфазного источника по проводам трехфазной сети получают питание как трёхфазные, так и однофазные приёмники электрической энергии.

Трёхфазный приемник можно рассматривать в общем случае как устройство, имеющее три одинаковых эквивалентных сопротивления, рассчитанные на подключение к трём зажимам трёхфазного источника или проводам трёхфазной сети, между которыми имеются три сдвинутых по фазе напряжения.

3.2 Способы соединения обмоток трехфазной системы

3.2.1 Соединение обмоток генератора и приемников энергии в звезду

Звезда - это такое соединение, при котором к началам обмоток генератора A, B, C присоединяются три линейных провода, идущие к приемнику, а концы обмоток X, Y, Z соединены в узел, называемый *нейтральной* или *нулевой точкой*. Таким же способом можно соединить приемник (нагрузку) в трехфазной системе. Начало фаз приемника обозначается a, b, c , концы x, y, z (рис. 16).

В *четырёхпроводной* системе к этой точке присоединен нейтральный или нулевой провод, в *трехпроводной* системе этот провод отсутствует.

Напряжение между началами и концами фаз генератора или между проводами и нейтральным (нулевым) проводом называют *фазным напряжением* и обозначают U_A, U_B, U_C или U_a, U_b, U_c .

Напряжение между любыми двумя линейными проводами называют *линейным напряжением* и обозначают U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} и U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} .

Токи, проходящие по линейным проводам, называют *линейными токами* и обозначают I_A, I_B, I_C . Токи, проходящие в фазах, называются *фазными*.

При соединении в звезду линейные токи равны соответствующим фазным токам

$$I_L = I_\Phi, \quad (3.1)$$

где I_L — линейный ток, А;

I_Φ — фазный ток, А.

Линейное напряжение равно разности векторов соответствующих фазных напряжений

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B = \dot{U}_L \cdot e^{j30^\circ}; \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{U}_L \cdot e^{-j90^\circ}; \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A = \dot{U}_L \cdot e^{j150^\circ}.\end{aligned}\quad (3.2)$$

Для симметричной трехфазной системы напряжений линейное напряжение всегда больше фазного

$$U_L = \sqrt{3} \cdot U_\Phi, \quad (3.3)$$

где U_L – линейное напряжение, В;

U_Φ – фазное напряжение, В.

Векторная сумма линейных напряжений всегда равна нулю.

При соединении приемников энергии в звезду трехфазная цепь может быть четырехпроводной (рис. 16) и трехпроводной (схема без нейтрального провода).

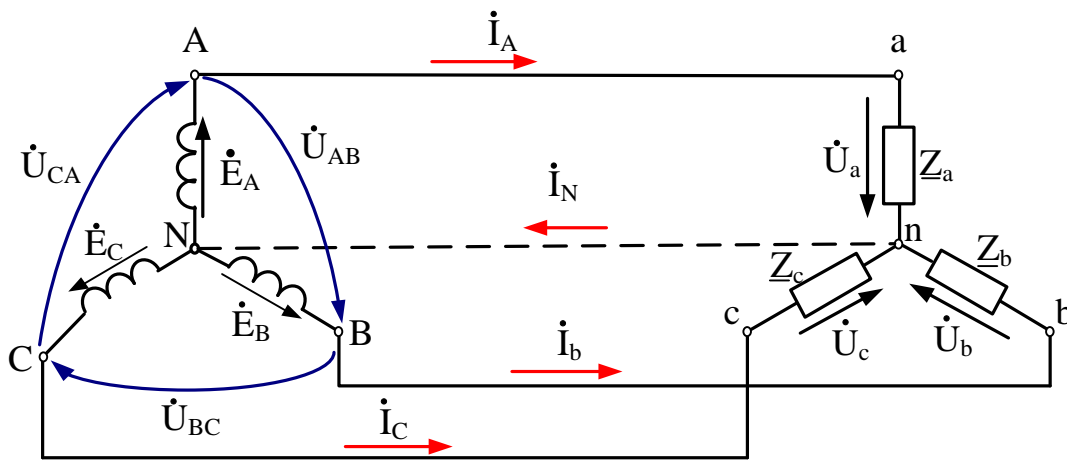


Рис. 16. Трехфазная система соединение «звезда» с нейтральным проводом
Действующее значение токов в фазах приемников определяются по закону Ома

$$I_A = \frac{U_A}{Z_A}, I_B = \frac{U_B}{Z_B}, I_C = \frac{U_C}{Z_C}, \quad (3.4)$$

где U_A, U_B, U_C – действующее значение фазных напряжений, В;

Z_A, Z_B, Z_C – полные сопротивления фаз приемников, Ом.

В четырехпроводной системе ток в нейтральном проводе равен векторной сумме токов отдельных фаз

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C, \quad (3.5)$$

где \dot{I}_N – ток в нейтральном проводе, А.

В четырехпроводной трехфазной цепи при симметричной системе напряжений и равномерной нагрузке, то есть равенстве полных сопротивлений фаз приемников $Z_A = Z_B = Z_C$, ток в нейтральном проводе равен нулю.

При равномерной нагрузке надобность в нейтральном проводе отпадает, так как ток в нём будет отсутствовать ($\dot{I}_N = 0$) и линия в этих случаях выполняется трёхпроводной (рис.16).

На рисунке 17 представлена совмещенная ВДТ и ТДН при симметричной активной нагрузке ($\varphi = 0$).

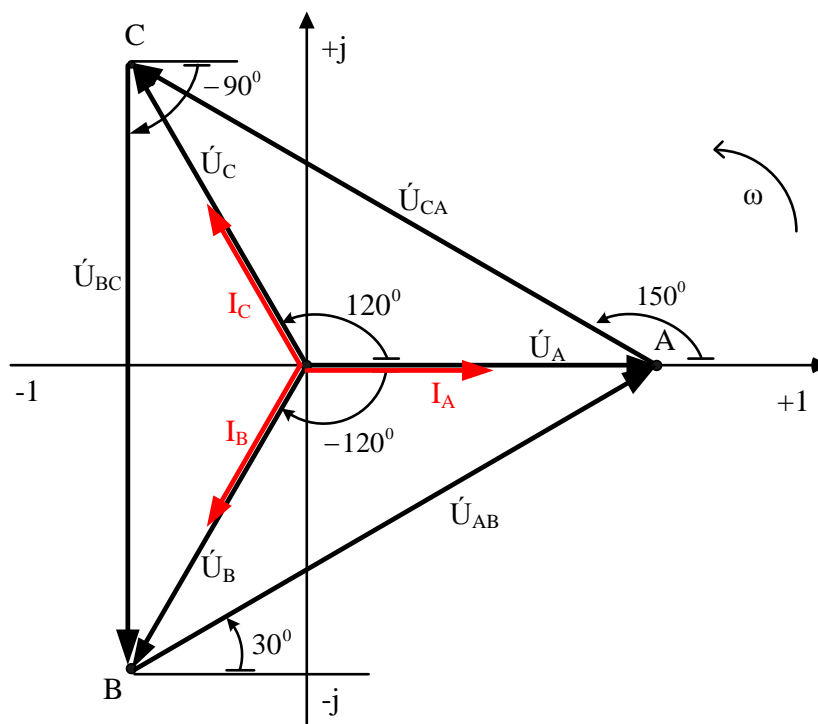


Рис. 17 Совмещенная ВДТ и ТДН при соединении «звезда - звезда» трехфазной системы (нагрузка активная)

Активная мощность всей цепи равна при неравномерной нагрузке сумме активных мощностей отдельных фаз

$$P = P_A + P_B + P_C; [\text{Вт}], \quad (3.6)$$

где P_A, P_B, P_C – активные мощности фаз А, В, С;

$$\begin{aligned}
 P_A &= U_A \cdot I_A \cdot \cos\varphi_A; \\
 P_B &= U_B \cdot I_B \cdot \cos\varphi_B; \\
 P_C &= U_C \cdot I_C \cdot \cos\varphi_C.
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

Реактивная мощность всей цепи при неравномерной нагрузке равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C; [\text{вар}], \tag{3.8}$$

где Q_A, Q_B, Q_C – реактивная мощность фаз А, В, С;

$$\begin{aligned}
 Q_A &= U_A \cdot I_A \cdot \sin\varphi_A; \\
 Q_B &= U_B \cdot I_B \cdot \sin\varphi_B; \\
 Q_C &= U_C \cdot I_C \cdot \sin\varphi_C.
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

Полная потребляемая мощность цепи при неравномерной нагрузке

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}; [\text{В} \cdot \text{А}]. \tag{3.10}$$

При симметричной системе напряжений и равномерной нагрузке активная мощность всей цепи

$$P = 3 \cdot U_\Phi \cdot I_\Phi \cdot \cos\varphi_\Phi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos\varphi_L. \tag{3.11}$$

Реактивная мощность всей цепи

$$Q = 3 \cdot U_\Phi \cdot I_\Phi \cdot \sin\varphi_\Phi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin\varphi_L. \tag{3.12}$$

Полная мощность всей цепи

$$S = 3 \cdot U_\Phi \cdot I_\Phi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L. \tag{3.13}$$

3.2.2 Соединение обмоток генератора и приемников энергии в треугольник

Для соединения трёх однофазных приёмников при включении их в трехфазную сеть *треугольником* необходимо конец первой фазы соединить с началом второй, конец второй - с началом третьей, конец третьей - с началом первой, а затем к началам фаз подвести линейные провода (рис.18).

При соединении приемника энергии в треугольник (рис.18) сопротивления Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca} подключают непосредственно к линейным проводам, поэтому линейные напряжения являются одновременно и фазными для приемни-

ков. Положительное направление линейных и фазных токов указано на рисунке 18.

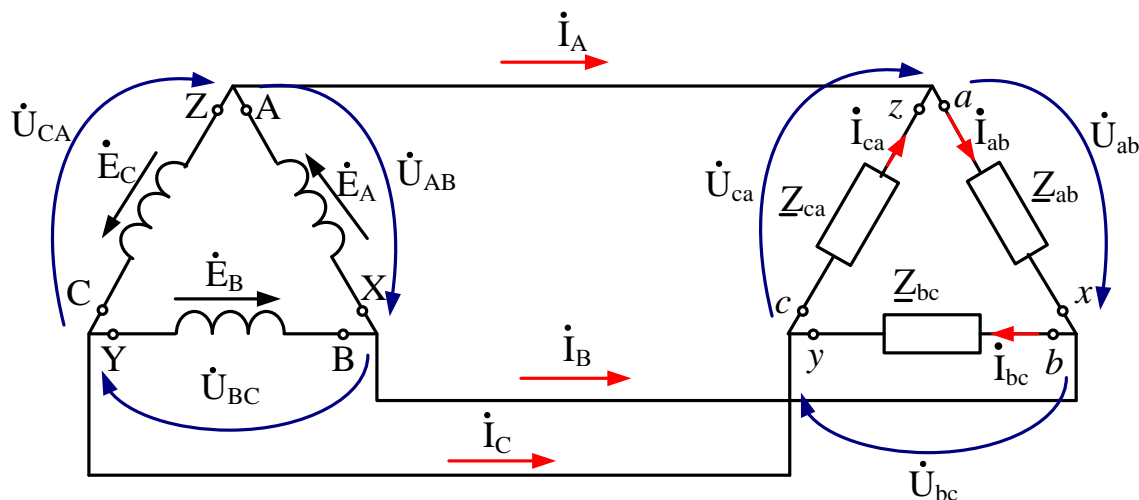


Рис. 18. Трехфазная система соединение треугольником

Фазные напряжения на генераторе являются и линейными

$$U_L = U_\Phi \quad (3.14)$$

$$U_A = U_{AB}; U_B = U_{BC}; U_C = U_{CA}. \quad (3.15)$$

Соотношение между фазными и линейными токами можно записать, применив первый закон Кирхгофа для узлов A, B, C . Вектор любого линейного тока находится как разность векторов соответствующих фазных токов

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}, \end{aligned} \quad (3.16)$$

где $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ – линейные токи трехфазной цепи, А;

$\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{ca}$ – фазные токи нагрузки, А.

Из вышеизложенного можно сделать вывод -линейный ток всегда больше фазного

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_\Phi. \quad (3.17)$$

При симметричной системе напряжений и равномерной нагрузке, то есть при $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$, линейные токи равны между собой, так как фазные токи одинаковы по значению. Совмещенная ВДТ и ТДН при симметричной

активной нагрузке ($\varphi = 0$) представлены на рисунке 19 (источник соединен звездой, нагрузка соединена треугольником).

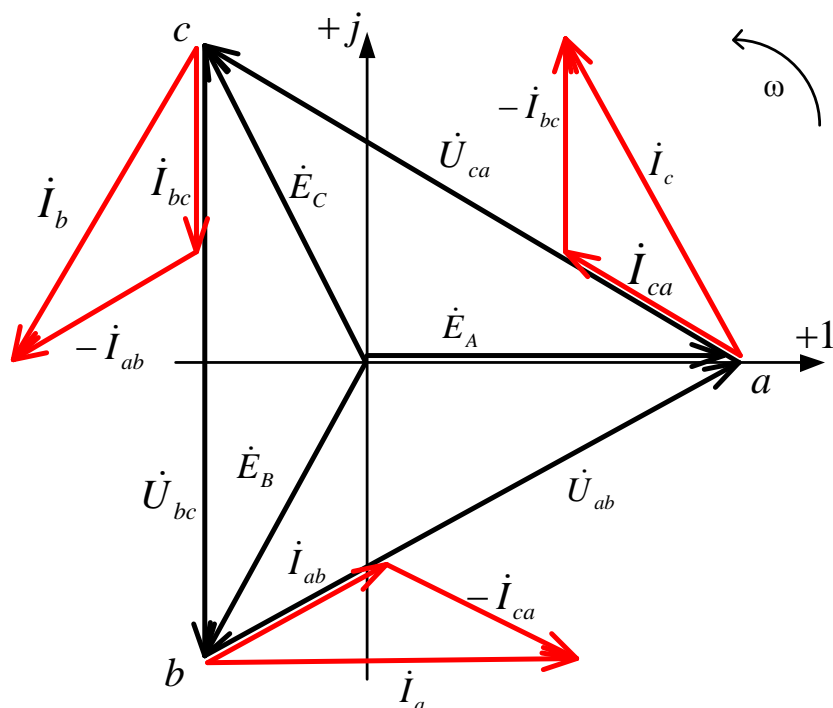


Рис. 19. Совмещенная ВДТ и ТДН при соединении «звезда - треугольник» трехфазной системы (нагрузка активная)

Определение полной, активной и реактивной мощностей цепи при неравномерной и равномерной нагрузках в трехфазной системе (соединение треугольник) рассчитываются по формулам (3.6) – (3.13).

3.3 Пример расчета задачи.

Трехфазные электрические цепи


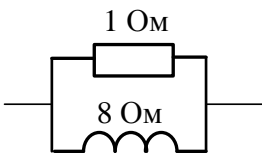
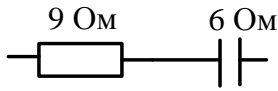
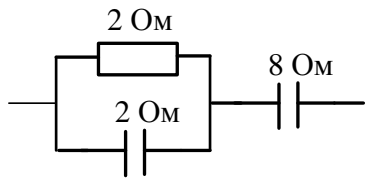
В трехфазной цепи имеются трехфазный генератор, соединенный звездой, создающий трехфазную симметричную систему ЭДС, а также несимметричная нагрузка, соединенная звездой. *Примечание:* начальную фазу ЭДС E_A принять нулевой.

Для исходных данных (табл. 3), соответствующих номеру варианта, необходимо выполнить следующие расчеты:

1. Зарисовать схему цепи в соответствии с заданием варианта.
2. Рассчитать токи в фазах нагрузки и линейных проводах.
3. Рассчитать напряжения на фазах потребителя и падения напряжений в линейных проводах.
4. Рассчитать мощности трехфазной системы.
5. Построить совмещенную векторную диаграмму токов (ВДТ) и топографическую диаграмму напряжений (ТДН).

Таблица 3

Исходные данные

№варианта	E_A , В	Вид соединения нагрузки	Линейная нагрузка
33	370	Y	3 Ом 
Фазная нагрузка			
Фаза «а»	Фаза «b»	Фаза «с»	
			

3.3.1 Составление электрической схемы трехфазной системы

Чтобы зарисовать схему цепи в соответствии с заданием варианта, необходимо сначала проанализировать все данные таблицы 3. Учесть, что изначально источник имеет симметричную нагрузку с соединением «звезда». Не перепутать начала и концы фаз источника. ЭДС источника всегда направлены от конца фазы к началу. Фазные напряжения источника разнонаправлены с ЭДС источника. Линейные напряжения изображаются между началами фаз источника (или между линейными проводами).

Линейные провода содержат одинаковые элементы (конденсаторы емкости), по ним протекают линейные токи. Фазы приемника соединены (в дан-

ном варианте) звездой. Фазы нагрузки различны как по виду соединения элементов, так и по характеру.

Все элементы и электрические величины, заданные в данном варианте, изображены на рисунке 20.

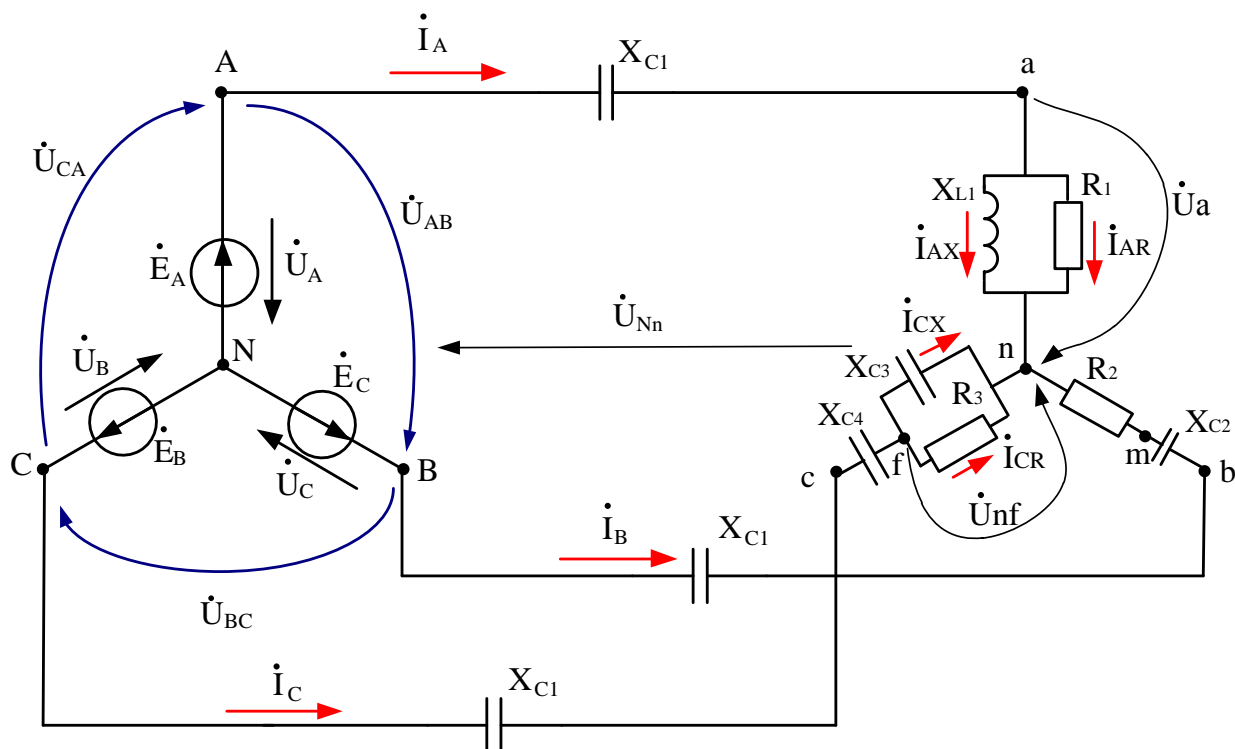


Рис. 20. Исходная схема трехфазной несимметричной системы

3.3.2 Расчет токов в фазах нагрузки и линейных проводах

Для определения токов в трехфазной системе сначала необходимо записать комплексные значения напряжений источника питания:

а) фазные напряжения генератора рассчитываются из соотношения

$$\dot{U}_\Phi = E_A \cdot e^{j\varphi}. \quad (3.18)$$

Используя выражение (3.18), записывают фазные напряжения генератора

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_\Phi \cdot e^{j0^\circ} = 370 \cdot e^{j0^\circ} = 370 \text{ В}; \\ \dot{U}_B &= \dot{U}_\Phi \cdot e^{-j120^\circ} = 370 \cdot e^{-j120^\circ} = 370 \cdot [\cos(-120^\circ) + j\sin(-120^\circ)] = \\ &= (-185 - j320,4) \text{ В}; \end{aligned}$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_\Phi \cdot e^{j120^\circ} = 370 \cdot e^{j120^\circ} = (-185 + j320,4)V.$$

б) линейные напряжения генератора рассчитываются из соотношения

$$U_L = \sqrt{3} \cdot U_\Phi \quad (3.19)$$

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = \sqrt{3} \cdot U_\Phi \cdot e^{j30^\circ} = 640 \cdot e^{j30^\circ} B;$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C = \sqrt{3} \cdot U_\Phi \cdot e^{-j90^\circ} = 640 \cdot e^{-j90^\circ} B;$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A = \sqrt{3} \cdot U_\Phi \cdot e^{j150^\circ} = 640 \cdot e^{j150^\circ} B.$$

Фазные и линейные напряжения генератора изображены на ТДН (рис.21).

Так как для нахождения токов используется закон Ома, то нужно вычислить сопротивления линейных проводов и сопротивления фаз нагрузки.

Элементы в линейных проводах одинаковые, значит сопротивления линейных проводов тоже равны. Поэтому можно рассчитать одну формулу с учетом того, что в линии находится только емкостное сопротивление (рис.20).

Значит сопротивление линейных проводов в данном варианте

$$\underline{Z}_L = -jX_{C1} = 3 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ Ом.}$$

Комплексные значения полных сопротивлений фаз нагрузки рассчитываются для каждой фазы отдельно, так как нагрузка несимметрична (учитывается способ соединения элементов (рис.20)).

В фазе "a" параллельно соединены резистор R_1 и катушка индуктивности X_{L1}

$$\begin{aligned} \underline{Z}_a &= \frac{R_1 \cdot (jX_{L1})}{R_1 + jX_{L1}} = \frac{1 \cdot 8 \cdot e^{j90^\circ}}{1 + j8} = \frac{8 \cdot e^{j90^\circ}}{8,06 \cdot e^{j82,8^\circ}} = 0,99 \cdot e^{j7,2^\circ} \\ &= (0,98 + j0,12) \text{ Ом.} \end{aligned}$$

В фазе "b" последовательно соединены резистор R_2 и конденсатор емкости X_{C2} : $\underline{Z}_b = R_2 - jX_{C2} = 9 - j6 = 10,8 \cdot e^{-j33,6^\circ} \text{ Ом.}$

В фазе "с" смешанный вид соединения – параллельно резистор R_3 и конденсатор емкости X_{C3} , последовательно этому соединению конденсатор емкости X_{C4} .

$$\underline{Z}_c = \frac{R_3 \cdot (-jX_{C3})}{R_3 - jX_{C3}} - jX_{C4} = \frac{2 \cdot 2 \cdot e^{-j90^\circ}}{2 - j2} - j8 = 1 - j9 = 9,05 \cdot e^{-j83,6^\circ} \text{ Ом.}$$

Сопротивления фаз с учетом сопротивлений в линейном проводе:

фаза "а" (участок схемы "An")

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_l + \underline{Z}_a = -j3 + 0,98 + j0,12 = 0,98 - j2,88 = 3,04 \cdot e^{-j71^\circ} \text{ Ом;}$$

фаза "b" (участок схемы "Bn")

$$\underline{Z}_B = \underline{Z}_l + \underline{Z}_b = -j3 + 9 - j6 = 9 - j9 = 12,73 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ Ом;}$$

фаза "с" (участок схемы "Cn")

$$\underline{Z}_C = \underline{Z}_l + \underline{Z}_c = -j3 + 1 - j9 = 1 - j12 = 12,04 \cdot e^{-j85^\circ} \text{ Ом.}$$

Так как соединение трехфазной цепи имеет вид «звезда – звезда»(рис.20), то значения токов фаз рассчитывается из соотношения $I_l = I_\phi$.

Но так как нагрузка несимметричная и неоднородная, то прежде чем определять токи, необходимо найти напряжение смещения нейтрали (рис.20)

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{E}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{E}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{E}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}, \quad (3.20)$$

где $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ – ЭДС источника;

$\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$ – комплексные значения проводимостей фаз с учетом сопротивления в линейном проводе.

Рассчитываются проводимости фаз

$$\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A} = \frac{1}{3,04 \cdot e^{-j71^\circ}} = 0,329 \cdot e^{j71^\circ} = (0,107 + j0,311) \text{ См;}$$

$$\underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B} = \frac{1}{12,73 \cdot e^{-j45^\circ}} = 0,079 \cdot e^{j45^\circ} = (0,056 + j0,056) \text{ См;}$$

$$\underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C} = \frac{1}{12,04 \cdot e^{-j85^\circ}} = 0,083 \cdot e^{j85^\circ} = (0,007 + j0,083) \text{ См.}$$

Так как значения ЭДС источника по модулю равны между собой, то выражение (3.20) можно упростить, при этом учесть, что источник питания в исходной схеме симметричен (ЭДС сдвинуты относительно друг друга на 120°).

$$\begin{aligned}\dot{U}_{Nn} &= \frac{\dot{E}_A \cdot (\underline{Y}_A + \underline{Y}_B \cdot e^{-j120^\circ} + \underline{Y}_C \cdot e^{j120^\circ})}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} = \\ &= \frac{370 \cdot (0,329 \cdot e^{j71^\circ} + 0,079 \cdot e^{j45^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} + 0,083 \cdot e^{j85^\circ} \cdot e^{j120^\circ})}{0,107 + j0,311 + 0,056 + j0,056 + 0,007 + j0,083} \\ &= \frac{121,73 \cdot e^{j71^\circ} + 29,23 \cdot e^{-j75^\circ} + 30,71 \cdot e^{j205^\circ}}{0,17 + j0,45} = \\ &= \frac{39,63 + j115,09 + 7,57 - j28,23 - 27,83 - j12,98}{0,17 + j0,45} = \frac{276,38 \cdot e^{j75^\circ}}{0,481 \cdot e^{j69^\circ}} \\ &= 158,79 \cdot e^{j6^\circ} = (157,92 + j16,59) \text{ В.}\end{aligned}$$

Зная напряжение смещения нейтрали, рассчитываем линейные токи

$$\begin{aligned}\dot{i}_A &= \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_{Nn}}{\underline{Z}_A} = \frac{370 - (157,92 + j16,59)}{3,04 \cdot e^{-j71^\circ}} = \frac{212,65 \cdot e^{-j5^\circ}}{3,04 \cdot e^{-j71^\circ}} = 69,95 \cdot e^{j66^\circ} \text{ А}; \\ \dot{i}_B &= \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_{Nn}}{\underline{Z}_B} = \frac{-185 - j320,4 - (157,92 + j16,59)}{12,73 \cdot e^{-j45^\circ}} = \frac{480,84 \cdot e^{-j136^\circ}}{12,73 \cdot e^{-j45^\circ}} = \\ &= 37,77 \cdot e^{-j91^\circ} \text{ А}; \\ \dot{i}_C &= \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_{Nn}}{\underline{Z}_C} = \frac{-185 + j320,4 - (157,92 + j16,59)}{12,04 \cdot e^{-j85^\circ}} = \frac{457,94 \cdot e^{j139^\circ}}{12,04 \cdot e^{-j85^\circ}} = \\ &= 38,03 \cdot e^{j224^\circ} \text{ А.}\end{aligned}$$

В исходной схеме (рис.20) имеется параллельное соединение резистора и конденсатора емкости в фазах "а" и "с". При построении ВДТ необходимо это учесть. Поэтому вычисляется величина токов, протекающих по этим элементам: резисторы R_1, R_3 (активная составляющая тока); конденсатор с сопротивлением X_{C3} и катушка индуктивности с сопротивлением X_{L1} (реактивная составляющая тока) (рис.20).

Для фазы "а" ток рассчитывается с учетом фазного напряжения потребителя U_a между началом и концом фазы (точка "а" и "n"):

на активном элементе R_1 – активная составляющая тока:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{AR} &= \frac{\dot{U}_a}{R_1} = \frac{\underline{Z}_a \cdot \dot{I}_A}{R_1} = \frac{0,99 \cdot e^{j7,2^\circ} \cdot 69,95 \cdot e^{j66^\circ}}{1 \cdot e^{j0^\circ}} = \frac{68,25 \cdot e^{j73,2^\circ}}{1 \cdot e^{j0^\circ}} = \\ &= 68,25 \cdot e^{j73,2^\circ} \text{ A}; \end{aligned}$$

на реактивном элементе X_{L1} (катушка индуктивности) – реактивная составляющая тока:

$$\dot{i}_{AX} = \frac{\dot{U}_a}{jX_{L1}} = \frac{\underline{Z}_a \cdot \dot{I}_A}{jX_{L1}} = \frac{0,99 \cdot e^{j7,2^\circ} \cdot 69,65 \cdot e^{j66^\circ}}{8 \cdot e^{j90^\circ}} = 8,62 \cdot e^{-j16,8^\circ} \text{ A}.$$

Для фазы "с" ток разветвления рассчитывается следующим образом:

- 1) на схеме ставится дополнительная точка "f" (рис.20);
- 2) находится сопротивление на этом участке "nf" (элементы соединены параллельно)

$$\underline{Z}_{fn} = \frac{R_3 \cdot (-jX_{C3})}{R_3 - jX_{C3}} = \frac{2 \cdot (-j2)}{2 - j2} = 1,4 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ Ом};$$

- 3) рассчитывается напряжение на параллельном участке "nf"

$$\dot{U}_{fn} = \underline{Z}_{fn} \cdot \dot{I}_C = 1,4 \cdot e^{-j45^\circ} \cdot 38,03 \cdot e^{j224^\circ} = 53,62 \cdot e^{j179^\circ} \text{ В};$$

- 4) определяются токи разветвления:

на активном элементе R_3 – активная составляющая тока

$$\dot{i}_{CR} = \frac{\dot{U}_{fn}}{R_3} = \frac{53,62 \cdot e^{j179^\circ}}{2 \cdot e^{j0^\circ}} = 26,81 \cdot e^{j179^\circ} \text{ A};$$

на реактивном элементе X_{C3} (конденсатор емкости) – реактивная составляющая тока

$$\dot{i}_{CX} = \frac{\dot{U}_{fn}}{-jX_{C3}} = \frac{53,62 \cdot e^{j179^\circ}}{2 \cdot e^{-j90^\circ}} = 26,81 \cdot e^{j269^\circ} \text{ A}.$$

Все найденные токи изображаются на ВДТ (рис.21).

3.3.3 Определение напряжений на отдельных участках цепи

Для построения ТДН необходимо рассчитать падение напряжений на фазах потребителя (нагрузки)

$$\dot{U}_a = \underline{Z}_a \cdot \dot{I}_A = 0,99 \cdot e^{j7,2^\circ} \cdot 69,95 \cdot e^{j66^\circ} = 69,25 \cdot e^{j73,2^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_b = \underline{Z}_b \cdot \dot{I}_B = 10,8 \cdot e^{-j33,6^\circ} \cdot 37,77 \cdot e^{-j91^\circ} = 407,92 \cdot e^{-j124,6^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_c = \underline{Z}_c \cdot \dot{I}_C = 9,05 \cdot e^{-j83,6^\circ} \cdot 38,03 \cdot e^{j224^\circ} = 344,55 \cdot e^{j140,4^\circ} \text{ В}.$$

Падение напряжений на нагрузке в местах последовательного соединения элементов (рис.20):

фаза "b":

$$\dot{U}_{mn} = R_2 \cdot \dot{I}_B = 9 \cdot e^{j0^\circ} \cdot 37,77 \cdot e^{-j91^\circ} = 339,93 \cdot e^{-j91^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{bm} = -jX_{C2} \cdot \dot{I}_B = 6 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 37,77 \cdot e^{-j91^\circ} = 226,62 \cdot e^{-j181^\circ} \text{ В};$$

фаза "c":

$$\dot{U}_{fn} = \underline{Z}_{fn} \cdot \dot{I}_C = 1,4 \cdot e^{-j45^\circ} \cdot 38,03 \cdot e^{j224^\circ} = 53,62 \cdot e^{j179^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{cf} = -jX_{C4} \cdot \dot{I}_C = 8 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 38,03 \cdot e^{j224^\circ} = 304,24 \cdot e^{j134^\circ} \text{ В}.$$

Падение напряжений в линейных проводах определяют для каждого линейного провода трехфазной цепи:

$$\text{Для фазы "a": } \dot{U}_{Aa} = \underline{Z}_L \cdot \dot{I}_A = 3 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 69,95 \cdot e^{j66^\circ} = 209,85 \cdot e^{-j24^\circ} \text{ В};$$

$$\text{Для фазы "b" : } \dot{U}_{Bb} = \underline{Z}_L \cdot \dot{I}_B = 3 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 37,77 \cdot e^{-j91^\circ} = 113,31 \cdot e^{-j181^\circ} \text{ В};$$

$$\text{Для фазы "c": } \dot{U}_{Cc} = \underline{Z}_L \cdot \dot{I}_C = 3 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 38,03 \cdot e^{j224^\circ} = 114,09 \cdot e^{j134^\circ} \text{ В}.$$

3.3.4 Расчет мощности трехфазной несимметричной системы

Так как трехфазная цепь представляет собой совокупность трех однофазных электрических цепей, то полную мощность системы можно представить в виде суммы мощностей трех фаз

$$\underline{S} = \underline{S}_A + \underline{S}_B + \underline{S}_C, \quad (3.21)$$

где $\underline{S}_A, \underline{S}_B, \underline{S}_C$ – комплексные значения полных мощностей фаз, $\underline{S}_k = \dot{U}_k \cdot \dot{I}_k$;

\dot{I}_k – сопряженное значение тока.

Мощность фазы "a"

$$\begin{aligned}\underline{S}_A &= \dot{U}_A \cdot \dot{I}_A = 370 \cdot e^{j0^\circ} \cdot 69,95 \cdot e^{-j66^\circ} = 2588,15 \cdot e^{-j66^\circ} = \\ &= (10526,95 - j2364,39) \text{ВА};\end{aligned}$$

Мощность фазы "b"

$$\begin{aligned}\underline{S}_B &= \dot{U}_B \cdot \dot{I}_B = 370 \cdot e^{-j120^\circ} \cdot 37,77 \cdot e^{j91^\circ} = 13974,9 \cdot e^{-j29^\circ} = \\ &= (12222,72 - j6775,17) \text{ВА};\end{aligned}$$

Мощность фазы "c"

$$\begin{aligned}\underline{S}_C &= \dot{U}_C \cdot \dot{I}_C = 370 \cdot e^{j120^\circ} \cdot 38,03 \cdot e^{-j224^\circ} = 14071,1 \cdot e^{-j104^\circ} = \\ &= (-3404,11 - j13653,13) \text{ВА}.\end{aligned}$$

Полная мощность трехфазной несимметричной системы

$$\begin{aligned}\underline{S} &= 10526,95 - j2364,39 + 12222,72 - j6775,17 - 12222,72 - j6775,17 = \\ &= 19345,56 - j22792,69 = 29895,78 \cdot e^{-j49,7^\circ} \text{ВА}.\end{aligned}$$

Активная мощность системы $P = 19345,56$ Вт

Реактивная мощность $Q = -22792,69$ вар.

Знак «-» перед значением реактивной мощности говорит о том, что по реактивным составляющим схема носит емкостный характер. Вся же схема носит активно-емкостный характер, так как в выражении полной мощности присутствует значение активной и реактивной мощности.

3.3.5 Построение совмещенной векторной диаграммы токов и топографической диаграммы напряжений

Построение ВДТ и ТДН начинается с построения звезды напряжений генератора в масштабе $m_U = 40$ В/см. Вектор напряжения \dot{U}_A откладывается по вещественной оси (-1; +1) из начала координат (N, n).

Фазные вектора генератора развернуты относительно друг друга. Вектор \dot{U}_B отстает от вектора \dot{U}_A , а вектор \dot{U}_C опережает вектор \dot{U}_A на угол 120° . Полученные точки A, B, C образуют треугольник, состоящий из линейных напряжений генератора $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$.

Так как нагрузка несимметричная, то ТДН имеет напряжение смещения нейтрали \dot{U}_{Nn} . Оно строится из точки N под углом $\varphi = 6^\circ$ (пункт 3.3.2) относительно вещественной оси.

Фазные напряжения приемника строятся из конца вектора напряжения смещения нейтрали \dot{U}_{Nn} (точка "n"). Вектор \dot{U}_a откладывается относительно вещественной оси на угол $\varphi = 73,2^\circ$; вектор \dot{U}_b – на угол $\varphi = -124,6^\circ$; вектор \dot{U}_c – на угол $\varphi = 140,4^\circ$ (пункт 3.3.3).

Остальные вектора падения напряжений строятся по расчетам пункта 3.3.3 в том же масштабе. Все углы векторов напряжений откладываются относительно вещественной оси.

ВДТ строится с учетом расчетов пункта 3.3.2.

Вектора токов откладываются из конца вектора напряжения смещения нейтрали \dot{U}_{Nn} (точка "n") в масштабе $m_I = 10 \text{ A/см}$. Вектор тока \dot{I}_A смещен относительно вещественной оси на угол $\varphi = 66^\circ$; вектор \dot{I}_B смещен на угол $\varphi = -91^\circ$; вектор \dot{I}_C на угол $\varphi = 224^\circ$.

Токи на участках разветвления в фазах приемника (фаза "a" и "c") строятся из точки "n". Для фазы "a" относительно напряжения на участке разветвления \dot{U}_a ток на резисторе \dot{I}_{AR} будет строиться параллельно фазному напряжению нагрузки \dot{U}_a , а ток на индуктивности \dot{I}_{AX} будет отставать от напряжения \dot{U}_a на $\varphi = 90^\circ$ (так как индуктивная нагрузка).

Для фазы "c" относительно напряжения на участке разветвления \dot{U}_{fn} ток на резисторе \dot{I}_{CR} будет строиться параллельно напряжению \dot{U}_{fn} , а ток на конденсаторе \dot{I}_{CX} будет опережать вектор напряжения \dot{U}_{fn} на $\varphi = 90^\circ$ (так как емкостная нагрузка).

Все построения ВДТ и ТДН представлены на рисунке 21.

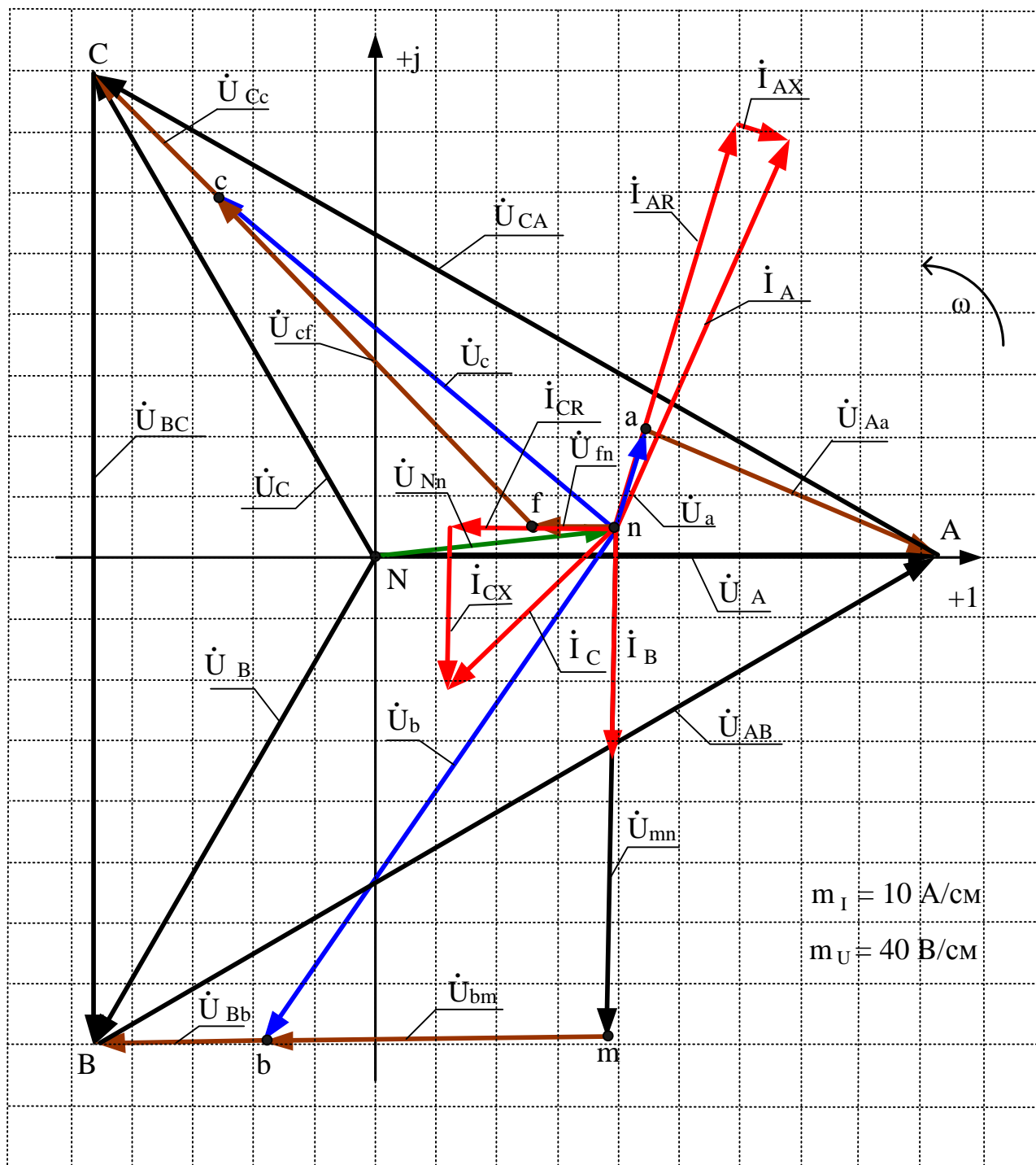


Рис.21. – Совмещенная ВДТ и ТДН при несимметричном режиме трехфазной системы (соединение «звезда – звезда»)

Задание для самостоятельного выполнения

В трехфазной цепи имеются трехфазный генератор, соединенный звездой, создающий трехфазную симметричную систему ЭДС, а также несимметричная нагрузка. *Примечание:* начальную фазу ЭДС E_A принять нулевой.

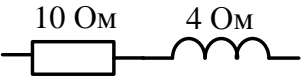
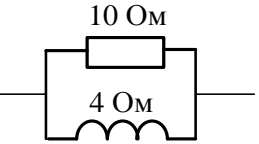
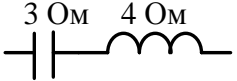
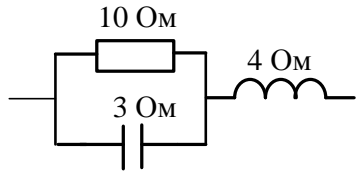
Для исходных данных (таблица 3.1), соответствующих номеру вашего варианта, необходимо выполнить следующие расчеты:

1. Зарисовать схему цепи в соответствии с заданием варианта.
2. Рассчитать токи в фазах нагрузки и линейных проводах.
3. Рассчитать напряжения на фазах потребителя и падения напряжений в линейных проводах.
4. Рассчитать мощности трехфазной системы.
5. Построить совмещенную векторную диаграмму токов (ВДТ) и топографическую диаграмму напряжений (ТДН).

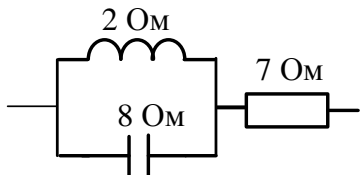
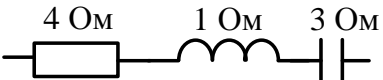
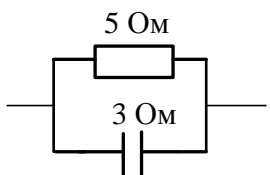
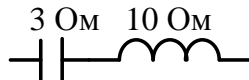
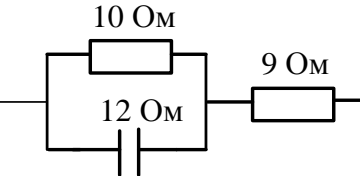
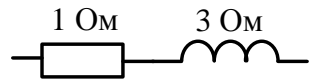
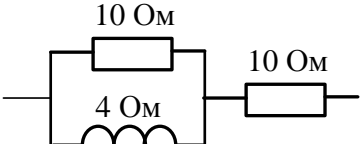
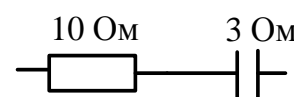
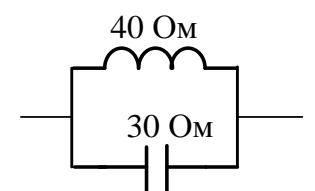
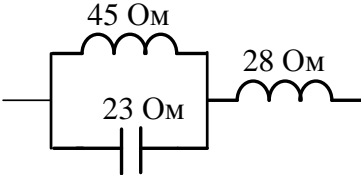
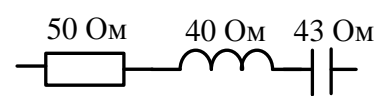

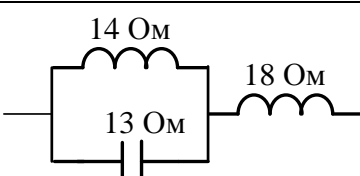
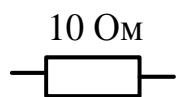
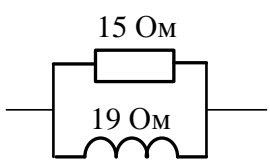
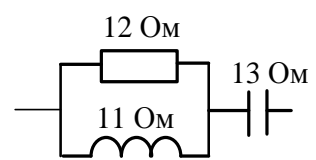
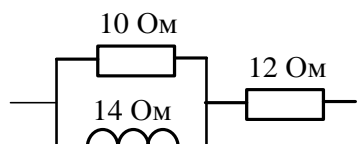
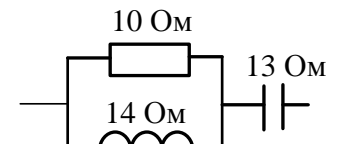
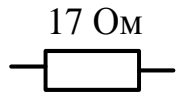
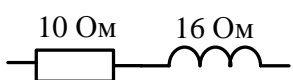
∞

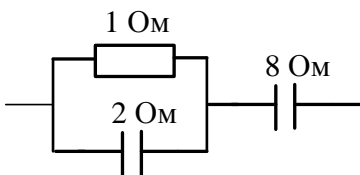
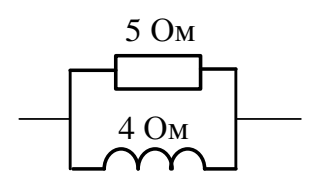
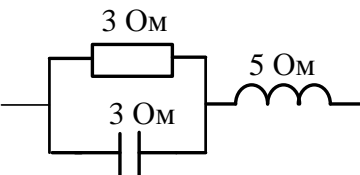
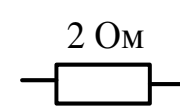
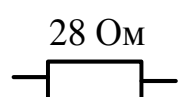
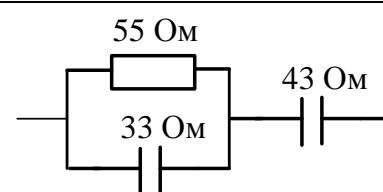
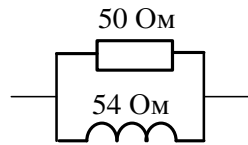
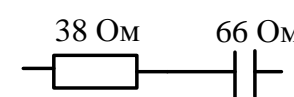
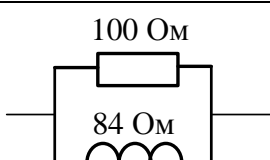
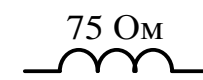
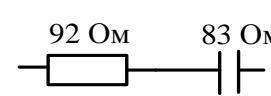
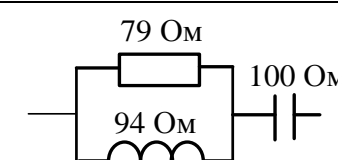
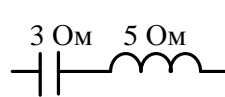
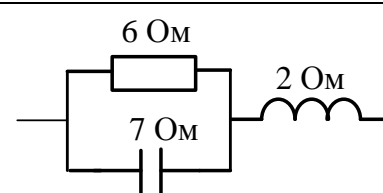

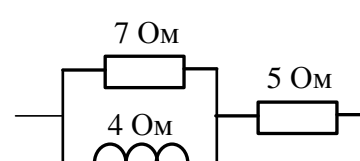
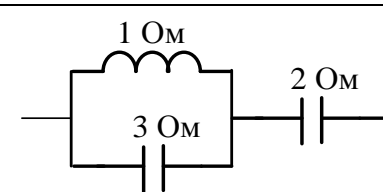
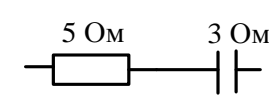
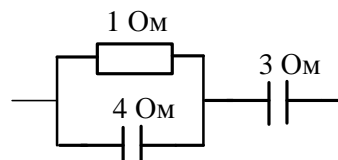

Таблица 3.1

Исходные данные

вариант	$E_A, В$	Вид соединения	Линейная нагрузка	Фазная нагрузка		
				Фаза «а»	Фаза «b»	Фаза «с»
1	2	3	4	5	6	7
1	50	Y				

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7
2	60	Δ				
3	70	Y				
4	80	Δ				
5	95	Y				
6	100	Δ				


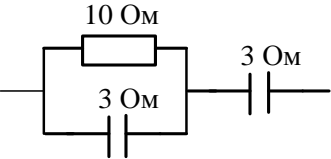
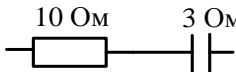
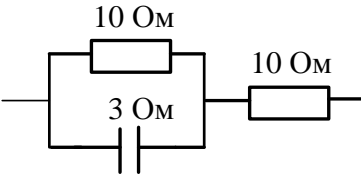

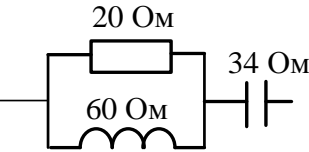
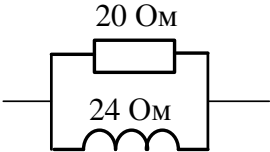
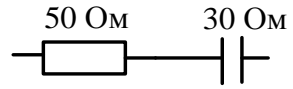
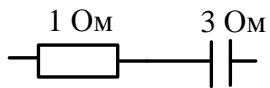

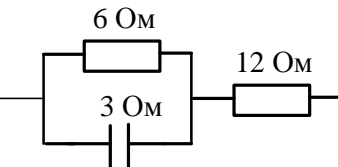
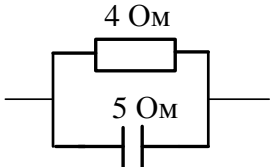
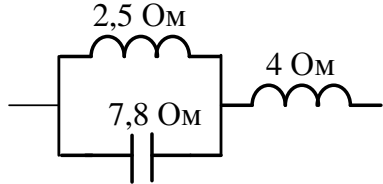
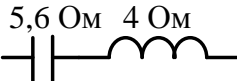
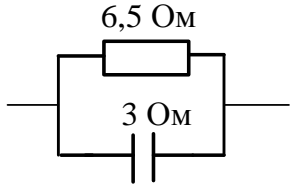
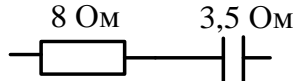
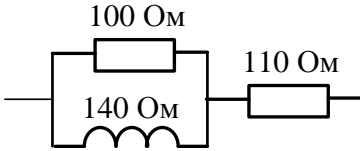
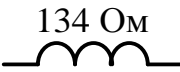
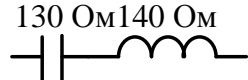
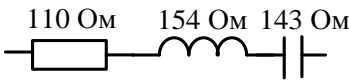
1	2	3	4	5	6	7
7	110	Y				
8	115	Δ				
9	120	Y				
10	130	Δ				
11	135	Y				

Продолжение таблицы 3.1

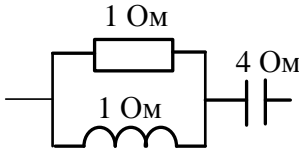
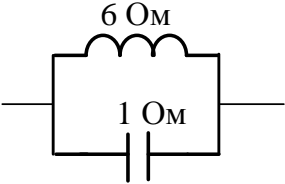
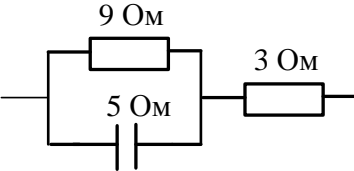
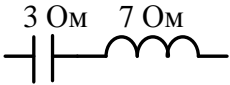
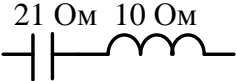
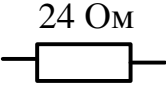
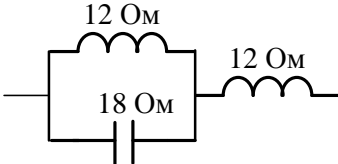
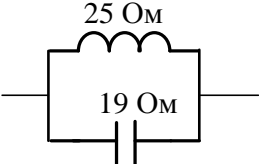
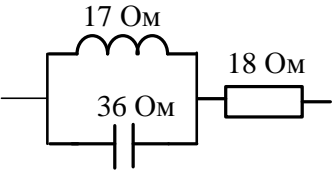
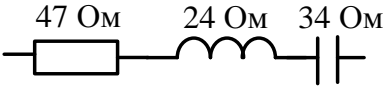
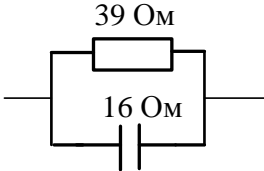
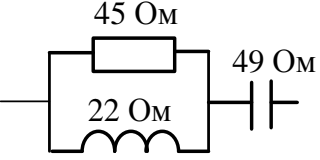
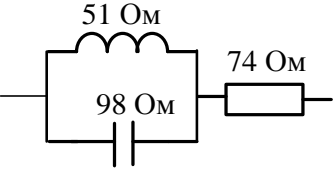
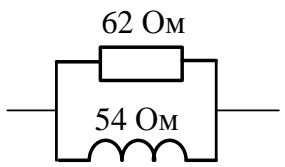
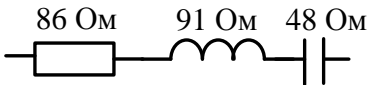
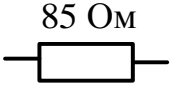
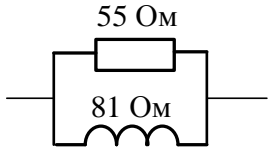
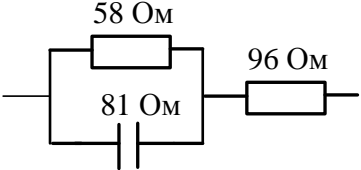
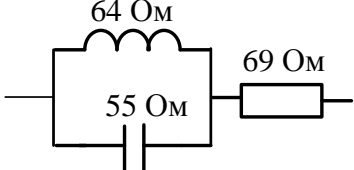
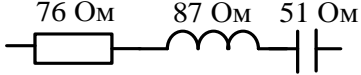
1	2	3	4	5	6	7
12	140	Δ				
13	150	Y				
14	160	Δ				
15	180	Y				
16	200	Δ				

Продолжение таблицы 3.1

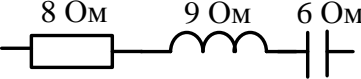

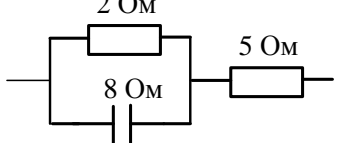
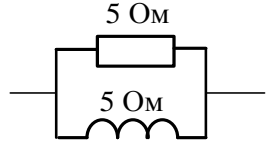

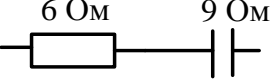
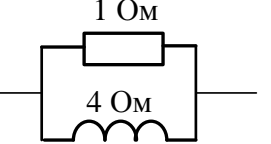
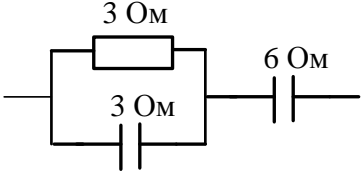
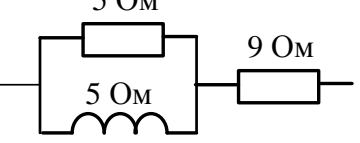
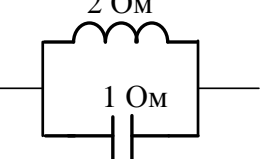
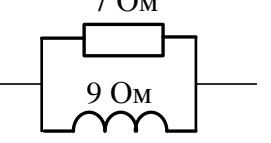
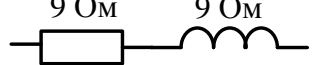
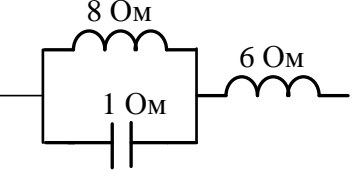
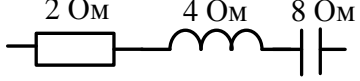
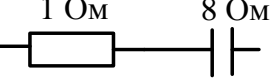
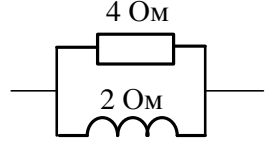
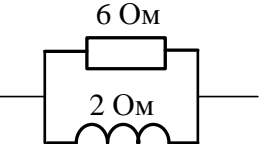
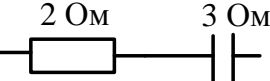
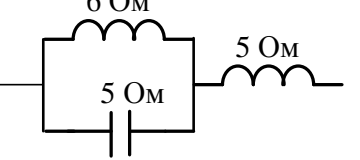
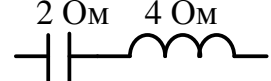
1	2	3	4	5	6	7
17	210	Y				
18	220	Δ				
19	230	Y				
20	240	Δ				
21	250	Y				

1	2	3	4	5	6	7
22	260	Δ				
23	270	Y				
24	280	Δ				
25	290	Y				
26	300	Δ				

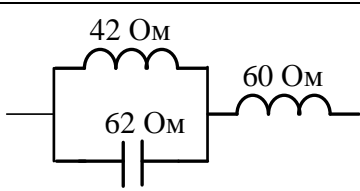
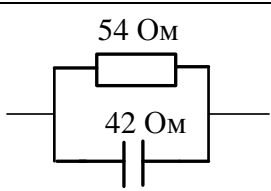
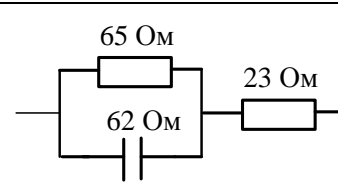
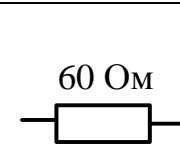
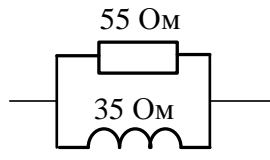
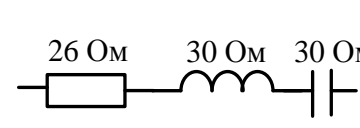
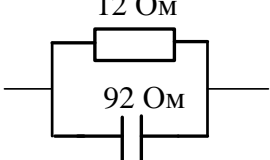
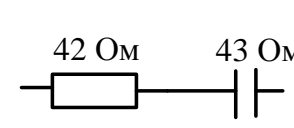
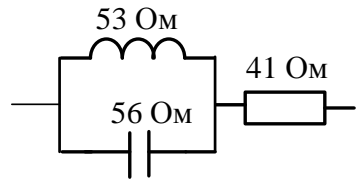
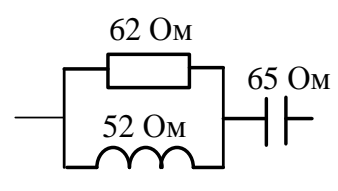
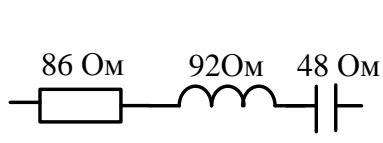
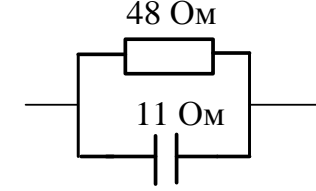
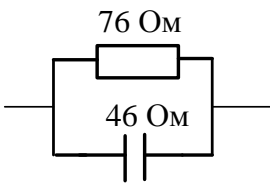
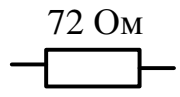
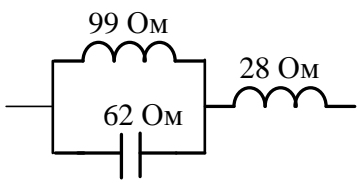
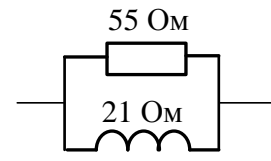
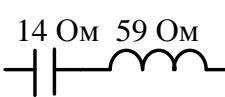
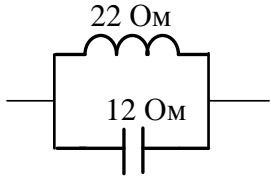
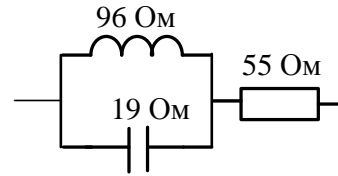
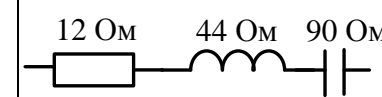
Продолжение таблицы 3.1

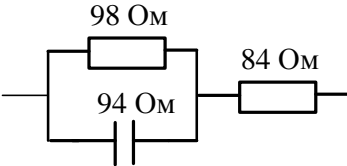
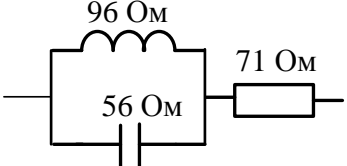
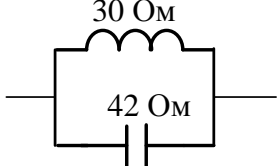
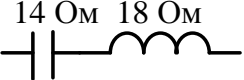
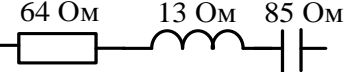
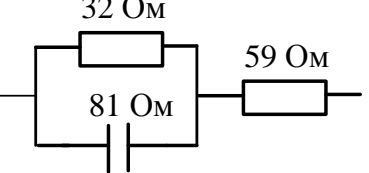
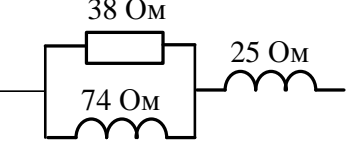
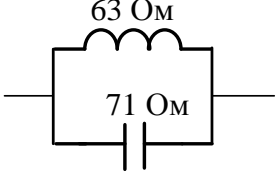
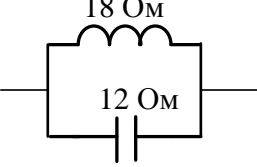
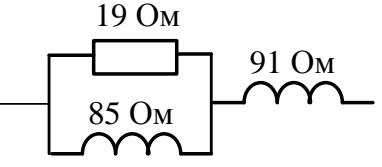
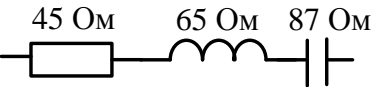
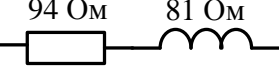
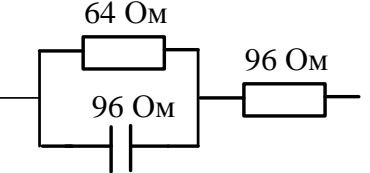
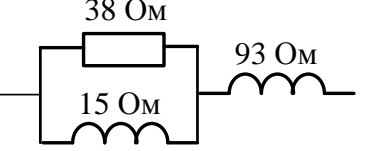
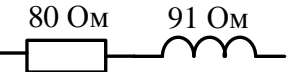
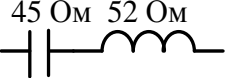
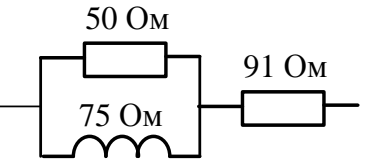
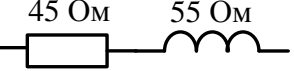
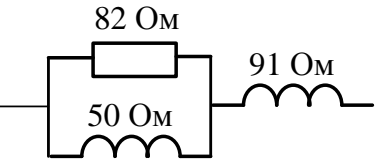
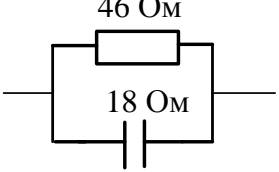
1	2	3	4	5	6	7
27	310	Y				
28	320	Δ				
29	330	Y				
30	340	Δ				
31	350	Y				

Продолжение таблицы 3.1


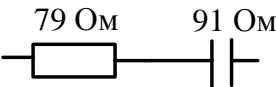
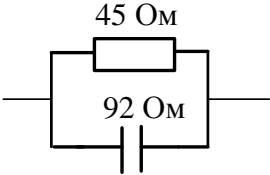
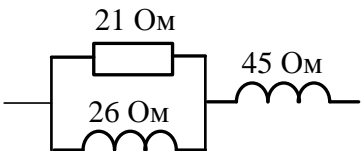
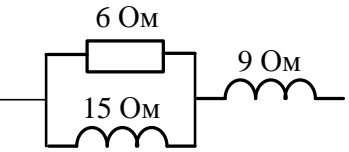
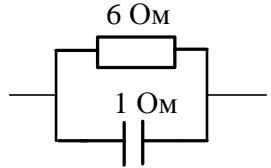

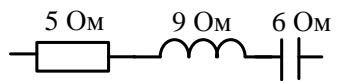
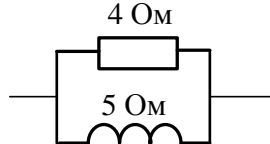
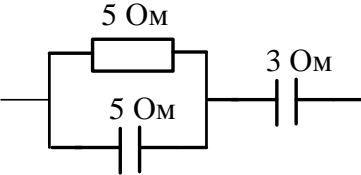
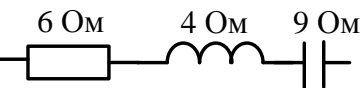
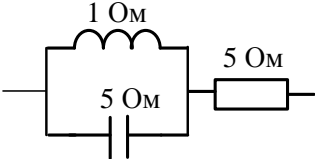
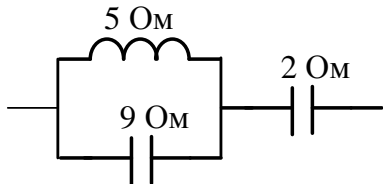
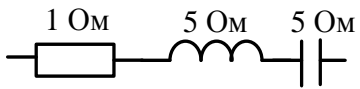
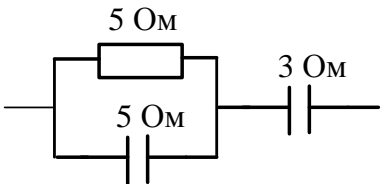
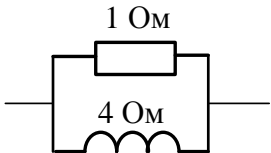
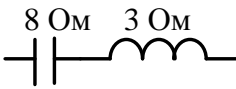
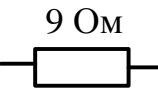
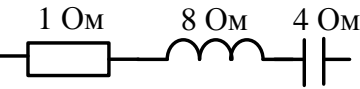
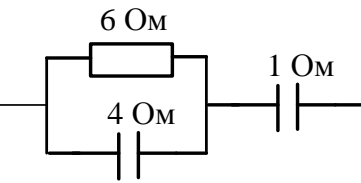
1	2	3	4	5	6	7
32	360	Δ				
33	370	Y				
34	380	Δ				
35	10	Y				
36	20	Δ				

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7
37	30	Y				
38	40	Δ				
39	55	Y				
40	65	Δ				
41	75	Y				

1	2	3	4	5	6	7
42	85	Δ				
43	105	Y				
44	125	Δ				
45	135	Y				
46	145	Δ				

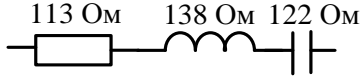
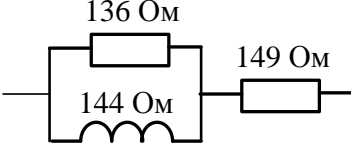
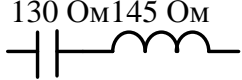

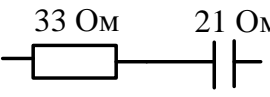

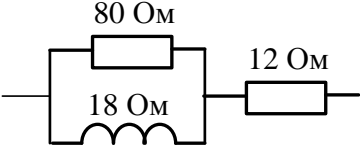
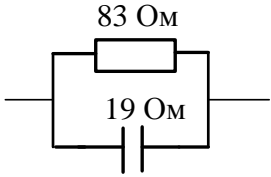
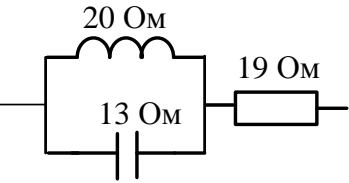
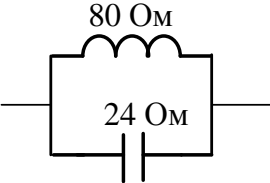
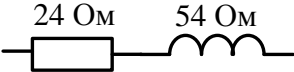
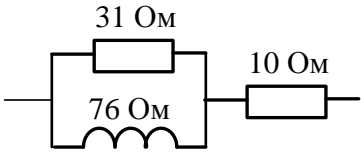
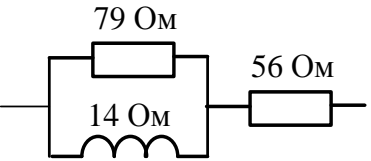
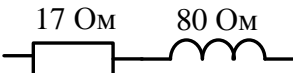
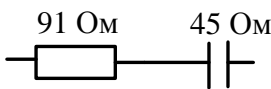
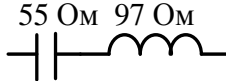

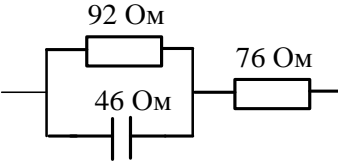
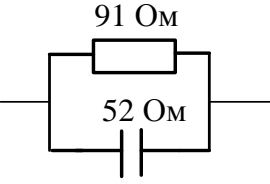
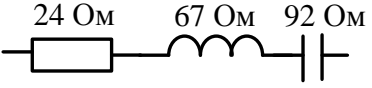
Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7
47	155	Y				
48	165	Δ				
49	175	Y				
50	185	Δ				
51	195	Y				

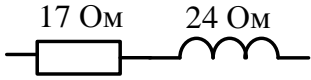
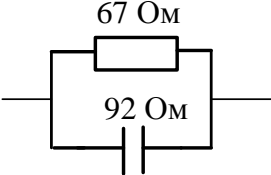
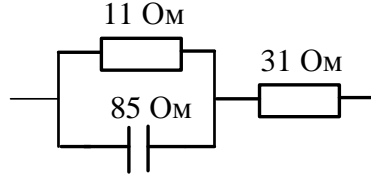
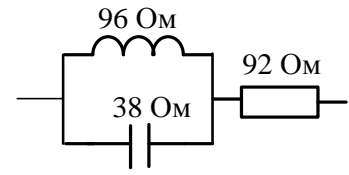
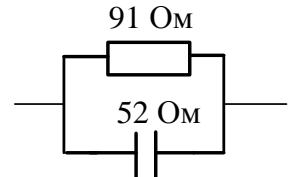
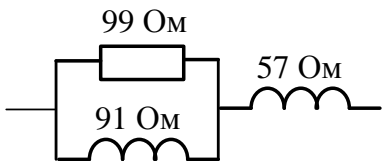
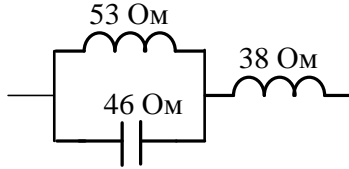
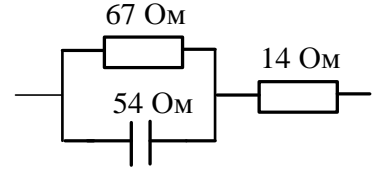
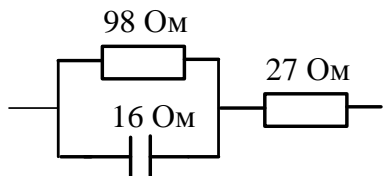
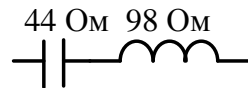
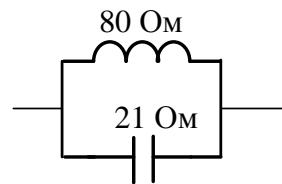
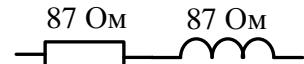
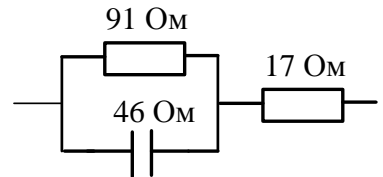
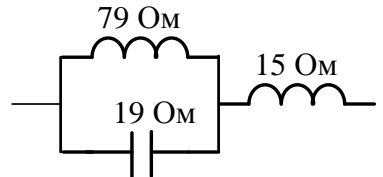

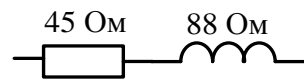
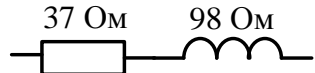
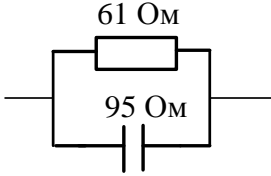
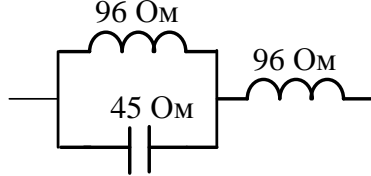
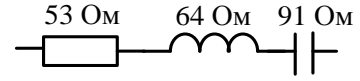
Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7
52	205	Δ				
53	215	Y				
54	225	Δ				
55	235	Y				
56	245	Δ				

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7
57	255	Y				
58	265	Δ				
59	275	Y				
60	285	Δ				
61	295	Y				

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7
62	305	Δ				
63	315	Y				
64	325	Δ				
65	335	Y				
66	345	Δ				

Продолжение таблицы 3.1

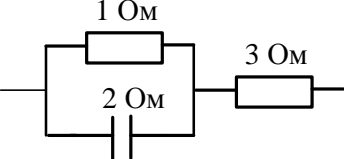
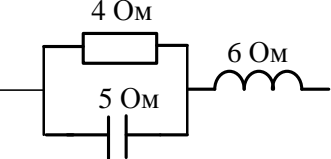

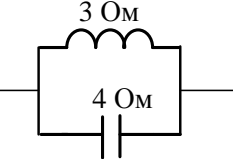
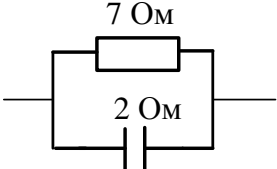
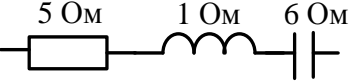
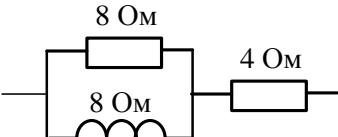


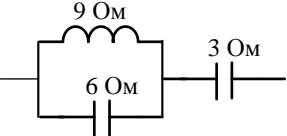
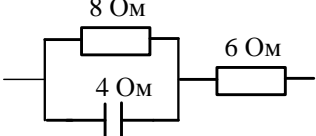
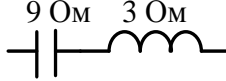
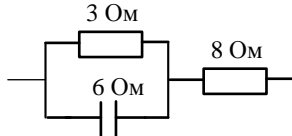

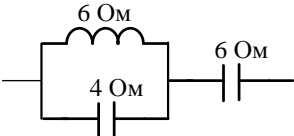
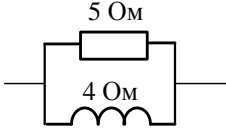
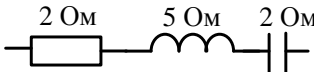
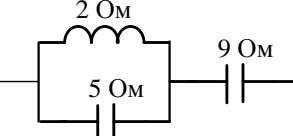
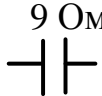
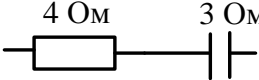
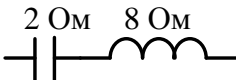
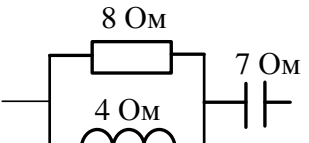
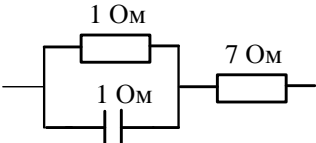
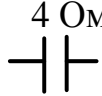
1	2	3	4	5	6	7
67	355	Y				
68	365	Δ				
69	375	Y				
70	385	Δ				
71	395	Y				

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7
72	400	Y				
73	50	Δ				
74	60	Y				
75	70	Δ				
76	80	Y				

1	2	3	4	5	6	7
77	90	Δ				
78	100	Y				
79	110	Δ				
80	120	Y				
81	130	Δ				

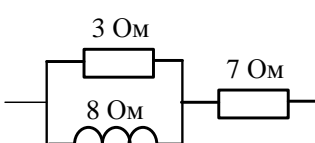
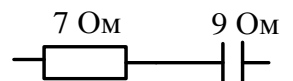
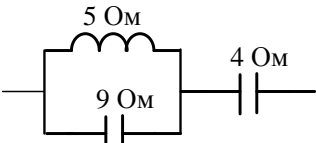
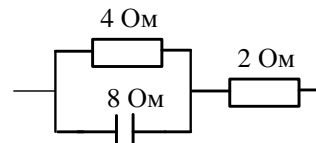
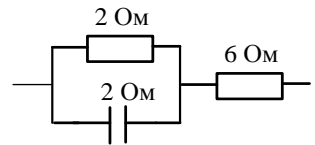
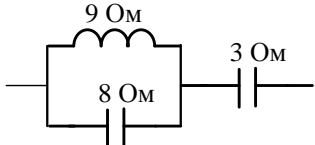
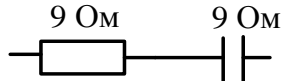
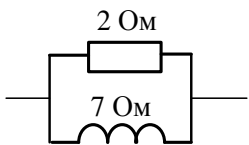
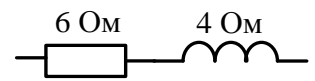
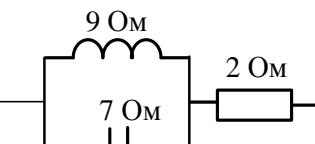
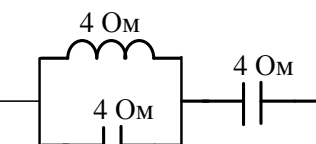
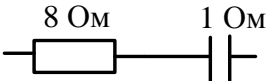
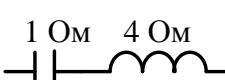
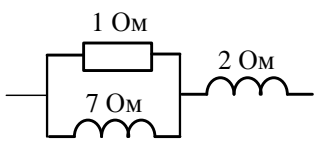
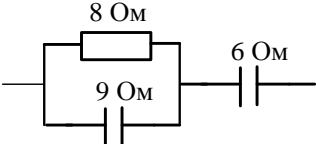
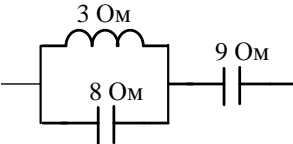
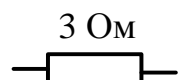
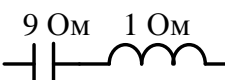
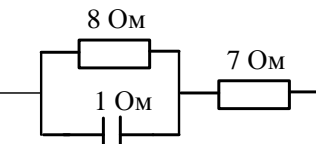
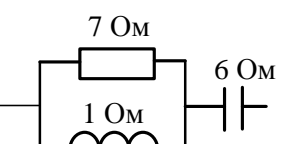
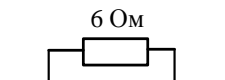
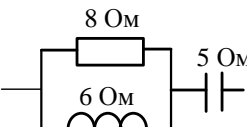
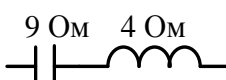
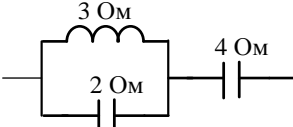
Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7
82	140	Y				
83	150	Δ				
84	160	Y				
85	170	Δ				
86	180	Y				
87	190	Δ				

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7
88	200	Y				
89	210	Δ				
90	220	Y				
91	230	Δ				
92	240	Y				
93	250	Δ				

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7
94	260	Y				
95	270	Δ				
96	280	Y				
97	300	Δ				
98	310	Y				
100	360	Δ				

Тестовое задание №3

Трёхфазные электрические цепи переменного тока

№1. Чему равен ток в нулевом проводе при симметричной трехфазной системе токов?

1. Нулю.
2. Величине, меньшей суммы действующих значений токов.
3. Сумме действующих значений токов.

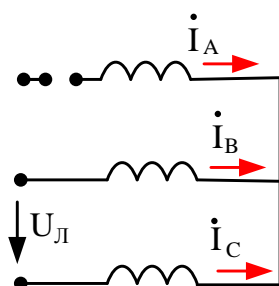
№2. Симметричная трехфазная нагрузка соединена звездой. Линейное напряжение $U_L = 380$ В. Определите значение фазного напряжения.

1. $U_\phi = 127$ В.
2. $U_\phi = 380$ В.
3. $U_\phi = 250$ В.
4. $U_\phi = 220$ В.

№3. С какой точкой соединяется начало первой обмотки при соединении обмоток генератора треугольником?

1. С началом второй.
2. С концом второй.
3. С концом третьей.

№4. Для схемы определите ток I_B при обрыве фазы "a", если напряжение линейное $U_L = 200$ В, сопротивление нагрузки $X_L = 20$ Ом.

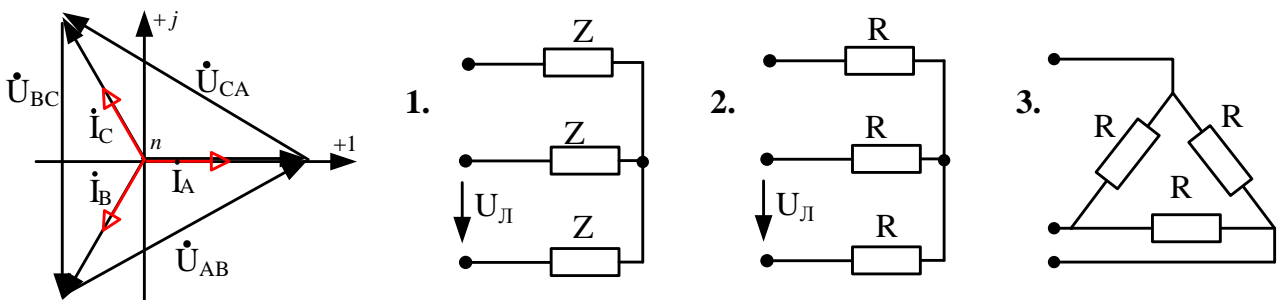


1. 5 А.
2. 10 А.
3. 15 А.
4. 20 А.

№5. Фазное напряжение 220 В, фазный ток 5 А. Нагрузка симметричная. Коэффициент мощности 0,8. Определите активную мощность трехфазной цепи.

1. $P = 880$ Вт.
2. $P = 1100$ Вт.
3. $P = 2640$ Вт.

№6. Какая схема соответствует данной диаграмме?



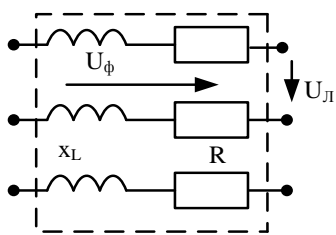
№7. Линейное напряжение 220 В; линейный ток 2 А; активная мощность трехфазной цепи $P = 380$ Вт. Определите коэффициент мощности.

1. $\cos \varphi = 0,4$.
2. $\cos \varphi = 0,5$.
3. $\cos \varphi = 0,6$.
4. $\cos \varphi = 0,8$.

№8. Симметричный потребитель соединен по схеме треугольник. Найти неверное выражение.

1. $U_L = U_\Phi$.
2. $I_L = \sqrt{3} \cdot I_\Phi$.
3. $P = \sqrt{3} \cdot U_\Phi \cdot I_\Phi \cdot \cos \varphi_\Phi$.
4. $P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi_L$.

№9. Фазное напряжение $U_\phi = 220$ В. Как необходимо соединить обмотки двигателя для его работы при $U_L = 220$ В?



1. Звездой.
2. Последовательно.
3. Треугольником.

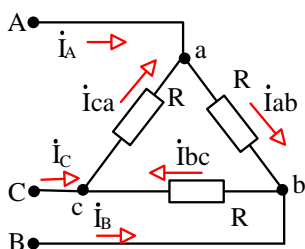
№10. Комплексное напряжение фазы "а" трехфазного генератора имеет значение $U_A = 220 \cdot e^{j0^\circ}$ В. Чему равно комплексное линейное напряжение U_{AB} ?

1. $220 \cdot e^{j30^\circ}$ В.
2. $220 \cdot e^{-j90^\circ}$ В.
3. $380 \cdot e^{-j90^\circ}$ В.
4. $380 \cdot e^{j30^\circ}$ В.

№11. По какой формуле определяется полное сопротивление Z фазы потребителя в трехфазной системе, если он соединен в звезду.

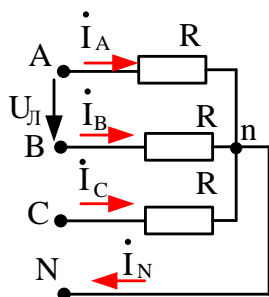
1. $Z = \frac{U_L}{I}$.
2. $Z = \frac{U_L}{3 \cdot I}$.
3. $Z = \frac{U_L}{\sqrt{3} \cdot I}$.

№12. Как изменится линейный ток I_B , если будет уменьшена величина сопротивления фазы R_{ca} ?



1. Не изменится.
2. Увеличится.
3. Уменьшится.
4. Не хватает данных.

№13. Чему равны для данной схемы фазный ток I_a и ток в нейтральном проводе I_N , если линейное напряжение цепи $U_L = 380\text{ В}$, а величина активных сопротивлений $R_a = R_b = R_c = 100\text{ Ом}$?



1. 22А, 22А.
2. 22А, 0.
3. 38А, 0.
4. 38А, 22А.

№14. Каково назначение нейтрального провода в трехфазной сети?

1. Для выравнивания фазных напряжений и токов при симметричной нагрузке.
2. Для выравнивания фазных токов при несимметричной нагрузке.
3. Для выравнивания фазных напряжений при несимметричной нагрузке.
4. Для выравнивания линейных напряжений при несимметричной нагрузке.

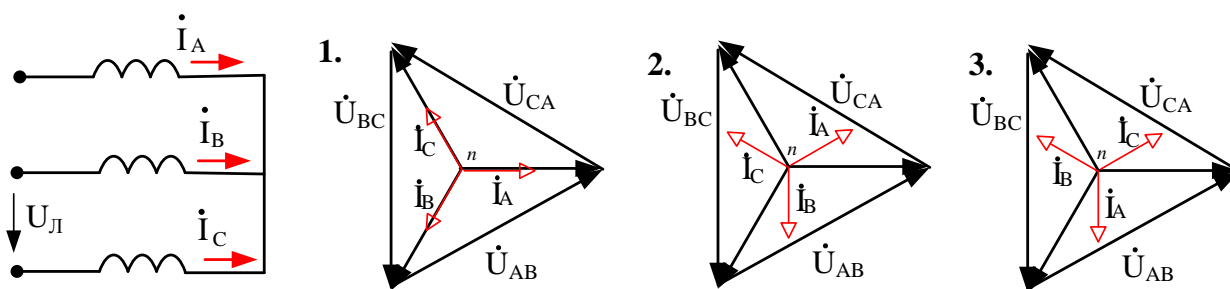
№15. Фазное напряжение 220 В, фазный ток 5 А. Нагрузка симметричная. Коэффициент мощности 0,8. Определить реактивную мощность трехфазной цепи.

1. $Q = 660\text{ Вар}$.
2. $Q = 1100\text{ Вар}$.
3. $Q = 2640\text{ Вар}$.
4. $Q = 1980\text{ Вар}$.

№16. Каково соотношение между линейным и фазными токами при соединении треугольником в симметричной трехфазной системе?

1. $I_A = I_{ab}; I_B = I_{bc}; I_C = I_{ca}$;
2. $I_A = \sqrt{3} \cdot I_{ab}; I_B = \sqrt{3} \cdot I_{bc}; I_C = \sqrt{3} \cdot I_{ca}$;
3. $I_A = I_{ab}/\sqrt{3}; I_B = I_{bc}/\sqrt{3}; I_C = I_{ca}/\sqrt{3}$;
4. $I_A = I_{ab} - I_{ca}; I_B = I_{ca} - I_{bc}; I_C = I_{ca} - I_{ab}$.

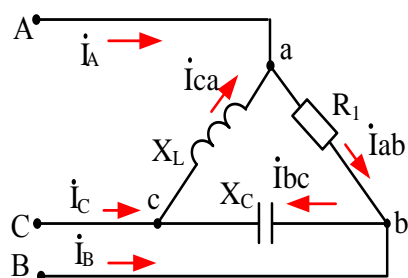
№17. Какая векторная диаграмма соответствует данной схеме?



№18. Как определить векторную величину линейного напряжения \dot{U}_{AB} при соединении звездой?

1. $\dot{U}_{AB} = -\dot{U}_A + \dot{U}_B$;
2. $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A + \dot{U}_B$;
3. $\dot{U}_{AB} = -\dot{U}_A - \dot{U}_B$;
4. $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$.

№19. Какой вид нагрузки данного приемного устройства на изображенной схеме, если сопротивления фаз по величине равны между собой $R_1 = X_c = X_L$?



1. Несимметричный однородный.
2. Симметричный однородный.
3. Несимметричный неоднородный.
4. Неоднородный симметричный.

№20. Может ли ток в нулевом проводе четырехпроводной цепи трехфазного переменного тока при несимметричном режиме равняться нулю?

1. Не может.
2. Он всегда равен нулю.
3. При режиме холостого хода.
4. Может.

ТАБЛИЦА ОТВЕТОВ НА ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

Номер вопроса теста	Номер ответа на тест		
	тест №1	тест №2	тест №3
1	3	3	1
2	3	1	4
3	1	3	3
4	2	3	1
5	2	1	1
6	3	3	2
7	4	2	4
8	1	4	3
9	3	3	3
10	1	3	4
11	2	4	3
12	3	4	1
13	3	1	2
14	1	4	3
15	4	3	1
16	3	3	2
17	4	2	3
18	4	3	4
19	1	2	4
20	3	3	1

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессонов, Л.А Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [текст]: учебник / Л.А. Бессонов.- М.: Гардарики, 2013. - 701с: ил.
2. Мельников, А.С. Четырехполосники в электрических цепях [Текст] : учеб.пособие; рек. ДВ РУМЦ / А.С. Мельников, Т.Н. Мармус. – Благовещенск : ДальГАУ, 2013. – 106, [1] с.
3. Мельников, А. С. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст] : учеб.пособие; рек. ДВ РУМЦ / А. С, Мельников. – Благовещенск: ДальГАУ, 2011. – 460с.
3. Сборник задач по основам теоретической электротехники [Текст] : учеб.пособие / под ред. Ю. А. Бычкова [и др.]. – СПб. :Лань, 2011. – 388, [12] с.
4. Атабеков, Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи [Текст]: учеб.пособие / Г.И. Атабеков. – 8-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2010. – 591 с.
5. Арсеньев, Г.Н. Основы теории цепей: практикум [Текст]: учеб.пособие; доп. М-вом обороны РФ / Г.Н. Арсеньев, И.И. Градов.- М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2007.- 336 с.
6. Покотило, С. А. Справочник по электротехнике и электронике [Текст] / С. А. Покотило. – Ростов н/Д : Феникс, 2012. – 282, [6] с. – (Справочник)

ПРИЛОЖЕНИЕ 1*(Справочное)****Пример оформления титульного листа РГЗ***

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ № _____

по дисциплине «**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**»

Тема« _____

»

Вариант № _____

Выполнил(а): (_____)

(и.о. фамилия,
номер группы)

Дата сдачи: _____

Подпись: _____

Проверил: (_____)

(и.о. фамилия,
должность,
ученая степень)

Благовещенск, 2014

ПРИЛОЖЕНИЕ 2*(Справочное)**Пример оформления титульного листа контрольной работы*

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № _____

по дисциплине **«ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»**

Тема« _____

»

Вариант № _____

Выполнил(а) (_____)

(и.о. фамилия,
специальность,
номер группы,
номер зачетной
книжки)

Дата сдачи _____

Подпись _____

Проверил (_____)

(и.о. фамилия,
должность,
ученая степень)

Благовещенск, 2014

Учебное издание

*Горбунова Людмила Николаевна,
Гусева Светлана Александровна*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Часть первая

Учебное пособие

Редакторы А.И. Каземова, В.И. Свешникова

Лицензия ЛР 020427 от 25.04.1997 г.
Подписано к печати 11.03.2015 г. Формат 60×90/16.
Уч.-изд.л. – 5,2. Усл.-п.л. – 7,3.
Тираж 150 экз. Заказ 59.

Отпечатано в отделе оперативной полиграфии издательства ДальГАУ
675005, г. Благовещенск, ул. Политехническая, 86

