



Н.П. Местников

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

по дисциплинам «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОНИКА  
И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ», «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА»,  
«ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА»

**Часть 3**

Якутск

2023

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова  
Физико-технический институт

**Н.П. Местников**

# **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

**Учебное пособие**

**по дисциплинам «Электротехника, электроника  
и электрооборудование», «Электротехника»,  
«Электротехника и электроника»**

**Часть 3**

Якутск  
2023

УДК 621.31  
ББК 31.2  
М53

Утверждено учебно-методическим советом СВФУ

**Рецензенты:**

*Н.С. Бурянина*, д.т.н., профессор каф. ЭС ФТИ СВФУ, г. Якутск  
*Л.Р. Гайнуллина*, к.т.н., доцент каф. ВИЭ КГЭУ, г. Казань

Местников, Н.П.

**Электротехника** [Электронный ресурс] : учебное пособие по дисциплинам «Электротехника, электроника и электрооборудование», «Электротехника» и «Электротехника и электроника» : в 3 ч. / Н.П. Местников. – Якутск : Издательский дом СВФУ, 2023.

ISBN 978-5-7513-3499-4

Ч. 3. – 1 электрон. опт. диск

ISBN 978-5-7513-3502-1

Учебное пособие содержит теоретический материал и описание по выполнению практических заданий по дисциплинам «Электротехника, электроника и электрооборудование», «Электротехника» и «Электротехника и электроника» с ориентацией на освоение ключевых закономерностей в области электротехники и электроники с учетом климатических особенностей Севера. При разработке учебного пособия применялись стандарты и нормы ГОСТ Р 52002-2003 и ГОСТ 24291-90.

Предназначено для студентов бакалавриата и специалитета технических направлений.

УДК 621.31  
ББК 31.2

ISBN 978-5-7513-3499-4

ISBN 978-5-7513-3502-1 (Ч. 3)

© Местников Н.П., 2023

© Северо-Восточный федеральный университет, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ .....</b>	<b>6</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>8</b>
<b>УСЛОВНО-ГРАФИЧЕСКИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ.....</b>	<b>10</b>
<b>ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (продолжение) .....</b>	<b>14</b>
1.1. Схемы замещения катушки индуктивности и конденсатора.....	14
1.2. Смешанное соединение элементов .....	17
1.3. Комплексный (символический) метод расчёта цепей переменного тока.....	19
1.4. Резонанс в электрических цепях.....	25
1.5. Цепи с индуктивно связанными элементами.....	36
<b>ГЛАВА 2. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ.....</b>	<b>43</b>
2.1. Получение трёхфазной системы ЭДС .....	43
2.2. Связывание цепей трёхфазной системы .....	46
2.3. Расчёт цепи при соединении нагрузки звездой В случае соединения нагрузки звездой фазные токи .....	49
2.3.1. Соединение нагрузки звездой с нейтральным проводом.....	49
2.3.2. Соединение нагрузки звездой без нейтрального провода.....	50
2.4. Расчёт цепи при соединении нагрузки треугольником .....	52
2.5. Мощность трёхфазной цепи.....	55
2.5.1. Мощность при несимметричной нагрузке.....	55
2.5.2. Мощность при симметричной нагрузке.....	56

<b>ГЛАВА 3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ.....</b>	<b>57</b>
<b>3.1. Задачи по расчету смешанных соединений элементов .....</b>	<b>57</b>
<b>3.2. Задачи по расчету цепей с индуктивно связанными элементами .....</b>	<b>69</b>
<b>3.3. Задачи по расчету трехфазной цепи .....</b>	<b>83</b>
<b>3.4. Задачи по оценке характера влияния температуры окружающей среды на функционирование трехфазной сети .....</b>	<b>93</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>102</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>103</b>

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Учебное пособие предназначено для изучения дисциплин «Электротехника, электроника и электрооборудование», «Электротехника» и «Электротехника и электроника» и адресовано студентам 1-2 курсов технических специальностей очного и заочного форм обучения в соответствии с требованиями и условиями ФГОС 3++.

Учебное пособие может быть применено в курсе изучения основ электротехники с учетом климатических особенностей Севера. В пособии соблюдены нормы и стандарты высшего образования к электротехнике, реализовано требование профессионально ориентированного обучения в области электротехники.

Одним из задач данного курса является повышение исходного уровня владения основами функционирования объектов электроэнергетики, а также овладение ими необходимым и достаточным уровнем теоретических и практических компетенций для решения специализированных задач в области электротехники с применением определенных закономерностей и методов.

При составлении учебного пособия автор исходил из концепции взаимосвязанного обучения основным видам технологических и инновационных проектов. Данный подход предопределил структуру и содержание пособия.

Учебное пособие направлено на формирование у студентов навыков и компетенций по разработке, оформлению технологических проектов в сфере электротехники с учетом климатических особенностей Севера.

Специализированное оформление пособия, разнообразие иллюстративного материала и обозримое построение дисциплины способствуют повышению мотивации студентов. Некоторые графические интерпретации в пособии играют роль стимула в рамках изучения данной дисциплины. В пособие включен терминологический словарь в области электротехники.

**Цель дисциплины** – формирование у студента навыков и компетенций в области электротехники и электроники.

**Задачами дисциплины являются:**

- формирование представления у обучающихся о теоретических основах электротехники и электроники.
- формирование представления у обучающихся о структуре электротехники и электроники.
- развитие у обучающихся практических умений и навыков в области электротехники и электроники.
- формирование у обучающихся профессиональной готовности к овладению технологиями электротехники и электроники.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

1) Знать: понятийный аппарат в области электротехники и электроники; знания в целом; структуру и этапы развития электротехники и электроники; жизненный цикл работы объектов электроэнергетики; структуру функционирования объектов электроэнергетики.

2) Уметь: проводить сбор и анализ информации в области электротехники и электроники, в том числе, с использованием Интернет-ресурсов; осуществлять планирование проекта в области электротехники и электроники; осуществлять электроэнергетическую и технико-экономическую оценку работы объектов электроэнергетики.

3) Владеть: современными средствами сбора информации; технологиями электротехники и электроники; методами оценки проектов области электроэнергетики.

## **ВВЕДЕНИЕ**

В рамках реализации требований и условий Федерального государственного образовательного стандарта (далее – ФГОС 3++) и Федерального закона "Об образовании в Российской Федерации" от 29.12.2012 N 273-ФЗ высшими учебными заведениями (далее – ВУЗ) активно производятся процедуры обучения студентов по различным направлениям бакалавриата и специалитета.

В условиях увеличения степени декарбонизации энергетики и ее цифровой трансформации в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 года № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» и постоянной актуализации Федерального закона от 23.11.2009 N 261-ФЗ (ред. от 11.06.2021) "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации", Федерального закона "Об электроэнергетике" от 26.03.2003 N 35-ФЗ и Распоряжением Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 года №1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» внутри предприятий в сфере энергетики и коммунального комплекса необходимо обеспечение взаимной интеграции ВУЗов и энергетических компаний в целях получения специалистов высокой квалификации, владеющие навыками в области декарбонизации энергетики, являющимися актуальными в наши дни.

В большинстве высших учебных заведений РФ фактически отсутствуют учебные факультативы, направленные обучение студентов к компетенциям и навыкам основ электротехники и электроники в климатических условиях Севера.

В случае несоответствия компетенций, полученные студентом во время обучения в высшем учебном заведении, потенциальные работодатели вынуждены обеспечить переобучение молодого специалиста к новым



компетенциям в сфере электротехники и электроники, где потребуется не менее полугода в зависимости от интеллектуального уровня специалиста, что и является катализатором замедления развития предприятия. Вследствие данной тенденции потенциальные работодатели вынуждены нанимать на рабочую деятельность специалистов со стажем работы от двух лет.

Решением данной проблемной тенденции является разработка учебного пособия на основании требований и условий рабочих программ дисциплин «Электротехника, электроника и электрооборудование», «Электротехника» и «Электротехника и электроника», которое разработано в соответствии с условиями и требованиями существующего уровня развития технологий в сфере электротехники и электроники.


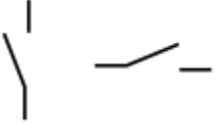
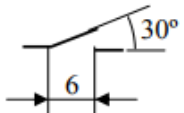

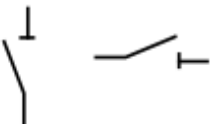
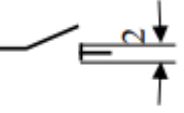
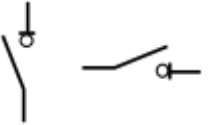
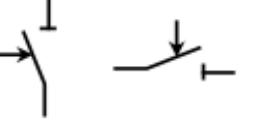
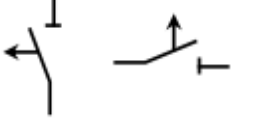
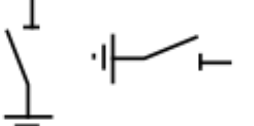

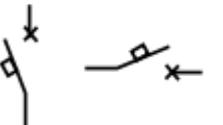

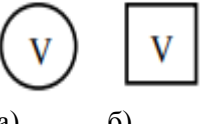
Автор учебного пособия выражает свою благодарность за ценные замечания и советы своим научным руководителям и наставникам:





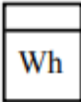
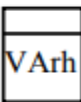



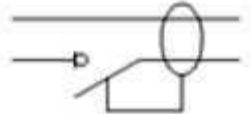
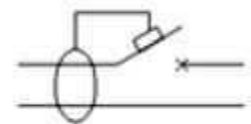



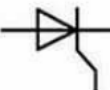
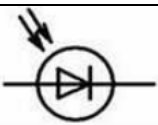

- Буряниной Н.С., доктору технических наук, профессору кафедры «Электроснабжение» ФТИ СВФУ имени М.К. Аммосова.

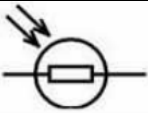
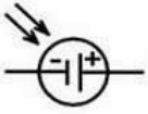

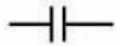


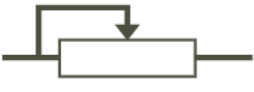



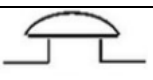
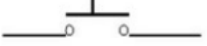

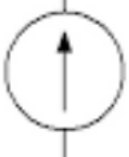

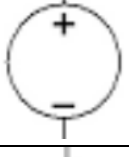


- Нуруллину Э.Г., доктору технических наук, профессору кафедры «Машины и оборудования в агробизнесе» Института механизации и технического сервиса Казанского государственного аграрного университета.






- Гайнуллиной Л.Р., кандидату технических наук, доценту, заведующему кафедрой «Возобновляемые источники энергии» Института электроэнергетики Казанского государственного энергетического университета.

# УСЛОВНО-ГРАФИЧЕСКИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ

Наименование	Обозначение		Размеры в мм / Примечание
	Графическое	Буквенное	
Плавкий предохранитель		FU	-
Рубильник		QS или SA	
Рубильник, выключатель низковольтный трехполюсный		-	-
Разъединитель		QS	
Выключатель нагрузки		QW	-
Короткозамыкатель		QN	-
Отделитель одностороннего действия		QR	-
Заземляющий нож		QSG	-
Заземление		-	-
Автоматический выключатель		QF	-
Амперметр: А – показывающий Б – регистрирующий		PA	Диаметр – 10; квадрат 10×10
Вольтметр: А – показывающий Б – регистрирующий		PV	Диаметр – 10; квадрат 10×10

Ваттметр: А – показывающий Б – регистрирующий	  а) б)	PW	-
Варметр: А – показывающий Б – регистрирующий	  а) б)	PVA	-
Счетчик активной энергии		PI	-
Счетчик реактивной энергии		PK	-
Линия проводки		Л	-
Рубильник (выключатель нагрузки)		P	-
Тепловое реле (защита от перегрева)		PT	-
Устройство защитного отключения		УЗО	-
Дифференциальный автомат		-	-
Выключатель (рубильник) с предохранителем		-	-
Диод		Д	-
Стабилитрон		-	-
Тиристор		T	-
Фотодиод		-	-
Светодиод		-	-

Фоторезистор		-	-
Фотоэлемент		ФЭ	-
Транзистор		Т	-
Конденсатор		С	-
Дроссель		-	-
Резистор		R	-
Резистор		-	-
Аккумулятор (источник питания)		АКБ	-
Электрическая лампа		Л	-
Пересечение проводов без взаимного контакта		-	-
Звонок		З	-
Кнопка		К	-
Клеммы		-	-
Источник ЭДС		Е	-
Источник тока		J	-
Машина постоянного тока		МПТ	-
Машина переменного тока		МПТ	-
Электродвигатель		ЭД	-

Стартер		С	-
Обогреватель стекла		-	-
Прикуриватель		Пр	-
Электромагнитный клапан		-	-
Переменный резистор		R	-

В ходе формирования базы условно-графического обозначения элементов электрической цепи переменного и постоянного тока применены источники [1–6].

## ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (продолжение)

Понятие *синусоидальный ток* относится ко всем периодическим токам, изменяющимся во времени по синусоидальному закону. Этот вид тока имеет по сравнению с постоянным целый ряд преимуществ, обусловивших его широкое распространение в технике. Производство, передача и преобразование электрической энергии наиболее удобно и экономично на переменном токе. *Синусоидальные токи* широко используются в радиоэлектронике, электротехнологии. Всё бытовое электроснабжение также производится на переменном токе. В связи с этим, изучение явлений, закономерностей и свойств электрических цепей синусоидального переменного тока имеет особое значение, как для последующих разделов курса, так и для применения полученных знаний на практике.

*Понятийно-категориальный аппарат:* переменный ток, синусоидальный ток, мгновенное значение, амплитудное значение, начальная фаза, действующее значение, среднеквадратичное значение, комплексные числа, угол потерь, добротность катушки, добротность конденсатора, комплексный метод, метод контурных токов, метод Кирхгофа, метод двух узлов, метод наложения, баланс мощностей, резонанс, характеристическое сопротивление, резонансные кривые, резонанс токов, коэффициент взаимной индукции, взаимная индукция, коэффициент связи, порядок чередования фаз, трехфазная несвязанная система, фазное напряжение, нулевые точки, нейтраль, линейное напряжение, смещение нейтрали.

### 1.1. Схемы замещения катушки индуктивности и конденсатора

Катушка индуктивности представляет собой проводник, которому в процессе изготовления придаётся определённая форма, обеспечивающая создание магнитного поля с заданными параметрами. Основным параметром катушки является индуктивность, но проводник обмотки обладает активным

сопротивлением и при протекании по нему тока происходит преобразование электрической энергии в тепло. Выделение тепла увеличивается при высокой частоте за счёт поверхностного эффекта и увеличения потерь в изоляции. Кроме того, витки катушки обладают электрической ёмкостью, сопротивление которой играет заметную роль при высокой частоте. Все эти сложные физические явления приводят к тому, что в различных режимах катушка изменяет свои свойства (параметры) и не всегда допустимо считать её идеальным элементом без потерь [6].

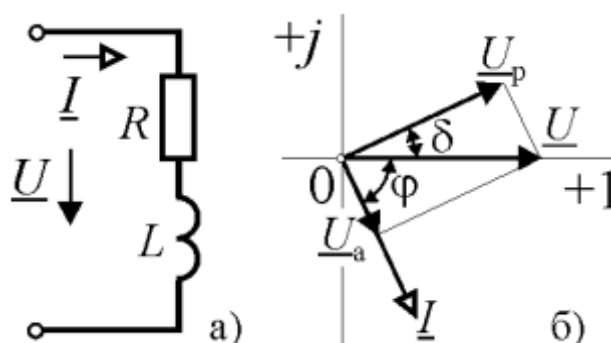


Рисунок 1.1 – Схема и векторная диаграмма последовательного соединения элементов

На низких и средних частотах схема замещения катушки представляет собой последовательное соединение резистивного и индуктивного элементов (рис. 1.1, а). Угол  $\delta$ , дополняющий угол  $\phi$  до  $90^\circ$  называется углом потерь (рис. 1.1, б). Величина этого угла определяется активным напряжением или, что-то же самое, активным сопротивлением, т.е. мощностью потерь  $R I^2$ . Тангенс угла потерь равен:

$$\operatorname{tg} \delta = U_a / U_p = R / (\omega L), \quad (1.1)$$

Величина обратная  $\operatorname{tg} \delta$ , называется *добротностью катушки*:

$$Q_L = 1 / \operatorname{tg} \delta = \omega L / R, \quad (1.2)$$

Чем выше добротность катушки, тем ближе она к идеальному индуктивному элементу электрической цепи.

В конденсаторе, включённом на синусоидальное напряжение, происходит выделение тепла в изоляции за счёт конечного значения её сопротивления, а также за счёт периодического изменения поляризации диэлектрика. Учесть потери энергии в конденсаторе можно включением в схему замещения активного сопротивления последовательно с ёмкостью или параллельно ей (рис. 1.2, а и б). Обе схемы эквивалентны и различаются только значениями параметров. Если угол, дополняющий  $\phi$  до  $90^\circ$  обозначить буквой  $\delta$ , то из треугольника напряжений рис. 1.2, в и эквивалентных преобразований двухполюсника можно получить соотношения параметров последовательной и параллельной схем замещения:

$$R_1 / R_2 = \sin^2 \delta; \quad C_2 / C_1 = \cos^2 \delta, \quad (1.3)$$

Обычно угол  $\delta$  у большинства конденсаторов очень мал, поэтому  $R_1 \ll R_2; C_1 \approx C_2$ .

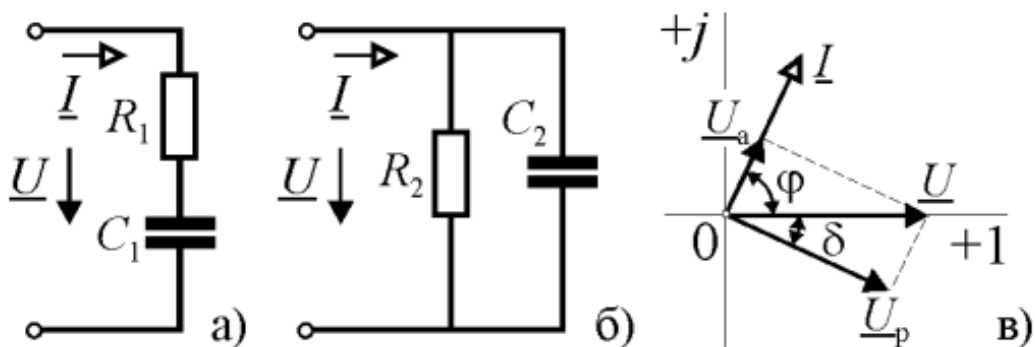


Рисунок 1.2 – Схема замещения активного сопротивления

$$\operatorname{tg} \delta = U_a / U_p = R_1 \omega C_1, \quad (1.4)$$

Добротность конденсатора:

$$Q_c = 1 / \operatorname{tg} \delta = 1 / (R_1 \omega C_1), \quad (1.5)$$

Она определяет степень приближения конденсатора к идеальному ёмкостному элементу и в зависимости от типа конденсатора составляет



величину 5...2000. Чем выше добротность конденсатора, тем ближе его свойства к идеальному ёмкостному элементу.

*Вопросы для самостоятельной проработки:*

1. Что представляет собой схема замещения катушки (конденсатора)?
2. Какой параметр схемы замещения катушки (конденсатора) определяет величину потерь?
3. Что такое угол потерь?
4. Как определяется добротность катушки (конденсатора)?
5. Как связана добротность катушки (конденсатора) с частотой питания?

## 1.2. Смешанное соединение элементов

Анализ цепей со смешанным соединением элементов рассмотрим на примере параллельного соединения идеального конденсатора  $C$  и катушки индуктивности, с учётом её тепловых потерь. Схема замещения этой цепи приведена на рис. 1.3, а.

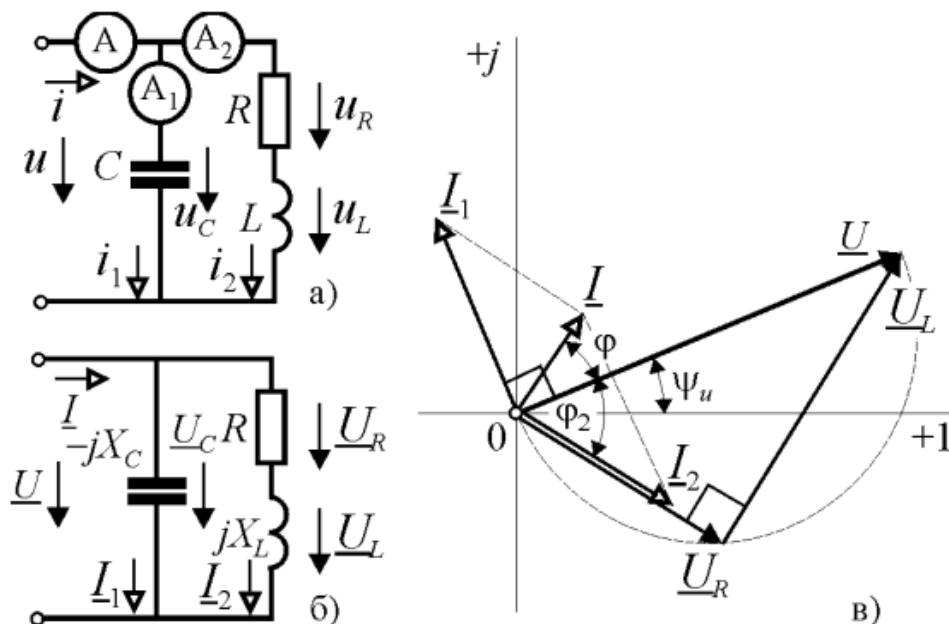


Рисунок 1.3 – Схема замещения смешанного соединения элементов

Построим векторную диаграмму цепи (рис. 1.3, в). Обе ветви схемы соединены параллельно, поэтому токи в них формируются независимо. Ток в

первой ветви  $\underline{I}_1 = \underline{I}_{1p} = \underline{U} / (-jX_C) = j\underline{U} / X_C$  чисто реактивный ёмкостный и опережает по фазе напряжение на  $90^\circ$ . Ток во второй ветви определяется её комплексным сопротивлением  $\underline{Z}_2 = R + jX_L$ . Модуль тока равен  $I_2 = U / \sqrt{R^2 + X_L^2}$ , а сдвиг фазы по отношению к напряжению  $\varphi_2 = \arctg(\frac{X_L}{R})$ . Характер сопротивления ветви активно-индуктивный, поэтому ток в ней будет отставать от напряжения. Вектор напряжения на активном сопротивлении  $\underline{U}_R = R\underline{I}_2$  совпадает по направлению с вектором тока  $\underline{I}_2$ , а вектор напряжения на индуктивном сопротивлении  $\underline{U}_L = jX_L \underline{I}_2$  перпендикулярен по отношению к нему, т.к. оператор поворота  $j$  он смещён в сторону опережения. В сумме напряжения на последовательном соединении активного и индуктивного сопротивлений равны входному напряжению цепи. При этом они образуют треугольник напряжений с вершиной прямого угла, находящейся на полуокружности круговой диаграммы, по которой эта вершина перемещается при изменениях параметров катушки. Например, при уменьшении сопротивления провода  $R \rightarrow 0$ ;  $\underline{U}_R \rightarrow 0$ ;  $\underline{U}_L \rightarrow \underline{U}$ ;  $\varphi_2 \rightarrow \pi / 2$ , и свойства катушки приближаются к идеальному индуктивному элементу. Аналогично можно проследить влияние вариации других параметров на фазовые соотношения в цепи.

Рассмотрим задачу определения токов в цепи рис. 2.20, а при заданных параметрах элементов и входном напряжении. Ход решения такой задачи на переменном токе ничем не отличается от аналогичной задачи для цепи постоянного тока, с той лишь разницей, что все расчёты нужно производить с комплексными числами.

Пусть напряжение на входе цепи равно  $u = 14,1 \sin(\omega t + \pi / 6)$  В. Частота питания  $f = 50$  Гц; ёмкость конденсатора  $C = 90$  мкФ; сопротивление катушки  $R = 10$  Ом; индуктивность катушки  $L = 100$  мГн.

Вначале определим комплексные параметры цепи (рис. 2.20, б).

Комплексное напряжение на входе цепи –  $\underline{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{j\pi/6} = \frac{14,1}{\sqrt{2}} e^{j\pi/6} = 10e^{j\pi/6}$ . Угловая частота питания –  $\omega = 2\pi f = 314,16 \text{ p/c}$ . Сопротивления элементов –  $X_L = \omega L = 314,16 \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 31,416 \text{ Ом}$ ,  $X_C = 1/(\omega C) = 1/(314,16 \cdot 90 \cdot 10^{-6}) = 35,368 \text{ Ом}$ . Комплексные сопротивления ветвей –  $\underline{Z}_1 = -jX_C = -j35,368 = 35,368e^{-j\pi/2} \text{ Ом}$ ,  $\underline{Z}_2 = R + jX_L = 10 + j31,416 = 32,97e^{j1,263} \text{ Ом}$ .

Теперь по закону Ома определим комплексные токи в ветвях:

$$\begin{aligned}\underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}}{-jX_C} = \frac{10e^{j\pi/6}}{35,368e^{-j\pi/2}} = 0,283e^{j(\pi/6+\pi/2)} = 0,283e^{j2\pi/3} = -0,141 + j0,245 \text{ А} \\ \underline{I}_2 &= \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_2} = \frac{10e^{j\pi/6}}{32,97e^{j1,263}} = 0,303e^{j(\pi/6-1,263)} = 0,303e^{-j0,74} = -0,224 - j0,204 \text{ А} \\ \underline{I} &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = 0,083 + j0,041 = 0,092e^{j0,455} \text{ А}\end{aligned}$$

Из полученных результатов следует, что при данных параметрах элементов амперметры, включённые в ветвях цепи и на её входе, покажут значения тока в конденсаторе и катушке равные  $A_1=0,283 \text{ А}$  и  $A_2=0,302 \text{ А}$ , в то время как ток на входе цепи будет в несколько раз меньше и составит  $A=0,092 \text{ А}$ . Отмеченные соотношения токов видны и на векторной диаграмме рис. 1.3, в, где модули векторов  $\underline{I}_1$  и  $\underline{I}_2$  существенно больше модуля вектора  $\underline{I}$ . Это связано с тем, что законы Кирхгофа в цепи переменного тока справедливы только для мгновенных значений и комплексных величин. Для действующих значений законы Кирхгофа будут выполняться только в том случае, если все элементы цепи одного типа, т.е., если все они резистивные или индуктивные, или ёмкостные элементы.

### 1.3. Комплексный (символический) метод расчёта цепей переменного тока

В цепях переменного тока с несколькими ветвями и элементами практически невозможно выполнить анализ режима работы, если основные

величины будут представлены синусоидальными функциями, т.к. при этом получаются сложные тригонометрические уравнения. В случае представления функций и параметров цепи комплексными числами математическое описание сводится к линейным алгебраическим уравнениям, решение которых не вызывает затруднений. Метод расчёта цепей переменного тока, основанный на таком способе алгебраизации, называется *комплексным методом*. Алгоритм применения метода состоит из трёх этапов:

1. Представление всех величин и параметров цепи комплексными числами. Здесь для облегчения задачи целесообразно составление расчётной схемы электрической цепи, на которой все данные указаны в комплексной форме.
2. Определение искомых величин любым методом, известным из теории цепей постоянного тока.
3. Преобразование, если требуется, полученных величин в форму представления их синусоидальными функциями времени.

Проиллюстрируем применение комплексного метода на примере электрической цепи рис. 1.4, а.

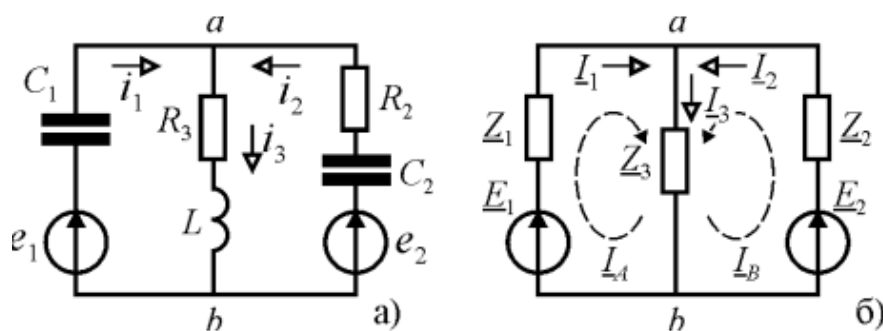


Рисунок 1.4 – Применение комплексного метода в электрической цепи

Здесь:  $e_1 = 14,1 \sin(\omega t + \pi / 6) \text{ В}$ ,  $e_2 = 28,2 \sin(\omega t - \pi / 4) \text{ В}$ ,  $R_2 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 5 \text{ Ом}$ ,  $L = 100 \text{ мГн}$ ,  $C_1 = 50 \text{ мкФ}$ ,  $C_2 = 80 \text{ мкФ}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ . Требуется определить токи в ветвях цепи и составить баланс мощностей.

Зададим положительные направления токов в ветвях так, как это показано на рисунке и, представив все величины и параметры цепи комплексными числами:

$$\begin{aligned}\underline{E}_1 &= \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} e^{j\pi/6} = 10e^{j\pi/6} \text{ В}; \underline{E}_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} e^{-j\pi/4} = 10e^{-j\pi/4} \text{ В}; \omega = 2\pi f = 314,16 \text{ рад/с} \\ \underline{Z}_1 &= -jX_{C_1} = -j \frac{1}{\omega C_1} = -j35,37 \text{ Ом}; \underline{Z}_2 = R_2 - jX_{C_2} = R_2 - j \frac{1}{\omega C_2} = 2 - j39,79 \text{ Ом}, \\ \underline{Z}_3 &= R_3 + jX_L = R_3 + \omega L = 5 + j31,42 \text{ Ом}\end{aligned}$$

составим расчётную схему рис. 1.4, б:

*Решение непосредственным применением законов Кирхгофа.*

Выберем произвольно два контура в цепи рис. 1.4, б (А и В) и составим для этих контуров и узла а уравнения Кирхгофа:

$$\begin{aligned}a) \quad & \underline{I}_1 + \underline{I}_2 - \underline{I}_3 = 0 \\ A) \quad & \underline{Z}_1 \underline{I}_1 + \underline{Z}_3 \underline{I}_3 = \underline{E}_1, \\ B) \quad & \underline{Z}_2 \underline{I}_2 + \underline{Z}_3 \underline{I}_3 = \underline{E}_2\end{aligned} \quad (1.6)$$

или в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ \underline{Z}_1 & 0 & \underline{Z}_3 \\ 0 & \underline{Z}_2 & \underline{Z}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{E}_1 \\ \underline{E}_2 \end{bmatrix}, \quad (1.7)$$

В результате решения этой системы уравнений мы получим комплексные токи в ветвях и соответствующие им синусоидальные функции:

$$\begin{aligned}\underline{I}_1 &= -0,070 - j0,622 = 0,625e^{-j96,43^\circ} \Leftrightarrow i_1 = 0,625\sqrt{2} \sin(314,16t - 96,43^\circ) \text{ А}; \\ \underline{I}_2 &= 0,325 - j0,873 = 0,932e^{-j69,57^\circ} \Leftrightarrow i_2 = 0,932\sqrt{2} \sin(314,16t - 69,57^\circ) \text{ А}; \\ \underline{I}_3 &= 0,255 - j1,495 = 1,516e^{-j80,31^\circ} \Leftrightarrow i_3 = 1,516\sqrt{2} \sin(314,16t - 80,31^\circ) \text{ А}.\end{aligned} \quad (1.8)$$

*Решение методом контурных токов.*

Для двух выбранных ранее контуров (рис. 1.4, б) составим уравнения по второму закону Кирхгофа для контурных токов:

$$\begin{aligned} A) \quad (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3)\underline{I}_A + \underline{Z}_3\underline{I}_B &= \underline{E}_1 \Leftrightarrow \begin{vmatrix} \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3 & \underline{Z}_3 \\ \underline{Z}_3 & \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \underline{E}_1 \\ \underline{E}_2 \end{vmatrix} \\ B) \quad \underline{Z}_3\underline{I}_A + (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3)\underline{I}_B &= \underline{E}_2 \Leftrightarrow \begin{vmatrix} \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3 & \underline{Z}_3 \\ \underline{Z}_3 & \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \underline{E}_1 \\ \underline{E}_2 \end{vmatrix} \end{aligned}$$

В результате решения мы получим контурные токи:

$$\underline{I}_A = -0,070 - j0,622 \text{ A}; \quad \underline{I}_B = 0,325 - j0,873 \text{ A},$$

*Решение методом двух узлов.*

Пользуясь этим методом можно определить комплексное напряжение между узлами:

$$\underline{U}_{ab} = \frac{\frac{\underline{E}_1}{\underline{Z}_1} + \frac{\underline{E}_2}{\underline{Z}_2}}{\frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_3}} = 48,23 + j0,54 = 48,23e^{j0,64^\circ} \text{ B},$$

затем по закону Ома найти токи в ветвях:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= (\underline{E}_1 - \underline{U}_{ab}) / \underline{Z}_1 = 0,070 - j0,622 \text{ A}; \\ \underline{I}_2 &= (\underline{E}_2 - \underline{U}_{ab}) / \underline{Z}_2 = 0,325 - j0,873 \text{ A}; \\ \underline{I}_3 &= \underline{U}_{ab} / \underline{Z}_3 = 0,255 - j1,495 \text{ A}. \end{aligned}$$

Здесь следует обратить внимание на то, что модуль напряжения между узлами цепи существенно превосходит не только модули ЭДС источников, но и их сумму. Это является следствием сложных электромагнитных процессов в цепях переменного тока, существенное влияние в которых имеют процессы обмена энергией между электрическими и магнитными полями. Наличие таких перенапряжений и их конкретное значение зависит от схемы и параметров цепи, и оно может быть определено только в результате расчётов, подобных данной задаче.

*Решение методом наложения.*

Для решения задачи этим методом составим две расчётные схемы цепи, исключив из исходной схемы сначала второй источник ЭДС, а затем первый (рис. 1.5, а и б).

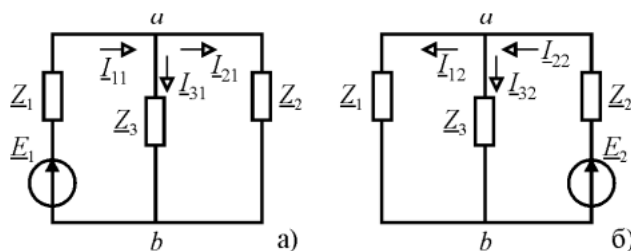


Рисунок 1.5 – Преобразование электрической схемы методом наложения

Токи в расчётной схеме рис. 1.5, а можно найти, например, с помощью эквивалентных преобразований и закона Ома:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{11} &= \frac{\underline{E}_1}{\underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3}} = 0,111 + j0,037 \text{ A}; \\ \underline{I}_{21} &= \frac{\underline{I}_{11} \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = -0,295 + j0,173 \text{ A}; \\ \underline{I}_{31} &= \frac{\underline{I}_{11} \underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 0,406 - j0,135 \text{ A}. \end{aligned}$$

Аналогично для схемы рис. 1.5, б:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{22} &= \frac{\underline{E}_2}{\underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3}} = 0,030 - j0,700 \text{ A}; \\ \underline{I}_{12} &= \frac{\underline{I}_{22} \underline{Z}_3}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3} = 0,181 + j0,659 \text{ A}; \\ \underline{I}_{32} &= \frac{\underline{I}_{22} \underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3} = -0,151 - j1,359 \text{ A}. \end{aligned}$$

Теперь комплексные токи в ветвях можно определить, как суммы частичных токов с учётом их знака, т.е. с учётом направления протекания частичных токов по отношению к положительному направлению тока в ветви. Если направление частичного тока совпадает с положительным направлением, то он суммируется, в противном случае – вычитается.

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{I}_{11} - \underline{I}_{12} = 0,070 - j0,622 \text{ A}; \\ \underline{I}_2 &= \underline{I}_{22} - \underline{I}_{21} = 0,325 - j0,873 \text{ A}; \\ \underline{I}_3 &= \underline{I}_{33} + \underline{I}_{32} = 0,255 - j1,495 \text{ A}. \end{aligned}$$

Таким образом, в результате решения задачи четырьмя различными методами мы, как и следовало ожидать, получили одинаковые значения комплексных токов в ветвях. Составим теперь для расчётной цепи *баланс мощностей*.

Активная мощность приёмников  $P_n$  соответствует энергии, преобразуемой в резистивных элементах цепи:

$$\begin{aligned} P_{R_2} &= I_2^2 R_2 = 0,932^2 \cdot 2 = 1,74 \text{ Вт}; & P_{R_3} &= I_3^2 R_3 = 1,516^2 \cdot 5 = 11,49 \text{ Вт}; \\ P_n &= P_{R_2} + P_{R_3} = 13,23 \text{ Вт} \end{aligned},$$

Реактивная мощность приёмников  $Q_n$ , соответствующая интенсивности обмена энергией между источниками и пассивной частью цепи, определяется как алгебраическая сумма мощностей реактивных элементов:

$$\begin{aligned} Q_{C_1} &= I_1^2 X_{C_1} = 0,625^2 \cdot 63,66 = 24,90 \text{ ВАр}; \\ Q_{C_2} &= I_2^2 X_{C_2} = 0,932^2 \cdot 39,78 = 34,53 \text{ ВАр}; \\ Q_L &= I_3^2 X_L = 1,516^2 \cdot 31,41 = 72,22 \text{ ВАр}; \\ Q_n &= -Q_{C_1} - Q_{C_2} + Q_L = 12,78 \text{ ВАр}. \end{aligned},$$

Здесь следует обратить внимание, что реактивные мощности отдельных элементов значительно превосходят суммарную мощность обмена энергией с источниками. Это означает, что в цепи происходит интенсивный обмен энергией между приёмниками, следствием которого являются отмеченные ранее перенапряжения в узлах.

Активная мощность источников ЭДС, поставляющих энергию в цепь,  $P_{II}$  равна сумме мощностей каждого из источников:

$$\begin{aligned} P_{e_1} &= E_1 I_1 \cos \varphi_1 = E_1 I_1 \cos(\psi_{e_1} - \psi_{i_1}) = 10 \cdot 0,625 \cos(30^\circ + 96,43^\circ) = -3,71 \text{ Вт}; \\ P_{e_2} &= E_2 I_2 \cos \varphi_2 = E_2 I_2 \cos(\psi_{e_2} - \psi_{i_2}) = 20 \cdot 0,932 \cos(-45^\circ + 69,57^\circ) = 16,94 \text{ Вт}; \\ P_{II} &= P_{e_1} + P_{e_2} = 13,23 \text{ Вт}. \end{aligned}$$



Отрицательное значение активной мощности первого источника ЭДС означает, что он является приёмником, а не источником электрической энергии.

Реактивная мощность источников определяется как:

$$Q_{e_1} = E_1 I_1 \sin \varphi_1 = E_1 I_1 \sin(\psi_{e_1} - \psi_{i_1}) = 10 \cdot 0,625 \sin(30^\circ + 96,43^\circ) = 5,03 \text{ ВАр};$$

$$P_{e_2} = E_2 I_2 \sin \varphi_2 = E_2 I_2 \sin(\psi_{e_2} - \psi_{i_2}) = 20 \cdot 0,932 \sin(-45^\circ + 69,57^\circ) = 7,75 \text{ ВАр};,$$

$$Q_{II} = Q_{e_1} + Q_{e_2} = 12,78 \text{ ВАр}.$$

Таким образом, в рассмотренной электрической цепи существует баланс преобразования энергии и её обмена между источниками и пассивными элементами.

#### 1.4. Резонанс в электрических цепях

*Резонансом* называется режим пассивного двухполюсника, содержащего индуктивные и ёмкостные элементы, при котором его входное реактивное сопротивление равно нулю. Следовательно, при резонансе ток и напряжение на входе двухполюсника имеют нулевой сдвиг фаз. Явление резонанса широко используется в технике, но может также вызывать нежелательные эффекты, приводящие к выходу из строя оборудования.

Простейший двухполюсник, в котором возможен режим резонанса, должен содержать один индуктивный элемент и один ёмкостный. Эти элементы можно включить в одну ветвь, т.е. последовательно, или в параллельные ветви. Рассмотрим свойства такого двухполюсника, называемого резонансным контуром, при различных включениях.

*Резонанс напряжений.* Последовательное соединение катушки индуктивности и конденсатора соответствует схеме замещения с последовательным соединением резистивного, индуктивного и ёмкостного элементов. Резистивный элемент цепи соответствует сопротивлению провода катушки, но может быть также специально включённым резистором.

Резонанс в этой цепи возникает, если:

$$X = X_L - X_C = 0 \Leftrightarrow X_L = X_C \Leftrightarrow \omega L = \frac{1}{\omega C}, \quad (1.9)$$

В этом случае противоположные по фазе напряжения на индуктивном и ёмкостном сопротивлении равны  $U_L = U_C$  и компенсируют друг друга (рис. 1.6). Поэтому резонанс в последовательной цепи называют резонансом напряжений.

Условие резонанса (1.9) можно выполнить тремя способами: изменением частоты питания  $\omega$ , индуктивности  $L$  или ёмкости  $C$ .

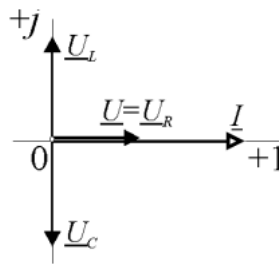


Рисунок 1.6 – Векторная диаграмма в момент резонанса цепи

Из выражения (1.9) можно определить частоту, при которой наступает режим резонанса или резонансную частоту:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (1.10)$$

Индуктивное и ёмкостное сопротивления при резонансе равны:

$$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (1.11)$$

Эта величина называется характеристическим сопротивлением.

Отношение характеристического сопротивления к активному сопротивлению называется *добротностью резонансного контура*:

$$Q = \rho / r, \quad (1.12)$$

Рассмотрим характерные особенности резонанса напряжений:

1) Так как реактивное сопротивление последовательного контура в режиме резонанса равно нулю, то его полное сопротивление минимально и равно активному сопротивлению:

$$Z_0 = \sqrt{R^2 + X^2} = R|_{X=0}, \quad (1.13)$$

Вследствие этого входной ток при резонансе максимален и ограничен только активным сопротивлением контура  $I_0 = U/Z_0 = U/R$ . По максимуму тока можно обнаружить режим резонанса и это используется в технике при настройке резонансных контуров. В то же время возрастание тока может быть опасно для оборудования, в котором возникает резонанс напряжений.

2) В режиме резонанса напряжения на отдельных элементах контура составляют:

$$U_R = RI_0; \quad U_L = X_L I_0; \quad U_C = X_C I_0, \quad (1.14)$$

Из равенства (1.9) следует, что  $U_L = U_C$  и входное напряжение контура:

$$\underline{U} = U_R + j(U_L - U_C) = U_R, \quad (1.15)$$

При этом индуктивное и ёмкостное сопротивления могут быть больше активного  $X_L = X_C > R$ . Тогда напряжения на реактивных элементах будут больше входного напряжения. Коэффициент усиления напряжения равен добротности контура:

$$Q = \frac{U_L}{U_R} = \frac{U_C}{U_R} = \frac{X_L I_0}{RI_0} = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{\rho}{R}, \quad (1.16)$$

В радиотехнических устройствах добротность резонансного контура составляет 200...500. Эффект усиления напряжения в резонансном контуре широко используется в радиотехнике и автоматике, но в энергетических установках он, как правило, нежелателен, т.к. может вызывать крайне опасные перенапряжения.

3) Активная мощность  $P = I_0^2 R$ , потребляемая контуром при резонансе максимальна, т.к. максимален ток. Реактивные мощности индуктивного и ёмкостного элементов равны  $I_0^2 X_L = I_0^2 X_C$  и превышают активную мощность в  $Q$  раз, если  $Q > 1$ .

Для понимания энергетических процессов, происходящих в резонансном контуре, определим сумму энергий электрического и магнитного полей. Пусть ток в контуре в режиме резонанса равен  $i = I_m \sin \omega_0 t$ . Тогда напряжение на ёмкости отстает на  $90^\circ$  и равно  $u_C = -U_m \cos \omega_0 t$  (рис. 1.7). Отсюда:

$$w = w_L + w_C = \frac{Li^2}{2} + \frac{Cu_C^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2} \sin^2 \omega_0 t + \frac{CU_{Cm}^2}{2} \cos^2 \omega_0 t,$$

$$\text{Но } U_{Cm} = I_m \frac{1}{\omega_0 C} = I_m \sqrt{\frac{L}{C}} \Rightarrow \frac{CU_{Cm}^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}, \text{ и, следовательно:}$$

$$w = w_L + w_C = \frac{LI_m^2}{2} = \frac{CU_{Cm}^2}{2} = \text{Const},$$

т.е. при резонансе происходит периодический процесс обмена энергией между магнитным и электрическим полем, но суммарная энергия полей остаётся постоянной и определяется индуктивностью и ёмкостью контура (рис. 2.24). При этом источник питания поставляет в контур только энергию, идущую на покрытие тепловых потерь в резисторе, и совершенно не участвует в процессе её обмена между полями.

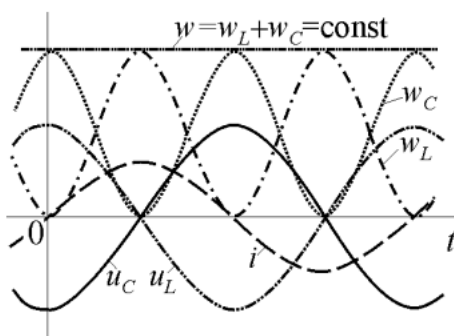


Рисунок 1.7 – График резонансных процессов

Помимо параметров, определяющих свойства контура на частоте резонанса, для технических приложений важно знать его свойства в некотором диапазоне частот. Зависимость параметров электрической цепи от частоты входного напряжения или тока называется частотной характеристикой.

Из трёх параметров резонансного контура два являются частотно зависимыми: индуктивное и ёмкостное сопротивления. При частотах ниже резонансной  $X_C > X_L$  и реактивное сопротивление цепи имеет ёмкостный характер, т.е.  $\varphi < 0$  (рис.1.8 а и б). Причём при нулевой частоте  $X_L(0) = 0$ ;  $X(0) = -X_C(0) = -\infty$  и контур является ёмкостным элементом с углом сдвига фаз  $\varphi = -\pi/2$ . Сдвиг фаз на  $90^\circ$  при постоянном токе соответствует нулевому значению тока при максимуме напряжения. После точки резонанса  $X_L > X_C$ , реактивное сопротивление становится индуктивным и в пределе стремится к бесконечности  $X_C(\infty) = 0$ ;  $X(\infty) = X_L(\infty) = +\infty$ , а фазовый сдвиг  $\varphi^{\omega \rightarrow \infty} \rightarrow \pi/2$ .

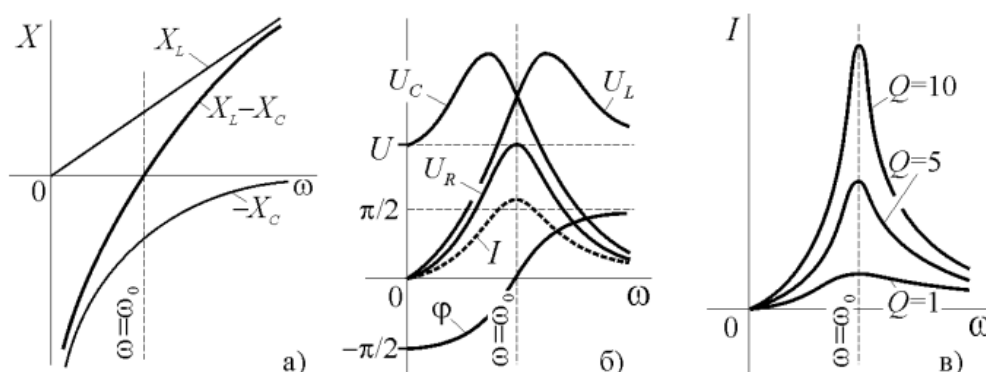


Рисунок 1.8 – Графики резонансных процессов

К частотным характеристикам относятся и зависимости от частоты токов и напряжений в двухполусниках, в которых возможен резонанс. Такие характеристики называют *резонансными кривыми*. Резонансные кривые для последовательного контура приведены на рис. 1.8, б и в. Кроме отмеченного ранее максимума тока в точке резонанса, из этих кривых видно, что напряжения на индуктивном и ёмкостном элементах также имеют максимумы одинаковые по значению, но смещённые относительно частоты резонанса. Максимум

ёмкостного элемента смещён в сторону меньших частот, а максимум индуктивного – в сторону больших. Значение максимумов и их смещение зависят от добротности контура. С увеличением добротности максимальные значения увеличиваются, а их частоты стремятся к частоте резонанса. Добротность влияет также на максимум и крутизну резонансной кривой тока (рис. 1.8, в). С ростом добротности максимум и крутизна кривой увеличиваются. Чем круче и острее резонансная кривая тока, тем выше избирательность контура, т.е. его реакция на определённую резонансную частоту. В радиотехнике и автоматике это свойство резонансного контура используется для выделения сигнала заданной частоты.

*Резонанс токов.* Параллельное включение катушки индуктивности и конденсатора соответствует схеме замещения рис. 1.9, а. В ней тепловые потери в катушке и конденсаторе соответствуют мощности рассеиваемой на резистивных элементах  $R_1$  и  $R_2$ , поэтому такая цепь называется параллельным резонансным контуром с потерями. Условием резонанса для неё является равенство нулю эквивалентной реактивной проводимости  $B = B_1 - B_2 = 0$ , где  $B_1$  и  $B_2$  – эквивалентные реактивные проводимости ветвей (рис. 1.8, г).

При  $B_1 = B_2$  противоположные по фазе реактивные токи ветвей компенсируются (рис. 1.9, а), поэтому резонанс в параллельном контуре называется резонансом токов. В результате компенсации реактивных токов входной ток является суммой активных составляющих токов в ветвях. Если  $B_1 \ll G_1$  и  $B_2 \ll G_2$ , т.е.  $X_1 \ll R_1$  и  $X_2 \ll R_2$ , то  $I_{1p} \ll I_{1a}; I_{2p} \ll I_{2a} \Rightarrow I_1 \ll I; I_2 \ll I$ , т.е. токи в ветвях значительно больше входного тока. Свойство усиления тока является важнейшей особенностью резонанса токов. Степень его проявления непосредственно связана с величиной потерь в элементах цепи. В теоретическом случае отсутствия потерь в катушке и в конденсаторе  $R_1 = R_2 = 0$  (рис. 1.9, в) активные токи в ветвях отсутствуют и входной ток контура равен нулю (рис. 1.10, б).

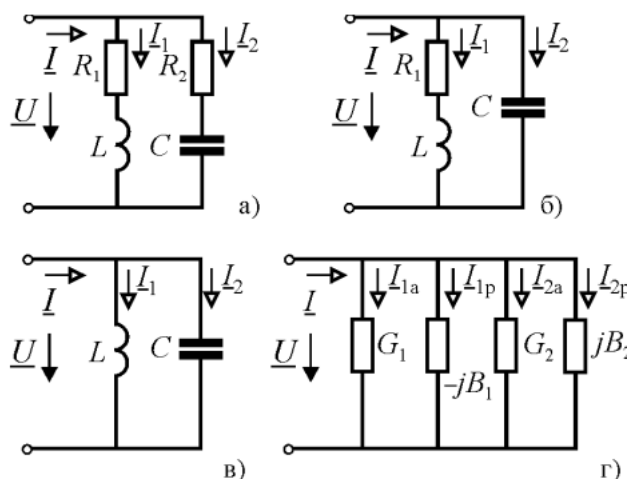


Рисунок 1.9 – Параллельное соединение элементов цепи

Полная проводимость расчётного эквивалента контура (рис. 1.8, г) равна:

$$Y = \sqrt{(G_1 + G_2)^2 + (B_1 - B_2)^2} ,$$

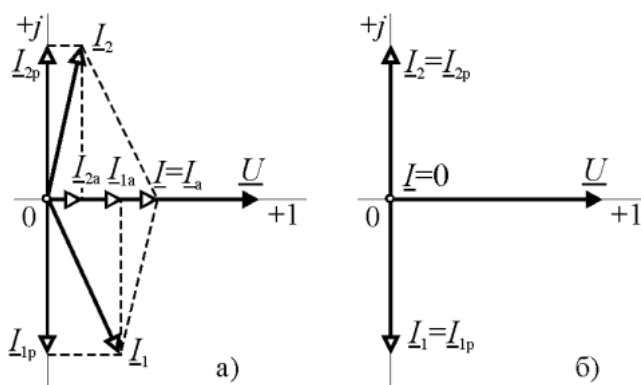


Рисунок 1.10 – Векторные диаграммы параллельной цепи

В режиме резонанса  $B_1 = B_2$  и проводимость  $Y_0 = G_1 + G_2 \approx \min$ , а входное сопротивление –  $Z_0 = 1/Y_0 \approx \max$ . Приближённое равенство для проводимости в точке резонанса использовано потому, что минимум суммарной активной проводимости ветвей не соответствует частоте резонанса. Поэтому минимум полной проводимости несколько смещён относительно резонансной частоты.

Реактивные мощности ветвей контура в режиме резонанса одинаковы и имеют разные знаки  $Q_L = B_1 U^2 = Q_2 = B_2 U^2$ . Это значит, что при резонансе токов, также как при резонансе напряжений, между катушкой индуктивности и конденсатором происходит периодический обмен энергией без участия

источника питания, мощность которого расходуется только на покрытие потерь энергии в активных сопротивлениях.

Раскрывая реактивные проводимости ветвей через параметры цепи, получим условие резонанса в виде:

$$\frac{w_0' L}{R_1^2 + (w_0' L)^2} = \frac{1 / (w_0' C)}{R_1^2 + [1 / (w_0' C)]^2}, \quad (1.17)$$

где  $w_0'$  – резонансная частота.

Из равенства (1.17) после преобразований получим:

$$w_0' = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{L/C - R_1^2}{L/C - R_2^2}} = w_0 \sqrt{\frac{\rho^2 - R_1^2}{\rho^2 - R_2^2}}, \quad (1.18)$$

Анализ выражений (1.17-1.18) позволяет отметить ряд особенностей явления резонанса в параллельном контуре:

1) Резонансная частота зависит не только от параметров реактивных элементов контура, но и от активных сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ . Поэтому, в отличие от последовательного контура, резонанс в цепи можно создать вариацией пяти параметров. Причём, изменением индуктивности или ёмкости в контуре можно создать два резонансных режима, в чём легко убедиться, анализируя условие резонанса. Выражение (1.17) является квадратным уравнением относительно  $L$  или  $C$ , и при определённых соотношениях остальных величин может дать два вещественных решения.

2) Резонанс возможен только в том случае, если оба активных сопротивления больше или меньше  $\rho$ , т.к. иначе подкоренное выражение в (1.18) отрицательно.

3) Если  $R_1 = R_2 = \rho$ , то подкоренное выражение в (1.18) неопределённо и на практике это означает, что сдвиг фаз между током и напряжением на входе контура равен нулю при любой частоте.



4) В случае  $R_1 \ll \rho; R_2 \ll \rho$  резонансная частота параллельного контура практически равна резонансной частоте последовательного контура  $\omega'_0 \approx \omega_0$ .

Сложность выражения (1.17) затрудняет анализ резонансных явлений в общем виде, поэтому его обычно проводят для идеального параллельного контура рис. 2.26, в. В этом случае  $B_1 = 1/(\omega L); B_2 = \omega C; B = B_1 - B_2$  и частотные характеристики проводимостей имеют вид, приведённый на рис. 2.28, а. При частотах ниже резонансной эквивалентная проводимость  $B > 0$  имеет индуктивный характер. При возрастании частоты в диапазоне от  $\omega_0$  до  $\infty B < 0$ , т.е. имеет ёмкостный характер.

Резонансные кривые идеального контура без потерь для токов в ветвях и входного тока при условии  $U = const$  показаны на рис. 1.11, б. В реальном контуре активная проводимость отлична от нуля при любой частоте, поэтому входной ток не обращается в нуль.

Обычно потери в конденсаторе существенно меньше потерь в катушке. В этом случае  $R_2 \approx 0$  и схема замещения цепи имеет вид рис. 1.11, б.

Резонансная частота такого контура:

$$\omega'_0 = \omega_0 \sqrt{1 - (R_1 / \rho)^2}, \quad (1.19)$$

ниже частоты идеального контура. Из выражения (2.27) следует, что резонанс возможен только, если  $Q = \rho/R_1 > 1$ .

Резонансная кривая тока для схемы рис. 1.9, б приведена на рис. 1.11, в. Здесь же для сравнения штриховой линией показана резонансная кривая идеального контура. Из рисунка видно, что резонансные кривые контуров существенно отличаются. При нулевой частоте ток реального контура ограничен активным сопротивлением катушки  $R_1$ . Минимум тока имеет конечное значение и смещён относительно точки резонанса. Значение минимума и его смещение зависят от добротности контура  $Q = \rho/R_1$ . С увеличением добротности значение минимума уменьшается и смещение стремится к нулю. Уменьшается также

различие резонансных частот реального и идеального контура. И в целом с ростом добротности кривая реального контура стремится к идеальной кривой.

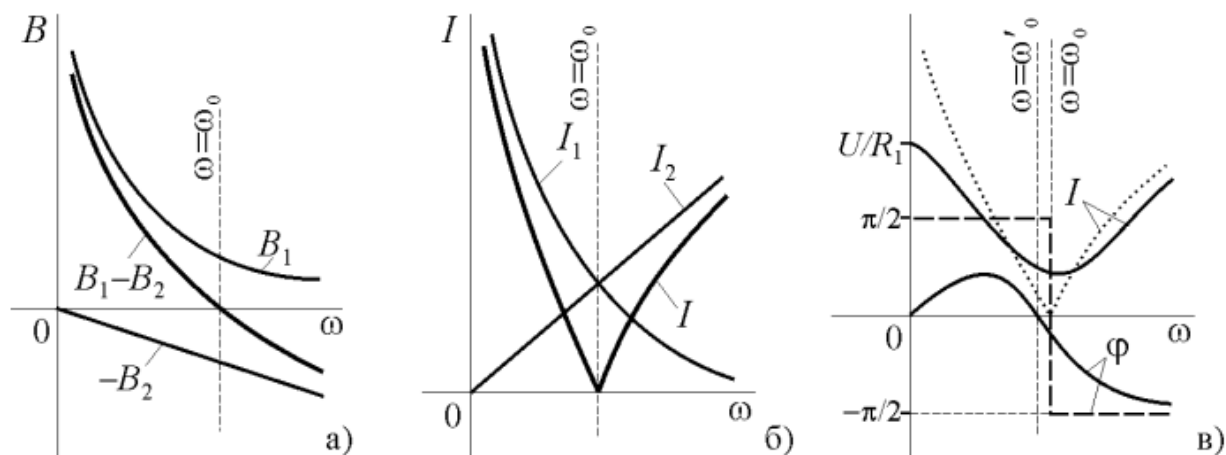


Рисунок 1.11 – Резонансная кривая тока

Частотная характеристика фазового сдвига входного тока и напряжения  $\phi(\omega)$  приведена на рис. 1.11, в. Она имеет максимум в области частот  $0 < \omega < \omega'_0$ , степень выраженности которого зависит от добротности. По мере снижения добротности максимальное значение уменьшается и при  $Q = 1$  исчезает максимум и точка пересечения характеристики с осью абсцисс, т.е. точка резонанса.

Частотные свойства последовательного и параллельного резонансных контуров во многом противоположны. Последовательный контур в режиме резонанса обладает малым входным сопротивлением, а параллельный – большим. При низких частотах реактивное сопротивление последовательного контура имеет ёмкостный характер, а параллельного – индуктивный. В последовательном контуре при резонансе наблюдается усиление напряжения на реактивных элементах, а в параллельном – тока в них. Всё это позволяет использовать явление резонанса в различных контурах и сочетаниях контуров для эффективной обработки сигналов, выделяя или подавляя в них заданные частоты или диапазоны частот.

*Вопросы для самостоятельной проработки:*

1. Какое явление называется резонансом в электрической цепи?
2. Какому условию должен удовлетворять двухполюсник, чтобы в нём мог возникнуть режим резонанса?
3. Что такое резонансный контур?
4. Какой тип резонанса возможен в последовательном (параллельном) контуре?
5. Почему резонанс в последовательном (параллельном) контуре называется резонансом напряжений (токов)?
6. Какие параметры элементов контура можно изменять, чтобы создать режим резонанса?
7. Что такое характеристическое сопротивление контура?
8. В каком случае входное напряжение последовательного контура в режиме резонанса будет меньше напряжений на реактивных элементах?
9. Чем определяется соотношение входного напряжения в режиме резонанса и напряжений на реактивных элементах?
10. Поясните физическую природу того, что напряжения на реактивных элементах в режиме резонанса могут превышать входное напряжение последовательного контура.
11. Как влияет величина добротности контура на частотные характеристики?
12. В каком случае входной ток параллельного контура в режиме резонанса будет меньше токов в реактивных элементах?
13. В каком случае входной ток параллельного контура в режиме резонанса будет равен нулю?
14. В каком случае параллельный контур будет находиться в режиме резонанса при всех частотах?
15. В каком случае в параллельном контуре режим резонанса невозможен?
16. От чего зависит величина входного тока параллельного контура в режиме резонанса?

### 1.5. Цепи с индуктивно связанными элементами

Элементы электрической цепи могут располагаться в пространстве таким образом, что создаваемые ими магнитные потоки будут частично сцепляться с контурами (охватывать контуры) протекания тока других элементов. На рис. 1.12 показаны две катушки индуктивности, расположенные таким образом, что при протекании в обмотке первой катушки тока  $i_1$  часть её магнитного потока образует потокосцепление со второй катушкой  $\Psi_{21}$ .

Величина потокосцепления  $\Psi_{21}$  определяется током в первой катушке и некоторым коэффициентом  $M_{21}$ , зависящим от магнитных свойств среды, геометрии катушек и их взаимного положения в пространстве:

$$\psi_{21} = M_{21}i_1, \quad (1.20)$$

Коэффициент  $M_{21}$  называется *коэффициентом взаимной индукции или взаимной индуктивностью*. Единицей измерения взаимной индуктивности, также, как и индуктивности, является генри [Гн].

При протекании тока по второй катушке будет создаваться потокосцепление с первой:

$$\psi_{12} = M_{12}i_2, \quad (1.21)$$

Пользуясь теорией электромагнитного поля, можно показать, что:

$$M_{12} = M_{21} = M, \quad (1.22)$$

Таким образом, полное потокосцепление каждой катушки будет состоять из собственного потокосцепления и потокосцепления, создаваемого другой катушкой. Причём магнитные потоки катушек могут быть иметь одинаковые или встречные направления. Взаимное направление потоков зависит от направления намотки витков катушек и направления протекания тока в них. Если магнитные потоки катушек направлены одинаково, то составляющие потокосцепления суммируются и такое включение называется согласным. В

противном случае оно называется встречным. Учитывая это, можно представить полные потокоцепления катушек  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  в виде:

$$\Psi_1 = \Psi_{11} \pm \Psi_{12}; \quad \Psi_2 = \Psi_{22} \pm \Psi_{21}, \quad (1.23)$$

где  $\Psi_{11} = L_1 i_1$  и  $\Psi_{22} = L_2 i_2$  – потокоцепления, создаваемые собственным током катушек или собственные потокоцепления. Положительный знак в (1.22) соответствует согласному включению катушек. Для определения взаимного направления потоков на схемах замещения условные начала обмоток помечают точкой (рис. 1.13). Если в обеих катушках положительные направления токов одинаково ориентированы по отношению к началам обмоток, то потоки направлены согласно.

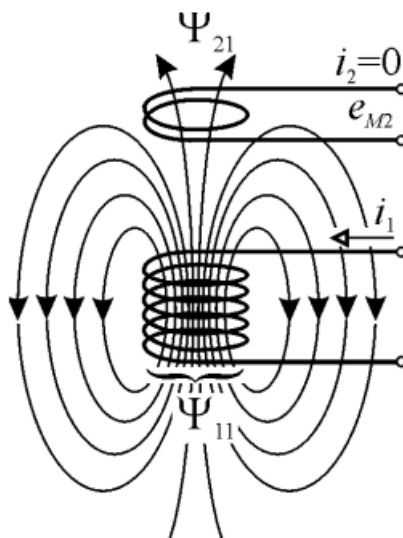


Рисунок 1.12 – Воздействие магнитного потока на катушки индуктивности

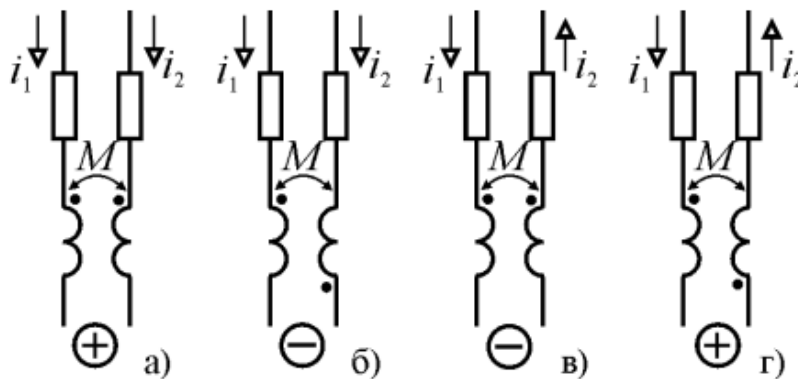


Рисунок 1.13 – Схемы замещения обмоток

В соответствии с законом электромагнитной индукции на участке электрической цепи, с которым сцепляется изменяющийся магнитный поток, наводится ЭДС равная скорости его изменения, поэтому, с учётом (1.20-1.23), в катушках будут наводиться ЭДС:

$$\begin{aligned} e_{1L} &= -\frac{d\Psi_1}{dt} = -\frac{d(\Psi_{11} \pm \Psi_{12})}{dt} = -L_1 \frac{di_1}{dt} \mp M \frac{di_2}{dt} = -e_{L_1} \mp e_{M_1}, \\ e_{2L} &= -\frac{d\Psi_2}{dt} = -\frac{d(\Psi_{22} \pm \Psi_{21})}{dt} = -L_2 \frac{di_2}{dt} \mp M \frac{di_1}{dt} = -e_{L_2} \mp e_{M_2}, \end{aligned} \quad (1.24)$$

Каждая составляющая полного потокосцепления создаёт в катушке свою ЭДС. Собственные потокосцепления катушек создают ЭДС самоиндукции  $e_{L_1}$  и  $e_{L_2}$ , а взаимные потокосцепления – ЭДС взаимной индукции  $e_{M_1}$  и  $e_{M_2}$ .

Пользуясь выражениями (1.24), можно определить падения напряжения на индуктивных элементах катушек:

$$\begin{aligned} u_{1L} &= -e_{1L} = u_{L_1} + u_{M_1} = L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt}, \\ u_{2L} &= -e_{2L} = u_{L_2} + u_{M_2} = L_2 \frac{di_2}{dt} \pm M \frac{di_1}{dt}, \end{aligned} \quad (1.25)$$

или в комплексной форме:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1L} &= j\omega L_1 \underline{I}_1 \pm j\omega M \underline{I}_2, \\ \underline{U}_{2L} &= j\omega L_2 \underline{I}_2 \pm j\omega M \underline{I}_1, \end{aligned} \quad (1.26)$$

В результате того, что рассматриваемые нами катушки расположены в пространстве магнитных полей друг друга, в электрической цепи каждой из обмоток действуют ЭДС  $e_{M_1}$  и  $e_{M_2}$ , обусловленные током, протекающим в цепи другой обмотки. Таким образом, электрические цепи обмоток оказываются связанными друг с другом посредством магнитных полей катушек. Степень магнитной связи характеризуется *коэффициентом связи*:

$$k = \sqrt{\frac{\Psi_{12}\Psi_{21}}{\Psi_1\Psi_2}} = \sqrt{\frac{M^2}{L_1L_2}} = \frac{M}{\sqrt{L_1L_2}} < 1, \quad (1.27)$$

Коэффициент связи катушек всегда меньше единицы, так как  $\Psi_{12} < \Psi_{22}$  и  $\Psi_{21} < \Psi_{11}$ . Равенство единице возможно только, если собственные и взаимные потокоцепления равны друг другу, но это невозможно в принципе, т.к. всегда существуют потоки рассеяния, т.е. потоки, сцепляющиеся только с одной обмоткой и не охватывающие контур другой.

Явление взаимной индукции лежит в основе большого количества технических устройств и целых областей техники. Это, прежде всего, трансформаторы, без которых невозможно эффективное производство и передача электрической энергии. Это значительная часть электрических машин, обеспечивающих преобразование электрической энергии в механическую. В радиотехнике, автоматике, метрологии и других высокотехнологичных областях техники используется множество элементов и устройств, основанных на явлении взаимной индукции.

Рассмотрим задачу анализа электрической цепи с индуктивно связанными элементами на примере последовательного соединения двух катушек (рис. 1.14, а).

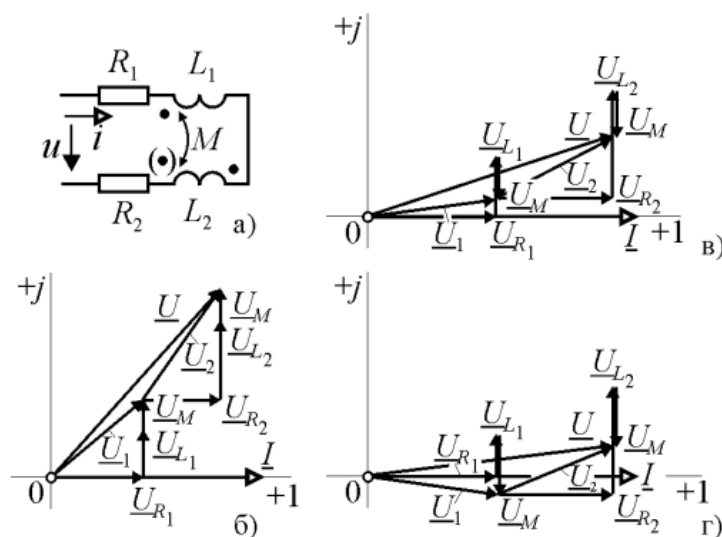


Рисунок 1.14 – Последовательное соединение двух катушек

По второму закону Кирхгофа с учётом (1.25) и того, что в обеих катушках протекает одинаковый ток, для контура цепи можно составить уравнения для мгновенных значений:

$$\begin{aligned}
u &= u_R + u_{1L} + u_{2L} + u_{R_2} = R_1 i + L_1 \frac{di}{dt} \pm M \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} \pm M \frac{di}{dt} + R_2 i = \\
&= (R_1 + R_2) i + (L_1 + L_2 \pm M) \frac{di}{dt}
\end{aligned} \quad (1.28)$$

Переходя к комплексным значениям, получим уравнение:

$$\begin{aligned}
\underline{U} &= \underline{U}_{R_1} + \underline{U}_{L_1} \pm \underline{U}_M \pm \underline{U}_M + \underline{U}_{L_2} + \underline{U}_{R_2} = \\
&= R_1 \underline{I} + j\omega L_1 \underline{I} \pm j\omega M \underline{I} \pm j\omega M \underline{I} + j\omega L_2 \underline{I} + R_2 \underline{I} = \\
&= [(R_1 + R_2) + j\omega(L_1 + L_2 \pm 2M)] \underline{I} = \\
&= [(R_1 + R_2) + j(X_{L_1} + X_{L_2} \pm 2X_M)] \underline{I} = \\
&= (R + jX) \underline{I}
\end{aligned} \quad (1.29)$$

где  $j\omega M = jX_M$  – комплексное сопротивление взаимной индуктивности.

Из уравнения (1.29) следует, что взаимная индуктивность катушек при согласном включении увеличивает реактивное сопротивление цепи, а при встречном – уменьшает.

На рис. 1.14 представлены векторные диаграммы для согласного (б) и встречного включения (в-г). Если индуктивность одной из катушек меньше взаимной индуктивности, то при встречном включении у неё наблюдается «ёмкостный» эффект (рис. 1.14, г), когда напряжение отстаёт по фазе от тока, протекающего через катушку. Но в целом реактивное сопротивление цепи имеет индуктивный характер, т.к. эквивалентная индуктивность  $L = L_1 + L_2 - 2M > 0$  и ток отстаёт по фазе от напряжения.

Различие индуктивного сопротивления при согласном и встречном включении катушек позволяет измерить их взаимную индуктивность. Для этого измеряют ток, напряжением и активную мощность при двух схемах включения\*\* и определяют реактивные сопротивления:

$$X_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2}; \quad X_2 = \sqrt{Z_2^2 - R_2^2}, \quad (1.30)$$



где  $Z_1 = U_1 / I_1$ ;  $Z_2 = U_2 / I_2$  – полные сопротивления, а  $R_1 = P_1 / I_1^2$ ;  $R_2 = P_2 / I_2^2$  – активные сопротивления цепи при первом и втором измерениях. Пусть первое измерение соответствует согласному включению, тогда:

$$X_1 = X_{L_1} + X_{L_2} + 2X_M; \quad X_2 = X_{L_1} + X_{L_2} - 2X_M, \quad (1.31)$$

Вычитая одно значение из другого, получим:

$$\begin{aligned} X_1 - X_2 &= 4X_M = 4\omega M \\ \Downarrow \\ M &= \frac{|X_1 - X_2|}{4\omega} \end{aligned}, \quad (1.32)$$

Следовательно, зная частоту  $\omega$ , при которой производились измерения, можно определить значение взаимной индуктивности. При этом принятое при выводе выражения (1.32) условие соответствия первого измерения согласному включению требуется только для определённости в записи выражений для  $X_1$  и  $X_2$ . При расчёте по формуле (1.32) знак разности не имеет значения.

Для маркировки выводов катушек, начал обмоток или концов, достаточно произвести два измерения тока при разных включениях и одинаковом напряжении питания. Меньший ток будет соответствовать согласному включению.

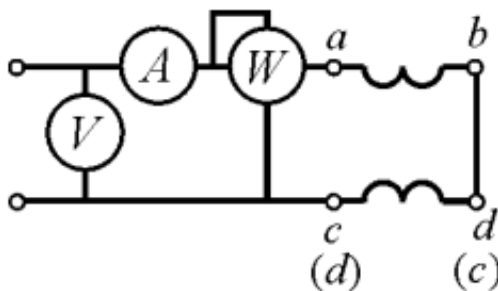


Рисунок 2.32 – Соединение двух катушек с измерительными устройствами

*Вопросы для самостоятельной проработки:*

1. В каком случае между электрическими цепями возникает магнитная связь?

2. По какому признаку определяется согласное и встречное включение катушек?
3. Что такое коэффициент связи катушек?
4. Почему коэффициент связи катушек не может быть равен единице?
5. Как определить начала и концы двух катушек?
6. Нарисуйте электрическую схему для определения начал и концов двух катушек.

## ГЛАВА 2. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

Трёхфазные цепи являются основным видом электрических цепей, используемых при производстве, передаче и распределении электрической энергии. Они являются частным случаем симметричных многофазных цепей, под которыми понимают совокупность электрических цепей с источниками синусоидальных ЭДС, имеющими одинаковые амплитуды и частоты и смещёнными по фазе относительно друг друга на одинаковый угол. В технике используются также другие многофазные цепи. Шести и двенадцатифазные – в силовых выпрямительных установках, двухфазные – в автоматике, но наибольшее распространение имеют именно трёхфазные системы питания. Это связано с тем, что трёхфазная система является минимально возможной симметричной системой, обеспечивающей:

- экономически эффективное производство, передачу и распределение электроэнергии.
- эффективное преобразование электрической энергии в механическую посредством машин с вращающимся магнитным полем.
- возможность использования потребителем двух различных напряжений питания без дополнительных преобразований.

### 2.1. Получение трёхфазной системы ЭДС

Для создания трёхфазной электрической цепи требуются три источника ЭДС с одинаковыми амплитудами и частотами и смещёнными по фазе на  $120^\circ$ . Простейшим техническим устройством, обеспечивающим выполнение этих условий, является синхронный генератор, функциональная схема которого приведена на рис. 2.1. Ротор (вращающаяся часть) генератора представляет собой электромагнит или постоянный магнит. На статоре (неподвижной части) генератора расположены три одинаковые обмотки, смещённые в пространстве друг относительно друга на  $120^\circ$ . При вращении ротора его магнитное поле меняет своё положение относительно обмоток и в них наводятся синусоидальные ЭДС. Частота и амплитуда ЭДС обмоток определяется частотой

вращения ротора  $\omega$ , которая в промышленных генераторах поддерживается строго постоянной. Равенство ЭДС обмоток обеспечивается идентичностью их конструктивных параметров, а фазовое смещение – смещением обмоток в пространстве.

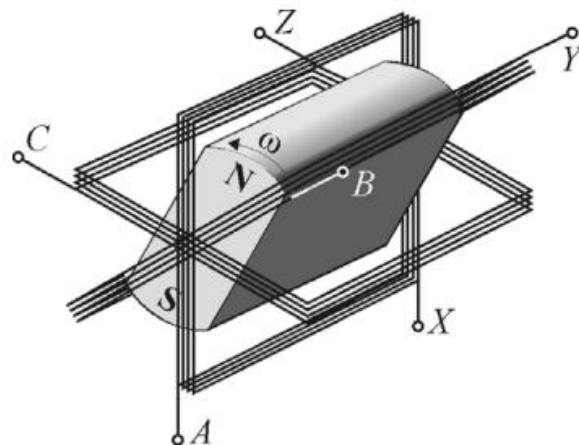


Рисунок 2.1 – Общее изображение вращающейся части синхронного генератора

Начала обмоток генератора обозначаются буквами латинского алфавита *A, B, C*, а их концы *X, Y, Z*. Последовательность, в которой фазные ЭДС проходят через одинаковые состояния, например, через нулевые значения, называется *порядком чередования фаз*. В электрических сетях этот порядок жёстко соблюдается, т.к. его нарушение может привести к серьёзным экономическим последствиям и к угрозе жизни и здоровью людей. В отечественной литературе принято обозначать ЭДС источников индексами, соответствующими обозначению, начал обмоток, т.е. *A-B-C*.

Пусть начальная фаза ЭДС  $e_A$  равна нулю, тогда мгновенные значения ЭДС обмоток генератора равны:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t; & e_B &= E_m \sin(\omega t - 2\pi / 3); \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 4\pi / 3) = E_m \sin(\omega t + 2\pi / 3) \end{aligned}$$

или в комплексной форме:

$$\begin{aligned}\underline{E}_A &= Ee^{j0} = E(1 + j0); \quad \underline{E}_B = Ee^{-j2\pi/3} = E\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right); \\ \underline{E}_C &= Ee^{-j4\pi/3} = Ee^{j2\pi/3} = E\left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\end{aligned}, \quad (2.1)$$

На рис. 2.2 показаны графики мгновенных значений и векторная диаграмма ЭДС. Вектор  $\underline{E}_A$  направлен по вещественной оси, вектор  $\underline{E}_B$  отстаёт от него по фазе на  $120^\circ$ , а вектор  $\underline{E}_C$  опережает  $\underline{E}_A$  на такой же угол.

Основным свойством симметрии многофазных систем является равенство нулю суммы мгновенных значений ЭДС, напряжений и токов, т.е.

$$e_A + e_B + e_C = 0 \Leftrightarrow \underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = 0, \quad (2.2)$$

В этом можно удостовериться, сложив комплексные числа в выражениях (2.1). Обеспечение симметрии системы является необходимым условием её эффективной работы.

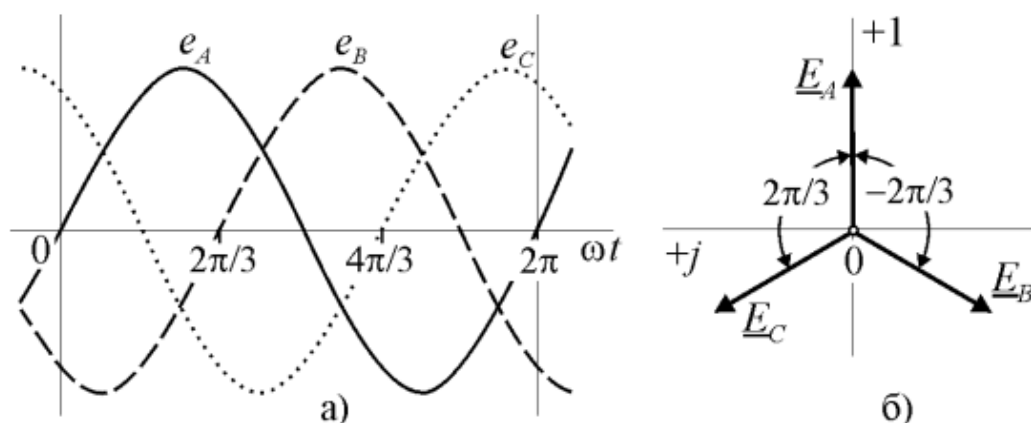


Рисунок 2.2 – Графики мгновенных значений и векторная диаграмма ЭДС

*Вопросы для самостоятельной проработки:*

1. Какими преимуществами обладают трёхфазные системы энергоснабжения?
2. Как получают трёхфазную систему ЭДС?
3. Каким свойством обладают симметричные многофазные системы?
4. Что такое порядок чередования фаз?
5. Что такое симметричная система ЭДС (токов, напряжений)?

## 2.2. Связывание цепей трёхфазной системы

Если к каждой обмотке трёхфазного генератора подключить нагрузку, то три отдельные электрические цепи (рис. 2.3, а) образуют *трёхфазную несвязанную систему*. Каждая электрическая цепь, включающая источник ЭДС и нагрузку, называется *фазой* трёхфазной цепи. Напряжения между началами и концами обмоток генератора и напряжения между началами (а, b, с) и концами (х, у, z) нагрузки называются *фазными напряжениями*. Если сопротивлением соединительных проводов можно пренебречь, то  $\underline{U}_A = -\underline{E}_A = \underline{U}_A$ ,  $\underline{U}_B = -\underline{E}_B = \underline{U}_B$ ,  $\underline{U}_C = -\underline{E}_C = \underline{U}_C$ . Токи  $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ , протекающие в фазах называются *фазными токами*.

В несвязанной трёхфазной системе источники электрической энергии и нагрузка соединены шестью проводами (рис. 2.3, а) и представляют собой три независимые электрические цепи. Очевидно, что такая система ничем не отличается от трёх однофазных цепей. Если же обмотки генератора и нагрузки фаз соединить между собой, то образуется связанная трёхфазная цепь. На рис. 2.3, б показана трёхфазная цепь, в которой фазы генератора и нагрузка соединены звездой. Узлы соединений обмоток генератора и фаз нагрузки называются нейтральными (нулевыми) *точками* или *нейтралями* (N, n на 2.3, б), а провод, соединяющий эти точки – *нейтральным (нулевым) проводом*.

Проводники, соединяющие генератор и нагрузку, называются *линейными проводами*, а напряжения между линейными проводами ( $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  на рис. 3.3, б) – *линейными напряжениями*.

В связанной системе генератор и нагрузка соединены только четырьмя проводами и такая система называется *четырёхпроводной*. В некоторых случаях, как мы увидим далее, число проводов может быть уменьшено до трёх.

Уменьшение числа проводов существенно снижает стоимость и эксплуатационные расходы линий передачи и распределения электроэнергии.

Связать отдельные цепи можно также треугольником, но обмотки генераторов обычно соединяют звездой. В этом случае с помощью второго

закона Кирхгофа можно установить соотношения между комплексными фазными и линейными напряжениями генератора (рис. 2.3, б):

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B; \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C; \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A, \quad (2.3)$$

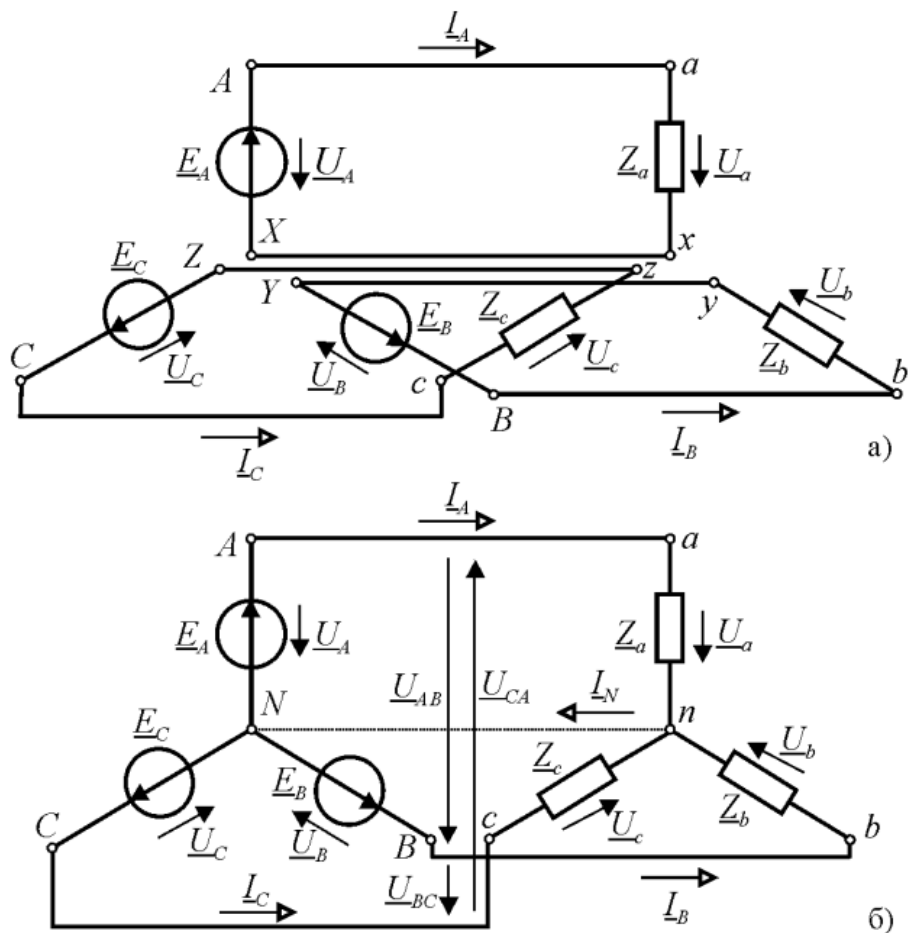


Рисунок 2.3 – Схема электрических соединений трехфазной системы

В симметричной трёхфазной системе фазные напряжения одинаковы:

$$U_A = U_B = U_C = U_\phi$$

Подставляя комплексные фазные напряжения в первое уравнение (2.3), получим:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= U_\phi - U_\phi \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{U_\phi}{2} (3 + j\sqrt{3}) \\ &\Downarrow \\ |\underline{U}_{AB}| &= \frac{U_\phi}{2} \sqrt{3^2 + (\sqrt{3})^2} = U_\phi \sqrt{3} \end{aligned}$$

Это соотношение можно получить также геометрическими построениями в треугольнике векторов  $\underline{U}_{AB}$ ,  $\underline{U}_A$ ,  $\underline{U}_B$  на рис. 2.4. Отсюда, с учётом равенства линейных напряжений:

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_l = U_\phi \sqrt{3}, \quad (2.4)$$

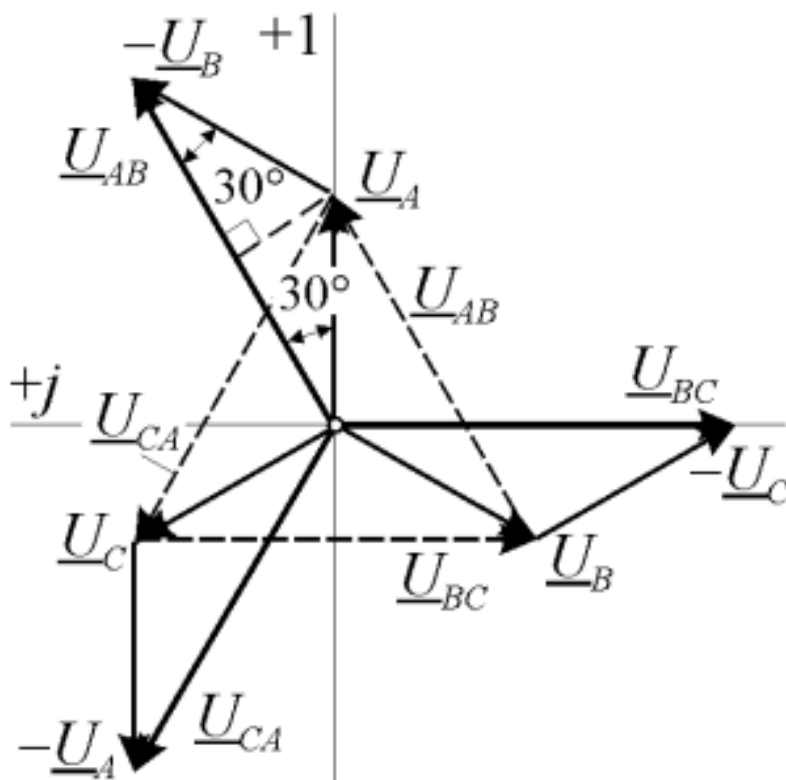


Рисунок 2.4 – Векторная диаграмма напряжений трехфазной системы

*Вопросы для самостоятельной проработки:*

1. Что понимают под фазой трёхфазной сети?
2. Дайте определения фазных, линейных и нейтральных (нулевых) проводов.
3. Дайте определения фазных и линейных токов и напряжений.
4. Сколько существует способов связи источников и нагрузки в трёхфазной сети?
5. Как соотносятся между собой фазные и линейные напряжения симметричного трёхфазного источника?



## 2.3. Расчёт цепи при соединении нагрузки звездой В случае соединения нагрузки звездой фазные токи

В случае соединения нагрузки звездой фазные токи равны линейным, т.е.

$$\underline{I}_\phi = \underline{I}_L.$$

### 2.3.1. Соединение нагрузки звездой с нейтральным проводом

При наличии в цепи нейтрального провода, т.е. в четырёхпроводной сети, фазные напряжения нагрузки и генератора равны  $\underline{U}_A = \underline{U}_a; \underline{U}_B = \underline{U}_b; \underline{U}_C = \underline{U}_c$  и комплексные фазные токи можно определить по закону Ома:

$$\underline{I}_a = \underline{U}_A / \underline{Z}_a; \underline{I}_b = \underline{U}_B / \underline{Z}_b; \underline{I}_c = \underline{U}_C / \underline{Z}_c, \quad (2.5)$$

Фазные токи объединяются в узлах  $N$  и  $n$  с током нейтрального провода и по закону Кирхгофа с учётом направлений токов можно составить уравнение:

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = \underline{I}_N, \quad (2.6)$$

Нагрузка, у которой комплексные сопротивления фаз одинаковы  $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\phi = \underline{Z}_\phi e^{j\varphi}$ , называется симметричной. В случае симметрии нагрузки фазные токи образуют симметричную систему (рис. 2.5, а), вследствие чего ток в нейтральном проводе отсутствует  $\underline{I}_N = 0$ .

При несимметричной нагрузке ток нейтрального провода  $\underline{I}_N \neq 0$  и может значительных величин. На рис. 2.5, б приведён пример векторной диаграммы для случая активно-индуктивной нагрузки в фазах  $a$  и  $c$  и активно-ёмкостной в фазе  $b$ . Векторы токов в первых двух фазах смещены в сторону запаздывания по отношению к соответствующим напряжениям на углы  $\phi_a$  и  $\phi_c$ , а в фазе  $b$  – в сторону опережения на угол  $\phi_b$ . Суммируя все три вектора, мы получим вектор тока нейтрального провода  $\underline{I}_N$ , с модулем, превосходящим модули фазных токов.

Трёхфазные сети проектируют и эксплуатируют таким образом, чтобы нагрузка в них была по возможности симметричной. В этом случае ток

нейтрального провода незначителен и его сечение можно существенно уменьшить по сравнению с сечением линейных проводов.

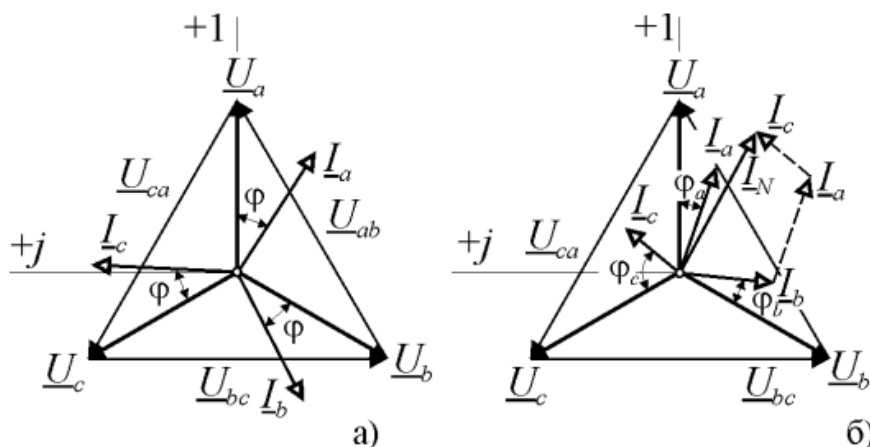


Рисунок 2.5 – Векторная диаграмма напряжения трехфазной системы

### 2.3.2. Соединение нагрузки звездой без нейтрального провода

Отсутствие тока в нейтральном проводе при симметричной нагрузке означает, что этот провод вообще можно исключить и тогда трёхфазная сеть становится *трёхпроводной*.

Если нагрузку сети мысленно охватить замкнутой поверхностью, то по первому закону Кирхгофа для линейных проводов трёхпроводной сети, входящих в эту поверхность, можно составить уравнение:

$$i_A + i_B + i_C = 0 \Leftrightarrow \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0, \quad (2.7)$$

Расчёт токов в трёхпроводной сети при симметричной нагрузке ничем не отличается от расчёта в сети с нейтральным проводом:

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_\phi} = \frac{U_\phi e^{j0}}{Z_\phi e^{j\varphi}} = I_\phi e^{-j\varphi}$$

Идентичны в этом случае и векторные диаграммы токов и напряжений (рис. 2.6, а).

Отсутствие симметрии нагрузки нарушает симметрию фазных токов и напряжений, в то время как фазные и линейные напряжения генератора

остаются симметричными (рис. 2.6, б). В результате этого изменяется потенциал нейтральной точки  $n$  и между нейтральными генератора и нагрузки возникает разность потенциалов  $\underline{U}_{Nn}$  называемая *смещением нейтрали*.

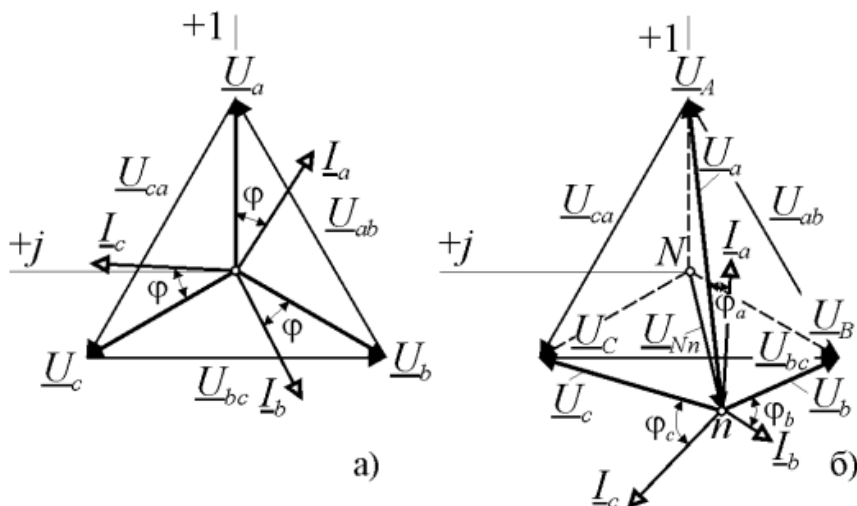


Рисунок 2.6 – Векторная диаграмма напряжения трехфазной системы

Эту разность потенциалов можно найти методом двух узлов:

$$\underline{U}_{Nn} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_a + \underline{U}_B \underline{Y}_b + \underline{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}, \quad (2.8)$$

где  $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$  – комплексные фазные напряжения генератора, В;  $\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c$  – комплексные проводимости фаз нагрузки.

Отсюда можно найти фазные напряжения нагрузки:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{Nn}; \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{Nn}; \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{Nn}, \quad (2.9)$$

а затем по закону Ома фазные токи:

$$\underline{I}_a = \underline{U}_a \underline{Y}_a; \quad \underline{I}_b = \underline{U}_b \underline{Y}_b; \quad \underline{I}_c = \underline{U}_c \underline{Y}_c, \quad (2.10)$$

На рис. 2.6, б приведён пример векторной диаграммы токов и напряжений в трёхфазной сети с активно-индуктивной нагрузкой фаз  $a$  и  $b$  и активно-ёмкостной фазы  $c$ . Вследствие асимметрии нейтральная точка нагрузки  $n$  сместилась относительно нейтральной точки генератора  $N$ . Однако линейные

напряжения нагрузки, определяемые ЭДС генератора, остались неизменными  $\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{AB}, \underline{U}_{bc} = \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{ca} = \underline{U}_{CA}$ . Поэтому векторы фазных напряжений нагрузки  $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$  приходят в те же точки, что и векторы фазных напряжений генератора  $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ . Относительно векторов  $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$  строятся векторы токов  $\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c$  с учётом характера нагрузки в фазах.

Как следует из выражений (2.8-2.10), изменение нагрузки в любой фазе вызывает смещение нейтрали и изменение напряжений и токов в других фазах. Поэтому соединение звездой в трёхпроводной системе питания можно использовать только для симметричной нагрузки, например, для трёхфазных двигателей.

*Вопросы для самостоятельной проработки:*

1. При каком условии наличие или отсутствие нулевого провода не влияет на режим работы нагрузки?
2. Почему нейтральный провод линий электропередачи имеет меньшее сечение, чем линейные провода?
3. В каком случае можно использовать трёхпроводную сеть вместо четырёхпроводной?
4. Что такое смещение нейтрали?
5. Как определяется величина смещения нейтрали?
6. Как рассчитываются фазные напряжения при наличии смещения нейтрали?
7. Почему в трёхпроводной системе изменение нагрузки одной фазы влияет на режим работы двух других?

#### **2.4. Расчёт цепи при соединении нагрузки треугольником**

В случае соединения нагрузки треугольником сопротивления фаз подключаются к линейным проводам (рис. 2.7, а). Фазные напряжения при этом оказываются равными линейным напряжениям генератора:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{AB}; \quad \underline{U}_{bc} = \underline{U}_{BC}; \quad \underline{U}_{ca} = \underline{U}_{CA}$$

Фазные токи рассчитываются по закону Ома:

$$\underline{I}_{ab} = \underline{U}_{AB} / \underline{Z}_{ab}; \quad \underline{I}_{bc} = \underline{U}_{BC} / \underline{Z}_{bc}; \quad \underline{I}_{ca} = \underline{U}_{CA} / \underline{Z}_{ca}, \quad (2.11)$$

Линейные токи определяются через фазные по закону Кирхгофа для узлов  $a, b, c$ :

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}, \quad (2.12)$$

При симметричной нагрузке  $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}_\phi = \underline{Z}_\phi e^{j\phi}$  фазные токи смещены относительно фазных напряжений на одинаковый угол  $\phi$  (рис. 2.7, б). Подставим в первое уравнение (2.11) фазные токи из (2.10):

$$\underline{I}_A = \frac{(\underline{U}_{AB} - \underline{U}_{CA})}{\underline{Z}_\phi}$$

Тогда, с учётом того, что

$$\underline{U}_{AB} = U_\phi e^{j30^\circ} = U_\phi \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right); \quad \underline{U}_{CA} = U_\phi e^{j150^\circ} = U_\phi \left( -\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right) \text{ получим:}$$

$$I_A = I_\phi = U_\phi \sqrt{3} / Z_\phi = I_\phi \sqrt{3}, \quad (2.13)$$

т.е. при симметричной нагрузке соединённой треугольником линейные токи в трёхфазной цепи в  $\sqrt{3}$  раз больше фазных.

В случае несимметричной нагрузки уравнения (2.11-2.12) остаются в силе, но расчёты по ним нужно вести для конкретных параметров.

В общем виде амплитудные и фазовые соотношения можно проследить на векторных диаграммах рис. 2.7. При симметричной активно-индуктивной нагрузке (рис. 2.7, б) векторы фазных токов  $\underline{I}_{ab}, \underline{I}_{bc}, \underline{I}_{ca}$  смещены относительно векторов фазных напряжений  $\underline{U}_{ab}, \underline{U}_{bc}, \underline{U}_{ca}$  на угол  $\phi$ . Векторы линейных токов

$\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$  строятся в соответствии с выражениями (2.12) и образуют симметричную систему.

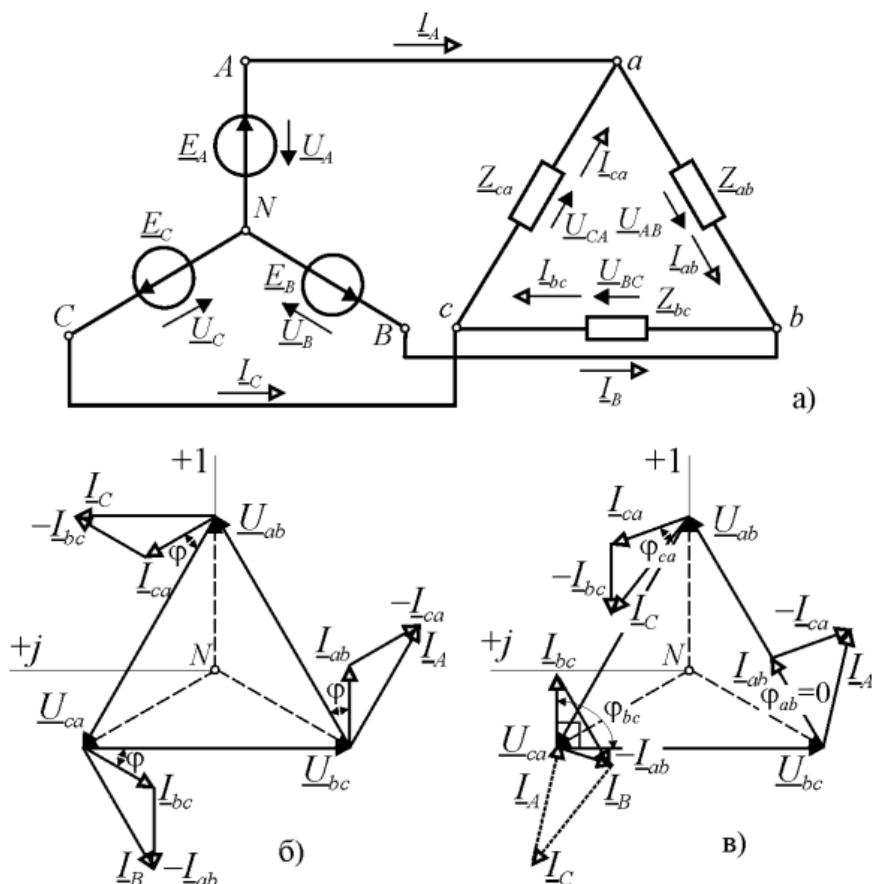


Рисунок 2.7 – Схема соединения векторная диаграмма трехфазной системы

Пример векторных диаграмм для активной, активно-индуктивной и ёмкостной нагрузки фаз  $ab, bc$  и  $ca$  приведён на рис. 2.7, в. В соответствии с характером нагрузки построены векторы фазных токов  $\underline{I}_{ab}, \underline{I}_{bc}, \underline{I}_{ca}$  по отношению к векторам фазных напряжений  $\underline{U}_{ab}, \underline{U}_{bc}, \underline{U}_{ca}$ . После чего построены векторы линейных токов  $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$  в соответствии с выражениями (2.12). В точке с штриховыми линиями показан треугольник линейных токов, иллюстрирующий выполнение условия (2.7) в трёхпроводной сети.

Так как в случае соединения треугольником напряжения на фазах нагрузки равны линейным напряжениям генератора и не зависят от напряжений других фаз, то изменение режима работы любой фазы не оказывает влияния на другие.

*Вопросы для самостоятельной проработки:*

1. Как определяются линейные токи?
2. Как соотносятся между собой фазные и линейные токи при симметричной нагрузке?
3. При каком условии сумма мгновенных значений линейных токов будет равна нулю?
4. Почему при соединении нагрузки треугольником в трёхпроводной сети отсутствует взаимное влияние фазной нагрузки?

## **2.5. Мощность трёхфазной цепи**

### **2.5.1. Мощность при несимметричной нагрузке**

Каждая фаза нагрузки представляет собой отдельный элемент электрической цепи, в котором происходит преобразование энергии или её обмен с источником питания. Поэтому активная и реактивная мощности трёхфазной цепи равны суммам мощностей отдельных фаз:

$$\begin{aligned} P &= P_a + P_b + P_c; \quad Q = Q_a + Q_b + Q_c - \text{для соединения звездой} \\ P &= P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}; \quad Q = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca} - \text{для соединения треугольником} \end{aligned}$$

Активная и реактивная мощности каждой фазы определяются так же, как в однофазной цепи:

$$P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi = R_\phi I_\phi^2; \quad Q_\phi = U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi = X_\phi I_\phi^2, \quad (2.14)$$

Полная мощность трёхфазной цепи равна:

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

причем  $S \neq S_a + S_b + S_c$ ;  $S \neq S_{ab} + S_{bc} + S_{ca}$ .

Полную мощность можно представить также в комплексной форме. Например, для соединения нагрузки звездой:

$$\underline{S} = P + jQ = (P_a + P_b + P_c) + j(Q_a + Q_b + Q_c) = \\ = \underline{S}_a + \underline{S}_b + \underline{S}_c = \underline{U}_a \underline{I}_a + \underline{U}_b \underline{I}_b + \underline{U}_c \underline{I}_c$$

### 2.5.2. Мощность при симметричной нагрузке

При симметричной нагрузке мощности всех фаз одинаковы, поэтому её можно определить, умножив на три выражения (2.14):

$$\begin{aligned} P &= 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi = 3R_\phi I_\phi^2 \\ Q &= 3Q_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi = 3X_\phi I_\phi^2, \\ S &= 3S_\phi = 3U_\phi I_\phi \end{aligned} \quad (2.15)$$

Фазные токи и напряжения в (2.15) можно выразить через линейные с учётом того, что при симметричной нагрузке и соединении её звездой  $U_\phi = U_\lambda / \sqrt{3}$ ;  $I_\phi = I_\lambda$ , а при соединении треугольником —  $U_\phi = U_\lambda$ ;  $I_\phi = I_\lambda / \sqrt{3}$ . Подставляя эти соотношения в (2.15), мы получим для обеих схем соединения одинаковые выражения для мощности:

*Вопросы для самостоятельной проработки:*

1. Как определяется мощность трёхфазной сети при несимметричной нагрузке?
2. Какое условие выполняется для активной и реактивной мощности трёхфазной сети и не выполняется для полной?
3. Какими величинами нужно воспользоваться для вычисления мощности, чтобы выражения не зависели от схемы соединения симметричной нагрузки?



## ГЛАВА 3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ

### 3.1. Задачи по расчету смешанных соединений элементов

1. Дана электрическая схема переменного тока, где в смешанном порядке соединены активные и пассивные элементы: параллельное соединение резистора с сопротивлением 5 Ом и ветви, где последовательно соединены конденсатор с электроемкостью 2 Ф и катушка индуктивности с индуктивностью 0,1 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 220 В с частотой сети 50 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

2. Дана электрическая схема переменного тока, где в смешанном порядке соединены активные и пассивные элементы: параллельное соединение резистора с сопротивлением 10 Ом и ветви, где последовательно соединены конденсатор с электроемкостью 2 Ф и катушка индуктивности с индуктивностью 0,1 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 220 В с частотой сети 50 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого

ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

3. Дана электрическая схема переменного тока, где в смешанном порядке соединены активные и пассивные элементы: параллельное соединение резистора с сопротивлением 15 Ом и ветви, где последовательно соединены конденсатор с электроемкостью 2 Ф и катушка индуктивности с индуктивностью 0,1 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 220 В с частотой сети 50 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

4. Дана электрическая схема переменного тока, где в смешанном порядке соединены активные и пассивные элементы: параллельное соединение резистора с сопротивлением 20 Ом и ветви, где последовательно соединены конденсатор с электроемкостью 2 Ф и катушка индуктивности с индуктивностью 0,1 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 220 В с частотой сети 50 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

5. Дана электрическая схема переменного тока, где в смешанном порядке соединены активные и пассивные элементы: параллельное соединение резистора с сопротивлением 25 Ом и ветви, где последовательно соединены конденсатор с электроемкостью 2 Ф и катушка индуктивности с индуктивностью 0,1 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 220 В с частотой сети 50 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме

переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня входных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

6. Дана электрическая схема переменного тока, где в смешанном порядке соединены активные и пассивные элементы: параллельное соединение резистора с сопротивлением 30 Ом и ветви, где последовательно соединены конденсатор с электроемкостью 2 Ф и катушка индуктивности с индуктивностью 0,1 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 220 В с частотой сети 50 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня входных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

7. Дана электрическая схема переменного тока, где в смешанном порядке соединены активные и пассивные элементы: параллельное соединение резистора с сопротивлением 35 Ом и ветви, где последовательно соединены

конденсатор с емкостью  $2 \text{ Ф}$  и катушка индуктивности с индуктивностью  $0,1 \text{ Гн}$ . Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением  $220 \text{ В}$  с частотой сети  $50 \text{ Гц}$ . При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

8. Дана электрическая схема переменного тока, где в смешанном порядке соединены активные и пассивные элементы: параллельное соединение резистора с сопротивлением  $40 \text{ Ом}$  и ветви, где последовательно соединены конденсатор с емкостью  $2 \text{ Ф}$  и катушка индуктивности с индуктивностью  $0,1 \text{ Гн}$ . Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением  $220 \text{ В}$  с частотой сети  $50 \text{ Гц}$ . При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче

должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

9. Дана электрическая схема переменного тока, где в смешанном порядке соединены активные и пассивные элементы: параллельное соединение резистора с сопротивлением 5 Ом и ветви, где последовательно соединены конденсатор с электроемкостью 1 Ф и катушка индуктивности с индуктивностью 0,1 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 220 В с частотой сети 50 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

10. Дана электрическая схема переменного тока, где в смешанном порядке соединены активные и пассивные элементы: параллельное соединение резистора с сопротивлением 5 Ом и ветви, где последовательно соединены конденсатор с электроемкостью 3 Ф и катушка индуктивности с индуктивностью 0,1 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 220 В с частотой сети 50 Гц.

При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

11. Дана электрическая схема переменного тока, где в смешанном порядке соединены активные и пассивные элементы: параллельное соединение резистора с сопротивлением 5 Ом и ветви, где последовательно соединены конденсатор с электроемкостью 4 Ф и катушка индуктивности с индуктивностью 0,1 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 220 В с частотой сети 50 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на

персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

12. Дана электрическая схема переменного тока, где в смешанном порядке соединены активные и пассивные элементы: параллельное соединение резистора с сопротивлением 5 Ом и ветви, где последовательно соединены конденсатор с электроемкостью 5 Ф и катушка индуктивности с индуктивностью 0,1 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 220 В с частотой сети 50 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

13. Дана электрическая схема переменного тока, где в смешанном порядке соединены активные и пассивные элементы: параллельное соединение резистора с сопротивлением 5 Ом и ветви, где последовательно соединены конденсатор с электроемкостью 6 Ф и катушка индуктивности с индуктивностью 0,1 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 220 В с частотой сети 50 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого



ее элемента в комплексном и целом выражении; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

14. Дана электрическая схема переменного тока, где в смешанном порядке соединены активные и пассивные элементы: параллельное соединение резистора с сопротивлением 5 Ом и ветви, где последовательно соединены конденсатор с электроемкостью 7 Ф и катушка индуктивности с индуктивностью 0,1 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 220 В с частотой сети 50 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

15. Дана электрическая схема переменного тока, где в смешанном порядке соединены активные и пассивные элементы: параллельное соединение резистора с сопротивлением 5 Ом и ветви, где последовательно соединены конденсатор с электроемкостью 8 Ф и катушка индуктивности с индуктивностью 0,1 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 220 В с частотой сети 50 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

16. Дана электрическая схема переменного тока, где в смешанном порядке соединены активные и пассивные элементы: параллельное соединение резистора с сопротивлением 5 Ом и ветви, где последовательно соединены конденсатор с электроемкостью 9 Ф и катушка индуктивности с индуктивностью 0,1 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 220 В с частотой сети 50 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме

переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

17. Дана электрическая схема переменного тока, где в смешанном порядке соединены активные и пассивные элементы: параллельное соединение резистора с сопротивлением 5 Ом и ветви, где последовательно соединены конденсатор с электроемкостью 10 Ф и катушка индуктивности с индуктивностью 0,1 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 220 В с частотой сети 50 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

18. Дана электрическая схема переменного тока, где в смешанном порядке соединены активные и пассивные элементы: параллельное соединение резистора с сопротивлением 5 Ом и ветви, где последовательно соединены

конденсатор с электроемкостью  $2 \text{ Ф}$  и катушка индуктивности с индуктивностью  $0,1 \text{ Гн}$ . Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением  $12 \text{ В}$  с частотой сети  $10 \text{ Гц}$ . При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

19. Дана электрическая схема переменного тока, где в смешанном порядке соединены активные и пассивные элементы: параллельное соединение резистора с сопротивлением  $5 \text{ Ом}$  и ветви, где последовательно соединены конденсатор с электроемкостью  $2 \text{ Ф}$  и катушка индуктивности с индуктивностью  $0,1 \text{ Гн}$ . Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением  $24 \text{ В}$  с частотой сети  $60 \text{ Гц}$ . При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче

должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

20. Дана электрическая схема переменного тока, где в смешанном порядке соединены активные и пассивные элементы: параллельное соединение резистора с сопротивлением 5 Ом и ветви, где последовательно соединены конденсатор с электроемкостью 2 Ф и катушка индуктивности с индуктивностью 0,1 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 48 В с частотой сети 40 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

### **3.2. Задачи по расчету цепей с индуктивно связанными элементами**

21. Дана электрическая цепь переменного тока с индуктивно связанными элементами: последовательное соединение первого резистора с сопротивлением 10 Ом и второго – 5 Ом, а также соединение катушек

индуктивности с индуктивностью 0,1 и 0,2 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 48 В с частотой сети 40 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; определить коэффициент свчзи цепи; вычислить эквивалентную индуктивность цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

22. Дана электрическая цепь переменного тока с индуктивно связанными элементами: последовательное соединение первого резистора с сопротивлением 2 Ом и второго – 4 Ом, а также соединение катушек индуктивности с индуктивностью 0,15 и 0,25 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 48 В с частотой сети 40 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; определить коэффициент свчзи цепи; вычислить эквивалентную индуктивность цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности

контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

23. Дана электрическая цепь переменного тока с индуктивно связанными элементами: последовательное соединение первого резистора с сопротивлением 3 Ом и второго – 6 Ом, а также соединение катушек индуктивности с индуктивностью 0,5 и 0,6 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 48 В с частотой сети 40 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; определить коэффициент свчзи цепи; вычислить эквивалентную индуктивность цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

24. Дана электрическая цепь переменного тока с индуктивно связанными элементами: последовательное соединение первого резистора с сопротивлением 9 Ом и второго – 10 Ом, а также соединение катушек

индуктивности с индуктивностью 0,1 и 0,2 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 48 В с частотой сети 40 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; определить коэффициент свчзи цепи; вычислить эквивалентную индуктивность цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

25. Дана электрическая цепь переменного тока с индуктивно связанными элементами: последовательное соединение первого резистора с сопротивлением 7 Ом и второго – 9 Ом, а также соединение катушек индуктивности с индуктивностью 0,1 и 0,5 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 48 В с частотой сети 40 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; определить коэффициент свчзи цепи; вычислить эквивалентную индуктивность цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности



контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

26. Дана электрическая цепь переменного тока с индуктивно связанными элементами: последовательное соединение первого резистора с сопротивлением 5 Ом и второго – 25 Ом, а также соединение катушек индуктивности с индуктивностью 0,5 и 1,5 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 48 В с частотой сети 40 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; определить коэффициент свчзи цепи; вычислить эквивалентную индуктивность цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

27. Дана электрическая цепь переменного тока с индуктивно связанными элементами: последовательное соединение первого резистора с сопротивлением 1 Ом и второго – 1,55 Ом, а также соединение катушек

индуктивности с индуктивностью 0,1 и 0,15 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 48 В с частотой сети 40 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; определить коэффициент свчзи цепи; вычислить эквивалентную индуктивность цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

28. Дана электрическая цепь переменного тока с индуктивно связанными элементами: последовательное соединение первого резистора с сопротивлением 6 Ом и второго – 12 Ом, а также соединение катушек индуктивности с индуктивностью 0,6 и 0,8 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 12 В с частотой сети 40 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; определить коэффициент свчзи цепи; вычислить эквивалентную индуктивность цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности

контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

29. Дана электрическая цепь переменного тока с индуктивно связанными элементами: последовательное соединение первого резистора с сопротивлением 15 Ом и второго – 20 Ом, а также соединение катушек индуктивности с индуктивностью 0,1 и 0,25 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 48 В с частотой сети 40 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; определить коэффициент свчзи цепи; вычислить эквивалентную индуктивность цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

30. Дана электрическая цепь переменного тока с индуктивно связанными элементами: последовательное соединение первого резистора с сопротивлением 16 Ом и второго – 23 Ом, а также соединение катушек

индуктивности с индуктивностью 1,0 и 0,5 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 12 В с частотой сети 40 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; определить коэффициент свчзи цепи; вычислить эквивалентную индуктивность цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

31. Дана электрическая цепь переменного тока с индуктивно связанными элементами: последовательное соединение первого резистора с сопротивлением 10 Ом и второго – 5 Ом, а также соединение катушек индуктивности с индуктивностью 0,1 и 0,2 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 12 В с частотой сети 10 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; определить коэффициент свчзи цепи; вычислить эквивалентную индуктивность цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности

контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

32. Дана электрическая цепь переменного тока с индуктивно связанными элементами: последовательное соединение первого резистора с сопротивлением 10 Ом и второго – 5 Ом, а также соединение катушек индуктивности с индуктивностью 0,1 и 0,2 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 24 В с частотой сети 15 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; определить коэффициент свчзи цепи; вычислить эквивалентную индуктивность цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

33. Дана электрическая цепь переменного тока с индуктивно связанными элементами: последовательное соединение первого резистора с сопротивлением 10 Ом и второго – 5 Ом, а также соединение катушек

индуктивности с индуктивностью 0,1 и 0,2 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 48 В с частотой сети 30 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; определить коэффициент свчзи цепи; вычислить эквивалентную индуктивность цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

34. Дана электрическая цепь переменного тока с индуктивно связанными элементами: последовательное соединение первого резистора с сопротивлением 10 Ом и второго – 5 Ом, а также соединение катушек индуктивности с индуктивностью 0,1 и 0,2 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 96 В с частотой сети 35 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; определить коэффициент свчзи цепи; вычислить эквивалентную индуктивность цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности

контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

35. Дана электрическая цепь переменного тока с индуктивно связанными элементами: последовательное соединение первого резистора с сопротивлением 10 Ом и второго – 5 Ом, а также соединение катушек индуктивности с индуктивностью 0,1 и 0,2 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 110 В с частотой сети 20 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; определить коэффициент свчзи цепи; вычислить эквивалентную индуктивность цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

36. Дана электрическая цепь переменного тока с индуктивно связанными элементами: последовательное соединение первого резистора с сопротивлением 10 Ом и второго – 5 Ом, а также соединение катушек

индуктивности с индуктивностью 0,1 и 0,2 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 220 В с частотой сети 50 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; определить коэффициент свчзи цепи; вычислить эквивалентную индуктивность цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

37. Дана электрическая цепь переменного тока с индуктивно связанными элементами: последовательное соединение первого резистора с сопротивлением 10 Ом и второго – 5 Ом, а также соединение катушек индуктивности с индуктивностью 0,1 и 0,2 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 380 В с частотой сети 50 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; определить коэффициент свчзи цепи; вычислить эквивалентную индуктивность цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности



контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

38. Дана электрическая цепь переменного тока с индуктивно связанными элементами: последовательное соединение первого резистора с сопротивлением 10 Ом и второго – 5 Ом, а также соединение катушек индуктивности с индуктивностью 0,1 и 0,2 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 5 В с частотой сети 15 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; определить коэффициент свчзи цепи; вычислить эквивалентную индуктивность цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

39. Дана электрическая цепь переменного тока с индуктивно связанными элементами: последовательное соединение первого резистора с сопротивлением 10 Ом и второго – 5 Ом, а также соединение катушек

индуктивности с индуктивностью 0,1 и 0,2 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 16 В с частотой сети 5 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; определить коэффициент свчзи цепи; вычислить эквивалентную индуктивность цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

40. Дана электрическая цепь переменного тока с индуктивно связанными элементами: последовательное соединение первого резистора с сопротивлением 10 Ом и второго – 5 Ом, а также соединение катушек индуктивности с индуктивностью 0,1 и 0,2 Гн. Питание данной электрической схемы переменного тока производится от одной фазной сети с напряжением 200 В с частотой сети 25 Гц. При решении данной задачи необходима идентификация следующих пунктов: вычислить показатели сопротивления не только внутри цепи, но и для каждого ее элемента; рассчитать величины напряжений и токов для цепи и для каждого ее элемента в комплексном и целом выражении; определить коэффициент свчзи цепи; вычислить эквивалентную индуктивность цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов в рассматриваемой электрической схеме переменного тока; провести расчет активной и емкостной проводимости в цепи; провести расчет добротности

контура; провести проверочные расчеты в рамках обоснования достоверности выполненных расчетов. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

### 3.3. Задачи по расчету трехфазной цепи

41. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,02$  Гн,  $C=2\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=300$  Гц. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

42. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-45^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+45^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,02$  Гн,  $C=2\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=300$  Гц. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной

цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

43. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-60^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+60^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,02$  Гн,  $C=2\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=300$  Гц. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

44. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-100^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+100^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,02$  Гн,  $C=2\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=300$  Гц. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности.

Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

45. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-180^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+180^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,02$  Гн,  $C=2\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=300$  Гц. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

46. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=120\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=120\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=120\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,02$  Гн,  $C=2\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=300$  Гц. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму

напряжений и тока. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

47. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=90\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=90\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,02$  Гн,  $C=2\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=300$  Гц. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

48. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=70\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=70\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,02$  Гн,  $C=2\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=300$  Гц. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с

применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

49. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=60\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=60\sin(\omega t-90^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+90^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,02$  Гн,  $C=2\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=300$  Гц. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

50. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=80\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=80\sin(\omega t-150^\circ)$ , В;  $e_C(t)=80\sin(\omega t+150^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,02$  Гн,  $C=2\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=300$  Гц. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или

MathCad 15 или РТС MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

51. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=10$  Ом,  $L=0,005$  Гн,  $C=3\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=250$  Гц. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или РТС MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

52. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,03$  Гн,  $C=4\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=100$  Гц. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или РТС MathCad. Рекомендуется оформление окончательного



варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

53. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,06$  Гн,  $C=9\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=320$  Гц. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или РТС MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

54. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,07$  Гн,  $C=1\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=300$  Гц. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или РТС MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с

обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

55. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,1$  Гн,  $C=9\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=305$  Гц. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или РТС MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

56. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=10$  Ом,  $L=0,03$  Гн,  $C=2\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=300$  Гц. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или РТС MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с

обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

57. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,05$  Гн,  $C=8\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=2000$  Гц. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или РТС MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

58. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,05$  Гн,  $C=5\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=150$  Гц. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или РТС MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с

обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

59. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,03$  Гн,  $C=6\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=290$  Гц. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или РТС MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

60. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,035$  Гн,  $C=2,5\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=320$  Гц. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока. Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или РТС MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с

обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

### **3.4. Задачи по оценке характера влияния температуры окружающей среды на функционирование трехфазной сети**

Активное сопротивление элементов электрической цепи значительной мере зависит от температуры окружающей среды в соответствии с выражением 3.1:

$$R = R_{20} \cdot [1 + \alpha(t - 20^{\circ}\text{C})], \quad (3.1)$$

где  $R$  – фактическое активное сопротивление элемента, Ом;  $R_{20}$  – активное сопротивление элемента при температуре  $+20^{\circ}\text{C}$ , Ом;  $\alpha$  – температурный коэффициент элемента,  $48 \times 10^{-4} \text{ Ом}/^{\circ}\text{C}$ .

61. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t) = 100 \sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t) = 100 \sin(\omega t - 120^{\circ})$ , В;  $e_C(t) = 100 \sin(\omega t + 120^{\circ})$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R = 15$  Ом,  $L = 0,035$  Гн,  $C = 2,5 \cdot 10^{-6}$  Ф,  $f = 50$  Гц. Данная цепь размещена в условиях окружающей среды при температуре  $-70^{\circ}\text{C}$ . Известно, что при изменении температуры окружающей среды меняется величина активного сопротивления. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока при сравнении заданной температуры с температурой  $+20^{\circ}\text{C}$ . Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на

персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

62. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,035$  Гн,  $C=2,5\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=50$  Гц. Данная цепь размещена в условиях окружающей среды при температуре  $-60^\circ\text{C}$ . Известно, что при изменении температуры окружающей среды меняется величина активного сопротивления. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока при сравнении заданной температуры с температурой  $+20^\circ\text{C}$ . Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или РТС MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

63. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,035$  Гн,  $C=2,5\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=50$  Гц. Данная цепь размещена в условиях окружающей среды при температуре  $-50^\circ\text{C}$ . Известно, что при изменении температуры окружающей среды меняется величина активного сопротивления. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные

параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока при сравнении заданной температуры с температурой  $+20^{\circ}\text{C}$ . Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

64. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^{\circ})$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^{\circ})$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,035$  Гн,  $C=2,5\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=50$  Гц. Данная цепь размещена в условиях окружающей среды при температуре  $-40^{\circ}\text{C}$ . Известно, что при изменении температуры окружающей среды меняется величина активного сопротивления. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока при сравнении заданной температуры с температурой  $+20^{\circ}\text{C}$ . Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

65. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^{\circ})$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^{\circ})$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,035$  Гн,  $C=2,5\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=50$  Гц. Данная цепь размещена в условиях

окружающей среды при температуре  $-30^{\circ}\text{C}$ . Известно, что при изменении температуры окружающей среды меняется величина активного сопротивления. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока при сравнении заданной температуры с температурой  $+20^{\circ}\text{C}$ . Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

66. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^{\circ})$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^{\circ})$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,035$  Гн,  $C=2,5\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=50$  Гц. Данная цепь размещена в условиях окружающей среды при температуре  $-20^{\circ}\text{C}$ . Известно, что при изменении температуры окружающей среды меняется величина активного сопротивления. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока при сравнении заданной температуры с температурой  $+20^{\circ}\text{C}$ . Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.



67. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,035$  Гн,  $C=2,5\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=50$  Гц. Данная цепь размещена в условиях окружающей среды при температуре  $-10^\circ\text{C}$ . Известно, что при изменении температуры окружающей среды меняется величина активного сопротивления. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока при сравнении заданной температуры с температурой  $+20^\circ\text{C}$ . Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или РТС MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

68. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,035$  Гн,  $C=2,5\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=50$  Гц. Данная цепь размещена в условиях окружающей среды при температуре  $0^\circ\text{C}$ . Известно, что при изменении температуры окружающей среды меняется величина активного сопротивления. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока при сравнении заданной температуры с температурой  $+20^\circ\text{C}$ . Расчеты по данной задаче должны

быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

69. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,035$  Гн,  $C=2,5\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=50$  Гц. Данная цепь размещена в условиях окружающей среды при температуре  $+10^\circ\text{C}$ . Известно, что при изменении температуры окружающей среды меняется величина активного сопротивления. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока при сравнении заданной температуры с температурой  $+20^\circ\text{C}$ . Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

70. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,035$  Гн,  $C=2,5\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=50$  Гц. Данная цепь размещена в условиях окружающей среды при температуре  $+30^\circ\text{C}$ . Известно, что при изменении температуры окружающей среды меняется величина активного сопротивления.

Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока при сравнении заданной температуры с температурой  $+20^{\circ}\text{C}$ . Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

71. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^{\circ})$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^{\circ})$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,035$  Гн,  $C=2,5\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=50$  Гц. Данная цепь размещена в условиях окружающей среды при температуре  $+40^{\circ}\text{C}$ . Известно, что при изменении температуры окружающей среды меняется величина активного сопротивления. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока при сравнении заданной температуры с температурой  $+20^{\circ}\text{C}$ . Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

72. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны

значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,035$  Гн,  $C=2,5\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=50$  Гц. Данная цепь размещена в условиях окружающей среды при температуре  $+50^\circ\text{C}$ . Известно, что при изменении температуры окружающей среды меняется величина активного сопротивления. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока при сравнении заданной температуры с температурой  $+20^\circ\text{C}$ . Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня вводных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

73. Дана симметричная трехфазная цепь (резистор, катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно), где известны значения фазных ЭДС  $e_A(t)=100\sin(\omega t)$ , В;  $e_B(t)=100\sin(\omega t-120^\circ)$ , В;  $e_C(t)=100\sin(\omega t+120^\circ)$ , В; и величины сопротивления со стороны нагрузки  $R=15$  Ом,  $L=0,035$  Гн,  $C=2,5\cdot 10^{-6}$  Ф,  $f=50$  Гц. Данная цепь размещена в условиях окружающей среды при температуре  $+60^\circ\text{C}$ . Известно, что при изменении температуры окружающей среды меняется величина активного сопротивления. Необходимо выполнить расчет в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на всех элементах трехфазной цепи. Рекомендуется выполнение расчета по каждой фазе в отдельности. Необходимо вычислить нужные параметры и построить векторную диаграмму напряжений и тока при сравнении заданной температуры с температурой  $+20^\circ\text{C}$ . Расчеты по данной задаче должны быть проведены с применением следующих специализированных программ: MathCad 14 или MathCad 15 или PTC MathCad. Рекомендуется оформление

окончательного варианта данной задачи в формате DOC или RTF на персональном компьютере с обязательным указанием общей схемы, перечня входных данных, порядка вычисления параметров цепи и процедуры расчетов.

74. Построить оценочные характеристики в виде графиков в соответствии с полученными результатами по задачам 61...73 в зависимости от изменения температуры окружающей среды.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Уважаемый студент, Вы изучили учебное пособие в области электротехники и электроники в условиях Севера с учетом большинства существующих требований и стандартов. В настоящий момент Вы можете выполнить необходимые электротехнические расчеты в объектах, где применяются приемники переменного тока в трехфазной сети.

При составлении презентации или расчетов показателей технико-экономического обоснования объектов электроэнергетики рекомендуется применение лицензированных программ MS Office Power Point (для презентаций), Splan 7.0 (для составления электрических схем), MS Office Project или Gantt Project (для составления дорожных карт проектов) и др.

Желаю Вам успехов в учебной и рабочей деятельности в сфере электроэнергетики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Местников, Н. П. Общая энергетика : Учебно-методическое пособие: методические указания к выполнению лабораторных работ и самостоятельной работы студента / Н. П. Местников, А. М. Н. Альзаккар ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», Физико-технический институт Кафедра «Электроснабжение». – Якутск : ООО РИЦ "Офсет", 2021. – 80 с. – ISBN 978-5-91441-326-9. – EDN LUVGIK.
2. Местников, Н. П. Системы электроснабжения : Методические указания к выполнению курсовых проектов по дисциплине «Системы электроснабжения» / Н. П. Местников, Е. И. Малеева, П. Ф. Васильев ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», Физико-технический институт Кафедра «Электроснабжение». – Якутск : ООО РИЦ "Офсет", 2021. – 85 с. – ISBN 978-5-91441-332-0. – EDN NDAYLW.
3. Усольцев, А. А. Общая электротехника: Учебное пособие / А. А. Усольцев. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2009. – 302 с. – EDN ZUZEKZ. Условные графические обозначения на электрических принципиальных схемах. [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://studfile.net/preview/6467648/>
4. Электродвижущая сила (ЭДС) источника энергии. [Электронный ресурс]: режим доступа: <http://www.sxemotehnika.ru/elektrovdizhushchaia-sila-eds-istochnika-energii.html>
5. Местников, Н. П. Исследование технико-экономической эффективности гибридной электростанции малой мощности в условиях Севера и Арктики / Н. П. Местников, А. М. Н. Альзаккар // МНСК-2021 : Материалы 59-й Международной научной студенческой конференции, Новосибирск, 12–23 апреля 2021 года. – Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2021. – С. 83-84. – EDN DCLIAХ.

*Учебное издание*

**Местников Николай Петрович**

## **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

Учебное пособие  
по дисциплинам «Электротехника, электроника  
и электрооборудование», «Электротехника»,  
«Электротехника и электроника»

Часть 3

Учебное пособие

Выпускается в авторской редакции  
Оформление обложки *П.И. Антипин*

Дата подписания к использованию 20.04.2023. Электронное издание.

Объем 2,5 Мб. Тираж 10 дисков. Заказ № 120.

Минимальные системные требования:  
процессор с тактовой частотой 1,3 Гц и выше, оперативная память 128 Мб,  
операционные системы: Microsoft Windows XP/Vista/7/8/10,  
ОС MAC OS версии 10,8.

Издательский дом Северо-Восточного федерального университета,  
677891, г. Якутск, ул. Петровского, 5. E-mail: izdat-svfu@mail.ru  
Изготовлено с готового оригинал-макета в Издательском доме СВФУ