



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
**Рубцовский индустриальный институт (филиал)**  
федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»  
(РИИ АлтГТУ)

О.П. Балашов

## **Электроснабжение**

Методические указания к выполнению практических работ  
для студентов, обучающихся по направлению «Строительство»

Рубцовск 2017

УДК 621.31

Балашов О.П. Электроснабжение: Методические указания к выполнению практических работ для студентов, обучающихся по направлению «Строительство» / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2017 – 74 с.

В методических указаниях приводится содержание практических работ по дисциплине «Электроснабжение с основами электротехники» и методика их выполнения. Предназначены для студентов направления «Строительство».

Рассмотрены и одобрены  
на заседании кафедры  
электроэнергетики РИИ.  
Протокол № 13 от 22.12.2017.

Рецензент:  
к.т.н., доцент

А.А. Денисенко

© Рубцовский индустриальный институт, 2017

## Оглавление

1. Проектная документация.....	4
2. Электрические цепи постоянного тока .....	7
2.1 Преобразование схем замещения электрических цепей .....	7
2.2 Методы расчета линейных электрических цепей постоянного тока .....	9
2.2.1 Расчет разветвленной цепи постоянного тока с одним источником электрической энергии .....	10
2.2.2 Расчет разветвленных цепей с несколькими источниками электрической энергии.....	11
3. Электрические цепи переменного тока.....	17
3.1 Синусоидальный ток в последовательной цепи $R$ , $L$ и $C$ .....	18
3.2. Расчет цепи синусоидального тока при параллельном соединении элементов..	22
3.3. Комплексный метод расчета цепей переменного тока.....	24
4. Трехфазные электрические цепи .....	32
4.1. Расчет трехфазной цепи при соединении нагрузки в звезду .....	35
4.2 Расчет трехфазной цепи при соединении нагрузки в треугольник.....	40
5. Разработка и выбор схем электроснабжения.....	44
5.1 Расчет электрических нагрузок напряжением 1000 В.....	44
6. Расчет и выбор электродвигателей с учетом его нагрузочной характеристики..	50
6.1. Общие принципы.....	50
6.2. Определение мощности двигателя при различных режимах работы .....	50
7 Расчет и выбор аппаратов защиты и низковольтной сети .....	56
Список литературы.....	63
Приложение А.....	64
Приложение Б .....	67
Приложение В.....	69
Приложение Г .....	72

## 1. ПРОЕКТНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

Проектная документация — это совокупность текстовых и графических проектных документов, определяющих архитектурные, функционально-технологические, конструктивные и инженерно-технические решения, состав которых необходим для оценки соответствия принятых решений заданию на проектирование, требованиям законодательства, нормативным правовым актам, документам в области стандартизации.

Проектный документ — это составная часть проектной и/или рабочей документации, имеющая самостоятельное обозначение. К проектным документам относятся графические, текстовые и иные документы, требуемые при разработке проектной и рабочей документации, которые содержат необходимую информацию о здании или сооружении.

Текстовые документы — это текстовая часть проектной и/или рабочей документации, имеющая самостоятельное обозначение и содержащая в основном сплошной текст или текст, разбитый на графы.

К текстовым проектным документам относятся: пояснительная записка, текстовая часть разделов проектной документации, описывающая объект проектирования и обосновывающая проектные решения; спецификации оборудования, изделий и материалов; технические условия, отчеты по результатам инженерных изысканий и другие подобные технические документы.

Графические документы — это графическая часть проектной и/или рабочей документации, имеющая самостоятельное обозначение, отображающая принятые технические и иные решения, выполняемые в виде различных видов изображений.

К графическим документам относятся: графическая часть проектной документации, отображающая принятые технические и иные решения, выполняемые в форме различных видов изображений на чертежах (планы, разрезы, фасады, узлы), в виде схем, карт, электронных моделей, и основные комплекты рабочих чертежей.


Проектная документация состоит из текстовой части (пояснительной записки) и графической части (комплекта чертежей).

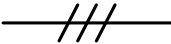

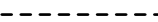
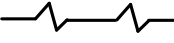
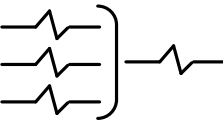
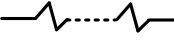
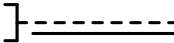
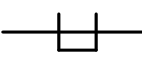
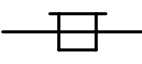

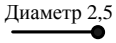


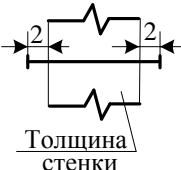



В состав электротехнических разделов проектной документации относят: «Электрооборудование», «Электроосвещение», «Электроснабжение» и «Наружное освещение». В таблице 1 и 2 приведены основные условные графические изображения электрооборудования и электропроводок.

Таблица 1 - Выдержки из ГОСТ 21.210-2014. Изображения условные графические электрооборудования на планах



Наименование	Изображение
<b>Электротехнические устройства и электроприемники</b>	
Устройство электротехническое (общее обозначение)	
Устройство электрическое, например, с электродвигателем	
Устройство с многодвигательным электроприводом	
Устройство с генератором	
Двигатель-генератор	
Комплектное трансформаторное устройство с одним трансформатором	
То же с несколькими трансформаторами	
Установка комплектная конденсаторная	
Установка комплектная преобразовательная	
Аккумуляторная батарея	
Устройство электронагревательное (общее обозначение)	

Таблица 2 - Выдержка из ГОСТ 21.210-2014. Изображения условные графические электрооборудования и проводок на планах

Наименование	Изображение	Размер, мм
<b>Линии проводок и токопроводов</b>		
Линия проводки (общее изображение)		Толщина 1,0
Допускается: указывать над изображением линии данные проводки (род тока, напряжение, материал, способ прокладки, отметка проводки и т. п.); количество проводников в линии указывать засечками		

Наименование	Изображение	Размер, мм
Примеры		То же
Цепь постоянного тока напряжением 110 В	<u>110В, в штрабе</u>	
Линия, состоящая из трех проводников		
Линия цепей управления		
Линия сети аварийного эвакуационного и охранного освещения		
<b>Прокладка проводов и кабелей</b>		
Открытая прокладка одного проводника		Толщина 1,0
Открытая прокладка нескольких проводников		
Открытая прокладка одного проводника под перекрытием		
Прокладка на тросе и его концевое крепление		
Прокладка в лотке		
Проводка в коробе		
Конец проводки кабеля		
Вертикальная проводка		
Проводка уходит на более высокую отметку или приходит с более высокой отметки		
Проводка в трубах (общее изображение)		
Проводка в патрубке через стену		
То же, сквозь перекрытие		
Прокладка шин и шинопроводов (общее изображение)		Толщина 2,0

Продолжение таблицы 2

Наименование	Изображение	Размер, мм
Шина, проложенная на изоляторах		Диаметр 5,0
Шины или шинопровод на стойках		Диаметр 4,0
То же на подвесах		
То же на кронштейнах		
Троллейная линия		
Секционирование троллейной линии		
Компенсатор шинный		Радиус 2,5
<b>Коробки, щитки, ящики с аппаратурой, шкафы, щиты, пульты</b>		
Коробка ответвительная		Диаметр 5,0
Коробка вводная		
Щиток магистральный рабочего освещения		
Щиток групповой рабочего освещения		
Щиток групповой аварийного освещения		

## 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 2.1 ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Преобразование схем замещения электрических цепей приводит к их упрощению и облегчению расчета. Различают последовательное, параллельное и смешанное соединение элементов схем.

Последовательное соединение резисторов обычно представляется одним эквивалентным резистором  $R_3$ , и для эквивалентной схемы замещения (рисунок 2.1,б) можно записать:  $R_3 = R_1 + R_2 + R_3$ .

Для  $n$  последовательно соединенных резисторов сопротивление эквивалентного резистора определяется как

$$R_3 = \sum_{\kappa=1}^n R_{\kappa}. \quad (2.1)$$

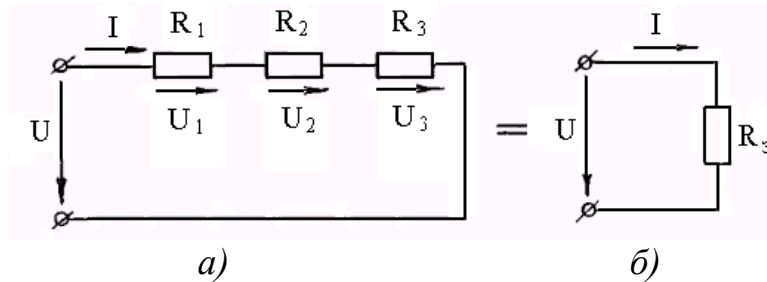


Рисунок 2.1 - Последовательное соединение элементов электрической цепи

Параллельное соединение резисторов характеризуется тем, что они находятся под одним напряжением  $U$  (рисунок 2.2,а).  $\frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$ .

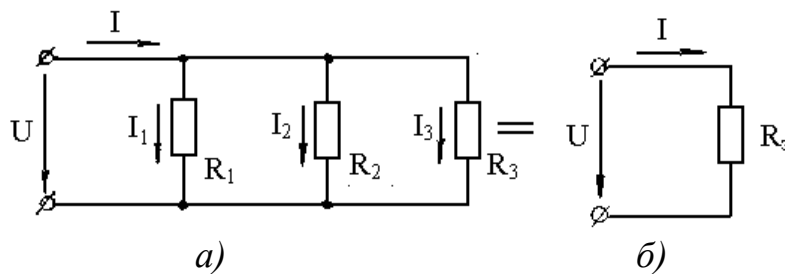


Рисунок 2.2 - Параллельное соединение резисторов

При параллельном соединении резисторов эквивалентная проводимость равна сумме проводимостей параллельных ветвей, т.е.

$$g_3 = g_1 + g_2 + g_3. \quad (2.2)$$

В случае  $n$  параллельно соединенных резисторов:

$$g_3 = \sum_{\kappa=1}^n g_{\kappa}, \quad (2.3)$$

а эквивалентное сопротивление цепи определится:

$$R_3 = \frac{1}{g_3}. \quad (2.4)$$

В случае двух параллельно соединенных резисторов (рисунок 2.3) можно записать:

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}. \quad (2.5)$$

Для исходной схемы (рисунок 2.3,а) приложенное напряжение определяется как  $U=I_1 R_1$ , а для эквивалентной:  $U=I R_3$ , т.е.

$$I_1 \cdot R_1 = I \cdot R_3, \text{ или } I_1 \cdot R_1 = I \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$



Откуда ток в одной из параллельных ветвей определится:

$$I_1 = \frac{I \cdot R_2}{R_1 + R_2}, \quad \text{или} \quad I_2 = \frac{I \cdot R_1}{R_1 + R_2}. \quad (2.6)$$

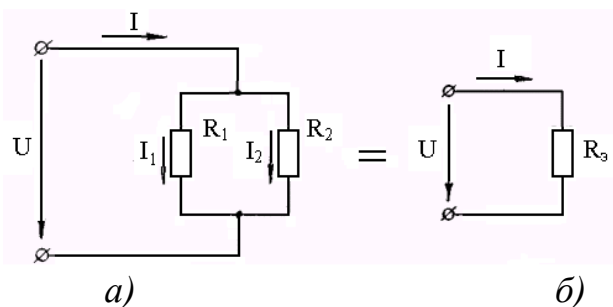


Рисунок 2.3 - Параллельное соединение двух резисторов

Для смешанного соединения резисторов характерно наличие участков с параллельным и последовательным соединением резисторов (рисунок 2.4).

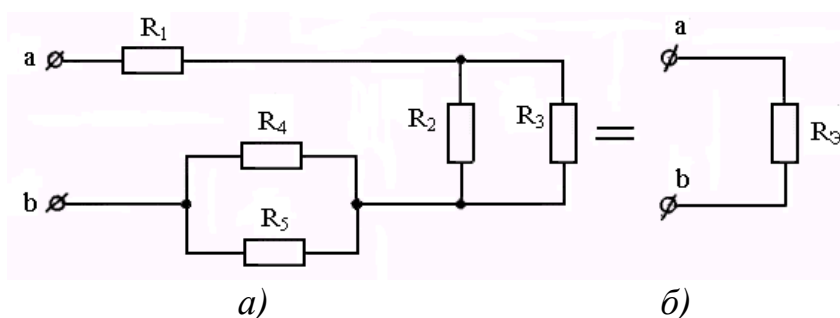


Рисунок 2.4 - Смешанное соединение резисторов

Для преобразования такого соединения до одного эквивалентного резистора  $R_3$ , сначала заменяют участки с параллельным соединением резисторов эквивалентными, а затем получающиеся последовательные. Для схемы (рисунок 2.4) можно записать:  $R_3 = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} + \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5}$ .

## 2.2 МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Расчет электрических цепей с источниками постоянного тока является самым простым анализом электрических цепей. Поэтому следует начать рассмотрение именно с них. К тому же методы расчета цепей постоянного тока могут быть перенесены на цепи с переменными напряжениями. Расчет электрической цепи обычно заключается в нахождении токов в ветвях при заданных значениях сопротивлений резисторов, известных ЭДС или токов источников тока.

## 2.2.1 РАСЧЕТ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Пример такой цепи представлен на рисунке 2.5,а. При расчете подобных цепей сначала преобразовывают всю пассивную часть схемы до одного эквивалентного резистора относительно зажимов источника ЭДС, а затем по закону Ома определяется ток через источник ЭДС и, при необходимости, токи в ветвях пассивной части схемы. Рассмотрим расчет цепи с одной ЭДС на конкретном примере.

**Пример 2.1.** Определить токи в ветвях схемы (рисунок 2.5,а), если  $E=10\text{ В}$ , а  $R_1=4\text{ Ом}$ ,  $R_2=10\text{ Ом}$ ,  $R_3=15\text{ Ом}$ .

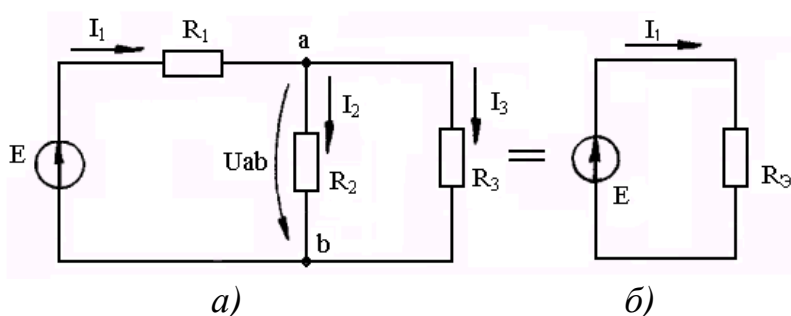


Рисунок 2.5 - Схема замещения электрической цепи с одним источником электрической энергии

**Решение.** Предварительно выбирают положительные направления токов в ветвях и проставляют стрелками на схеме. Так как в цепи действует одна ЭДС, то направление токов в ветвях очевидно, т.е. по направлению действия ЭДС. Затем преобразовывают пассивную часть схемы ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ) до эквивалентного резистора  $R_3$ , значение которого определится:

$$R_3 = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = 4 + \frac{10 \cdot 15}{10 + 15} = 4 + \frac{150}{25} = 4 + 6 = 10 \text{ Ом.}$$

По закону Ома определяется ток  $I_1$ :

$$I_1 = \frac{E}{R_3} = \frac{10}{10} = 1 \text{ А.}$$

Определяем ток  $I_2$ :

$$I_2 = \frac{I_1 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{1 \cdot 15}{10 + 15} = \frac{15}{25} = 0,6 \text{ А.}$$

Ток во второй параллельной ветви  $I_3$  можно определить аналогично:

$$I_3 = \frac{I_1 \cdot R_2}{R_2 + R_3} = \frac{1 \cdot 10}{10 + 15} = \frac{10}{25} = 0,4 \text{ А}$$

либо по первому закону Кирхгофа для узла  $a$ :

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0, \quad I_3 = I_1 - I_2 = 1 - 0,6 = 0,4 \text{ А.}$$

Токи в параллельных ветвях  $I_2$  и  $I_3$  можно найти и по-другому, определив предварительно напряжение  $U_{ab}$ :

$$U_{ab} = I_1 \cdot R_{ab} = I_1 \frac{R_3 \cdot R_2}{R_3 + R_2} = \frac{1 \cdot 15 \cdot 10}{15 + 10} = \frac{150}{25} = 6 \text{ В},$$

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2} = \frac{6}{10} = 0,6 \text{ А}, \quad I_3 = \frac{U_{ab}}{R_3} = \frac{6}{15} = 0,4 \text{ А}.$$

Напряжение  $U_{ab}$  можно было бы определить и из уравнения по второму закону Кирхгофа для левого контура схемы рисунка 2.5,а:

$$I_1 \cdot R_1 + U_{ab} = E, \quad U_{ab} = E - I_1 \cdot R_1 = 10 - 1 \cdot 4 = 6 \text{ В}.$$

## 2.2.2 РАСЧЕТ РАЗВЕТВЛЕННЫХ ЦЕПЕЙ С НЕСКОЛЬКИМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Расчет цепей производится либо путем составления системы уравнений электрического равновесия на основании законов Кирхгофа и последующего решения этой системы, либо с помощью специально разработанных методов расчета, например метода контурных токов.

**1. Метод уравнений Кирхгофа.** Метод основан на составлении системы уравнений для рассматриваемой цепи по первому и второму законам Кирхгофа. При этом количество уравнений в системе равно числу неизвестных токов, т.е. числу ветвей схемы.

Сначала составляются уравнения по первому закону Кирхгофа, число этих уравнений должно быть на единицу меньше числа узлов рассматриваемой цепи. Оставшиеся уравнения системы составляются по второму закону Кирхгофа. Количество этих уравнений определяется числом ветвей (неизвестных токов) за вычетом числа уравнений, составленных ранее по первому закону Кирхгофа. При этом уравнения составляются для независимых контуров. *Независимый контур – контур, отличающийся от ранее рассмотренных хотя бы одним элементом цепи.*

Перед расчетом необходимо выбрать произвольно положительные направления токов в ветвях и на схеме проставить стрелки, указывающие эти направления. Если в результате решения системы уравнений ток в ветви получился отрицательным, то это означает, что направление тока в этой ветви противоположно тому, как это показано стрелкой на схеме.

Составим систему уравнений Кирхгофа для расчета цепи, изображенной на рисунке 2.6. Так как в цепи четыре узла, то по первому закону следует составить уравнения для любых трех узлов. Допустим, для узлов  $A$ ,  $B$ ,  $C$ :

$$\begin{aligned} I_6 - I_4 - I_1 &= 0, \\ I_1 - I_2 + I_3 &= 0, \\ I_4 + I_2 + I_5 &= 0. \end{aligned} \tag{2.7}$$

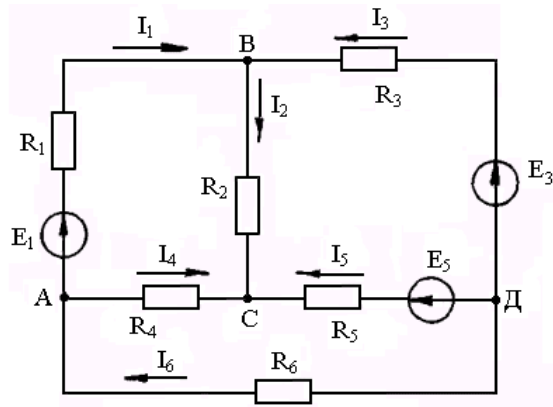


Рисунок 2.6 - К расчету методом уравнений Кирхгофа

Цепь содержит шесть ветвей (шесть неизвестных токов). Таким образом, три недостающих уравнения составляются по второму закону Кирхгофа. В этой схеме только три независимых контура. Уравнения для контуров ABCA, ВСДВ, АВДА:

$$\begin{aligned} I_1 R_1 + I_2 R_2 - I_4 R_4 &= E_1, \\ I_2 R_2 - I_5 R_5 + I_3 R_3 &= E_3 - E_5, \\ I_1 R_1 - I_3 R_3 + I_6 R_6 &= E_1 - E_3. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Если заданы значения сопротивлений всех резисторов и ЭДС, то совместное решение системы из шести составленных уравнений (2.7 и 2.8) позволит найти все шесть неизвестных токов.

**2. Метод контурных токов.** В этом методе считают, что в каждом независимом контуре сложной цепи протекает свой условный контурный ток. А система уравнений составляется не для действительных токов в ветвях, а относительно новых неизвестных – контурных токов. Это позволит сократить число неизвестных токов, а следовательно, уменьшить количество расчетных уравнений до числа независимых контуров.

То есть если в схеме (рисунок 2.6) задача определения токов по методу уравнений Кирхгофа сводится к решению системы из шести уравнений, то по методу контурных токов достаточно решить систему из трех уравнений.

После определения контурных токов находят действительные токи в ветвях, путем составления простых соотношений, в которых токи в ветвях выражаются через контурные токи.

Рассмотрим такой расчет токов согласно схеме (рисунок 2.7), в которой известны значения сопротивлений резисторов и ЭДС.

Сначала выбирают и проставляются на схеме стрелками положительные направления токов в ветвях и направление контурных токов  $I_{11}$ ,  $I_{22}$  и  $I_{33}$  (дугowymi стрелками), а затем составляются уравнения для контурных токов. Структура записи этих уравнений следующая.

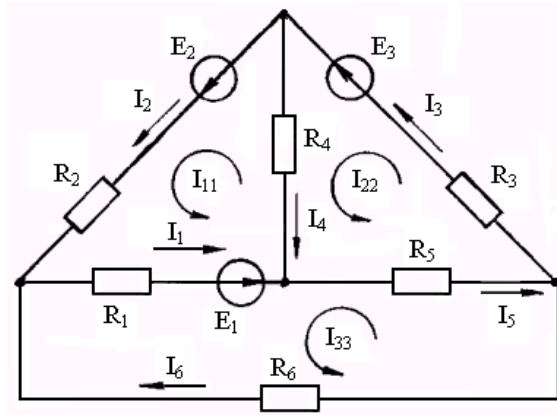


Рисунок 2.7 - Иллюстрация к методу контурных токов

Если контурные токи направить в одном направлении, то в уравнении для контура в левой части его записывается со знаком «плюс» произведение контурного тока на сумму сопротивлений резисторов этого контура и со знаком «минус» произведения соседних контурных токов на смежные сопротивления между этими контурами. В правой части уравнения записывается алгебраическая сумма ЭДС, действующих в рассматриваемом контуре. Со знаком «плюс» записываются ЭДС, направление действия которых совпадает с выбранным направлением контурного тока. Если ЭДС направлена противоположно контурному току, то ее записывают со знаком «минус».

Для схемы замещения (рисунок 2.7) электрической цепи выражения для контурных токов запишутся:

$$\begin{aligned} I_{11}(R_1 + R_2 + R_4) - I_{22} \cdot R_4 - I_{33} \cdot R_1 &= E_2 + E_1, \\ I_{22}(R_3 + R_4 + R_5) - I_{11} \cdot R_4 - I_{33} \cdot R_5 &= E_3, \\ I_{33}(R_1 + R_5 + R_6) - I_{22} \cdot R_5 - I_{11} \cdot R_1 &= -E_1. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Решая систему уравнений (2.9), определяют контурные токи  $I_{11}$ ,  $I_{22}$ ,  $I_{33}$ .

Действительные токи в ветвях определяют следующим образом. Токи в крайних ветвях схемы равны соответствующим контурным, а в смежных ветвях – алгебраической сумме контурных. При составлении уравнения для тока в смежной ветви с плюсом берется контурный ток, совпадающий по направлению с действительным током в этой ветви. Таким образом, токи в ветвях схемы (рисунок 2.7) определяются:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{11} - I_{33}, \quad I_2 = I_{11}, \quad I_3 = I_{22}, \\ I_4 &= I_{22} - I_{11}, \quad I_5 = I_{22} - I_{33}, \quad I_6 = -I_{33}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Рассмотрим применение метода контурных токов на конкретном примере.

**Пример 2.2.** В схеме замещения цепи постоянного тока (рисунок 2.8) ЭДС источников  $E_2=36,25 \text{ В}$ ,  $E_3=37,5 \text{ В}$ , сопротивления резисторов  $R_1=15 \text{ Ом}$ ,  $R_2=12,5 \text{ Ом}$ ,  $R_3=20 \text{ Ом}$ ,  $R_4=100 \text{ Ом}$ ,  $R_5=175 \text{ Ом}$ ,  $R_6=300 \text{ Ом}$ . Рассчитать токи методом контурных токов.

**Решение.** Выбираем произвольно направление токов в ветвях и проставляем стрелками на схеме.

В схеме три независимых контура, поэтому будет три контурных тока  $I_{11}$ ,  $I_{22}$ ,  $I_{33}$ . Направим их в контурах одинаково, против часовой стрелки, и в соответствии с (2.9) составляем систему уравнений для контурных токов:

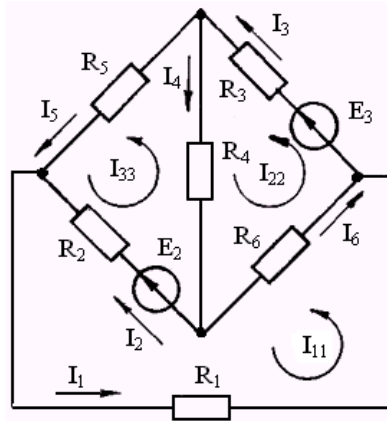


Рисунок 2.8 - Схема замещения цепи для расчета методом контурных токов

$$I_{11}(R_1 + R_2 + R_6) - I_{22}R_6 - I_{33}R_2 = E_2,$$

$$I_{22}(R_3 + R_4 + R_6) - I_{11}R_6 - I_{33}R_4 = E_3,$$

$$I_{33}(R_2 + R_4 + R_5) - I_{22}R_4 - I_{11}R_2 = -E_2.$$

Подставляя числовые значения, будем иметь:

$$327,5I_{11} - 300I_{22} - 12,5I_{33} = 36,25 ,$$

$$- 300I_{11} + 420I_{22} - 100I_{33} = 37,5 ,$$

$$- 12,5I_{11} - 100I_{22} + 287,5I_{33} = -36,25 .$$

Решаем полученную систему уравнений методом последовательного исключения неизвестных.

Выразим из первого уравнения ток  $I_{11}$ :

$$I_{11} = \frac{36,25 + 300I_{22} + 12,5I_{33}}{327,5}$$

и, подставив во второе уравнение, получим:

$$\frac{- 300(36,25 + 300I_{22} + 12,5I_{33})}{327,5} + 420I_{22} - 100I_{33} = 37,5,$$

$$- 33,206 - 274,809I_{22} - 11,45I_{33} + 420I_{22} - 100I_{33} = 37,5,$$

$$145,191I_{22} - 111,45I_{33} = 70,706 ,$$

$$I_{22} = \frac{70,706 + 111,45I_{33}}{145,191} = 0,487 + 0,7676I_{33}.$$

Выразим ток  $I_{11}$  через ток  $I_{33}$ :

$$I_{11} = \frac{36,25 + 300(0,487 + 0,7676I_{33}) + 12,5I_{33}}{327,5} = \frac{36,25 + 146,1 + 242,78I_{33}}{327,5} =$$

$$= 0,7413I_{33} + 0,5568.$$

Подставив в третье уравнение системы выражения для токов  $I_{11}$  и  $I_{22}$ , определим ток  $I_{33}$ :

$$-12,5(0,7413I_{33} + 0,5568) - 100(0,487 + 0,7676I_{33}) + 287,5I_{33} = -36,25,$$

$$-9,26625I_{33} - 6,96 - 48,7 - 76,76I_{33} + 287,5I_{33} = -36,25,$$

$$201,4737I_{33} = 19,41,$$

$$I_{33} = \frac{19,41}{201,4737} = 0,09634 \text{ A.}$$

Подстановка значения тока  $I_{33}$  в выражения для токов  $I_{11}$  и  $I_{22}$  через  $I_{33}$  позволяет определить эти токи:

$$I_{11} = 0,7413I_{33} + 0,5568 = 0,7413 \cdot 0,09634 + 0,5568 = 0,62821 \text{ A},$$

$$I_{22} = 0,487 + 0,7676I_{33} = 0,487 + 0,7676 \cdot 0,09634 = 0,56095 \text{ A}.$$

Определим действительные токи в ветвях системы. Токи во внешних ветвях равны соответствующим контурным:

$I_1 = I_{11} = 0,62821 \text{ A}$ ,  $I_3 = I_{22} = 0,56095 \text{ A}$ ,  $I_5 = I_{33} = 0,09634 \text{ A}$ , а токи в смежных ветвях определяются алгебраическим суммированием контурных:

$$I_2 = I_{11} - I_{33} = 0,62821 - 0,09634 = 0,53187 \text{ A},$$

$$I_4 = I_{22} - I_{33} = 0,56095 - 0,09634 = 0,46461 \text{ A},$$

$$I_6 = I_{22} - I_{11} = 0,56095 - 0,62821 = -0,06726 \text{ A}.$$

Ток  $I_6$  в результате расчета получился отрицательным. Это означает, что в действительности ток в шестой ветви протекает противоположно направлению, указанному стрелкой на схеме (рисунок 2.8).

**3. Потенциальная диаграмма.** Под потенциальной диаграммой понимают график распределения потенциала вдоль любого замкнутого контура разветвленной электрической цепи. При этом по оси ординат откладывают потенциалы точек, а по оси абсцисс – сопротивления резисторов в той последовательности, в которой они встречаются при обходе контура, начиная с произвольной точки, потенциал которой принимают за нуль и помещают в начало координат потенциальной диаграммы.

Каждой точке контура соответствует своя точка на потенциальной диаграмме. Точки на потенциальной диаграмме соединяются отрезками.

Рассмотрим последовательность построения потенциальной диаграммы, используя результаты расчета примера 2.2.

**Пример 2.3.** Построить потенциальную диаграмму для контура АФВСКДА (рисунок 2.9).

**Решение.** Обход контура начнем с точки А. При заземлении этой точки потенциал ее становится равным нулю.

Определяем потенциалы оставшихся точек контура (обход контура производим по часовой стрелке), учитывая при этом, что ток во внешней цепи течет от точек высшего потенциала к точкам низшего потенциала, а во внутренней цепи (через источник ЭДС) наоборот – от точек низшего потенциала к точкам высшего потенциала.

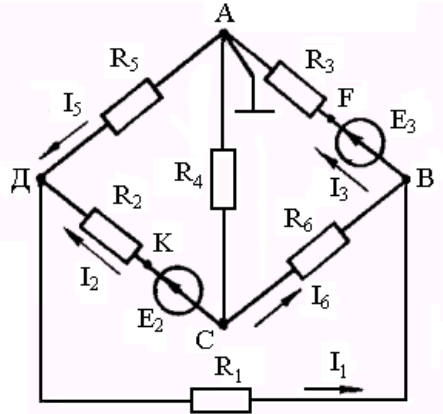


Рисунок 2.9 - Схема замещения электрической цепи

При переходе от точки  $A$  к точке  $F$  (рисунок 2.9) проходим через резистор  $R_3$ , падение напряжения на котором  $I_3 R_3$ . Потенциал точки  $F$  выше потенциала точки  $A$  на эту величину, так как ток  $I_3$  течет от точки  $F$  к точке  $A$ , поэтому:

$$\varphi_F - \varphi_A = I_3 R_3, \text{ откуда}$$

$$\varphi_F = \varphi_A + I_3 R_3 = 0 + 0,56095 \cdot 20 = 11,219 \text{ В.}$$

Между точками  $F$  и  $B$  действует ЭДС  $E_3$  напротив обхода контура, поэтому при переходе от точки  $F$  к точке  $B$  потенциал понижается на величину этой ЭДС:

$$\varphi_B = \varphi_F - E_3 = 11,219 - 37,5 = -26,281 \text{ В.}$$

Потенциал точки  $C$  выше потенциала  $B$  на величину падения напряжения на резисторе  $R_6$ , так как ток направлен от точки  $C$  к точке  $B$ :

$$\varphi_C = \varphi_B + I_6 R_6 = -26,281 + (-0,06726) \cdot 300 = -46,459 \text{ В.}$$

Потенциал точки  $K$  больше на величину ЭДС  $E_2$ , так как она действует согласно с направлением обхода:

$$\varphi_K = \varphi_C + E_2 = -46,459 + 36,25 = -10,2089 \text{ В.}$$

Аналогично определяются потенциалы точек  $D$  и  $A$ :

$$\varphi_D = \varphi_K - I_2 R_2 = -10,2089 - 0,53187 \cdot 12,5 = -16,857 \text{ В,}$$

$$\varphi_A = \varphi_D + I_5 R_5 = -16,857 + 0,09634 \cdot 175 = 0,0021 \approx 0.$$

Таким образом, закончив обход, вернулись в исходную точку  $A$ , потенциал которой принят равным нулю.

При построении потенциальной диаграммы (рисунок 2.10) выбираем масштаб по оси сопротивлений  $m_R = 50 \text{ Ом/см}$ , а масштаб по оси потенциалов принимаем  $m_\varphi = 5 \text{ В/см}$ .



Практическая значимость потенциальной диаграммы заключается в том, что она позволяет графически определить напряжение между двумя любыми точками схемы. Это напряжение равно длине отрезка по вертикали между этими точками на потенциальной диаграмме, умноженной на масштаб по напряжению  $m_\phi$ .

Допустим, если необходимо найти напряжение между точками  $A$  и  $C$  схемы (рисунок 2.9), то длина отрезка между этими точками на потенциальной диаграмме  $l_{AC}=9,3$  см (рисунок 2.10), а величина напряжения:

$$U_{AC} = l_{AC} \cdot m_\phi = 9,3 \cdot 5 = 46,5 \text{ В.}$$

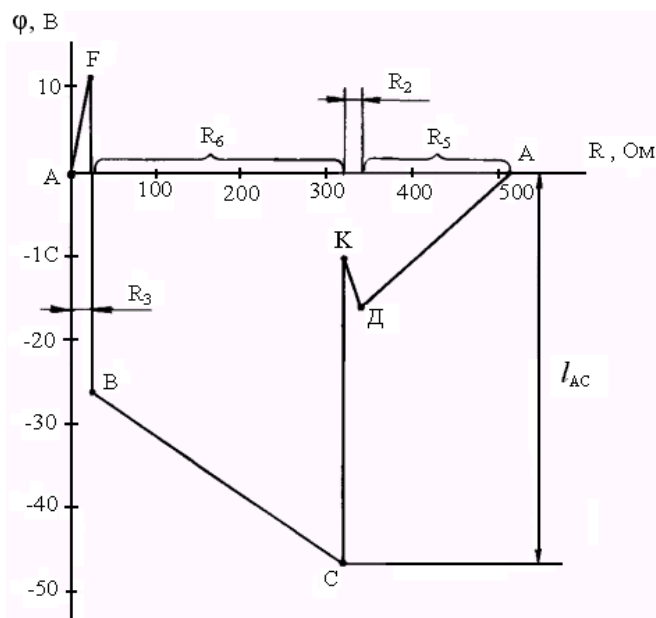


Рисунок 2.10 - Потенциальная диаграмма

Величину этого напряжения можно для проверки определить из второго закона Кирхгофа:

$$U_{AC} + I_6 R_6 + I_3 R_3 = E_3,$$

$$\text{откуда } U_{AC} = E_3 - I_3 R_3 - I_6 R_6 = 37,5 - 0,56095 \cdot 20 - (-0,06726) \cdot 300 = 46,46 \text{ В.}$$

### 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

При рассмотрении процессов, протекающих в электрических сетях переменного тока, основные законы электротехники, закон Ома и законы Кирхгофа для цепей постоянного тока могут быть применены и для мгновенных значений переменных электрических величин на том основании, что для бесконечно малых промежутков времени мгновенное значение можно считать величиной постоянной. Поэтому для мгновенных значений в цепях синусоидального тока законы Ома и Кирхгофа могут быть представлены аналогами:

$$i = \frac{u}{R}; \tag{3.1}$$

$$\sum_{\kappa=1}^n i_{\kappa} = 0; \quad (3.2)$$

$$\sum_{\kappa=1}^n u_{\kappa} = \sum_{\kappa=1}^n e_{\kappa}. \quad (3.3)$$

Мгновенная мощность:

$$p = u \cdot i. \quad (3.4)$$

Рассмотрим примеры анализа схем с различными элементами электрической цепи.

### 3.1 СИНУСОИДАЛЬНЫЙ ТОК В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ $R, L$ И $C$

Пусть в цепи с последовательным соединением  $R, L$  и  $C$ , (рисунок 3.1) протекает синусоидальный ток  $i = I_m \sin \omega \cdot t$  и необходимо найти действующее значение приложенного напряжения  $U$ .

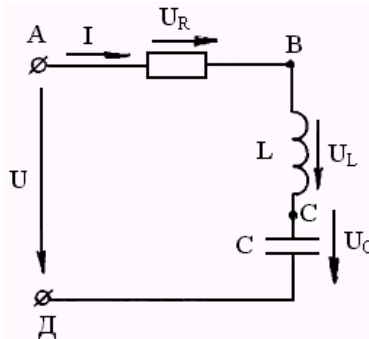


Рисунок 3.1 - Последовательное соединение  $R, L, C$  элементов

Протекающий в цепи ток  $I$  вызывает падения напряжений на этих элементах определяются:

$$U_R = I \cdot R, \quad U_L = I \cdot X_L = I \omega \cdot L, \quad U_C = I \cdot X_C = I \frac{1}{\omega \cdot C}. \quad (3.5)$$

Решение задачи проводим с помощью векторной диаграммы. Чаще строят топографические векторные диаграммы напряжений, которые *отличаются от векторных тем, что расположение векторов напряжений на ней строго соответствует расположению элементов на схеме*. При этом каждая точка диаграммы соответствует определенной точке схемы. Для последовательного соединения начинают построение диаграммы с вектора тока, так как он является общим для всех элементов цепи, располагая его для удобства горизонтально или вертикально.

Строим топографическую векторную диаграмму для схемы рисунка 3.1 (рисунок 3.2) следующим образом. Из точки  $A$  откладываем вектор тока, равный в масштабе тока действующему значению его. Вектор падения напряжения на активном сопротивлении  $U_R$  откладываем из точки  $A$ , совпадающий по фазе с током.

Вектор  $U_L$ , изображающий напряжение на индуктивном элементе, откладываем из конца вектора  $U_R$  (точка  $B$ ) вверх, так как напряжение на индуктивном элементе опережает ток на угол  $\pi/2$ . Из точки  $C$  откладывается вниз вектор  $U_C$ , изображающий напряжение на емкостном элементе, так как напряжение на нем отстает от тока на угол  $\pi/2$ . Между точками  $A$  и  $D$  располагается вектор приложенного напряжения  $U$ .

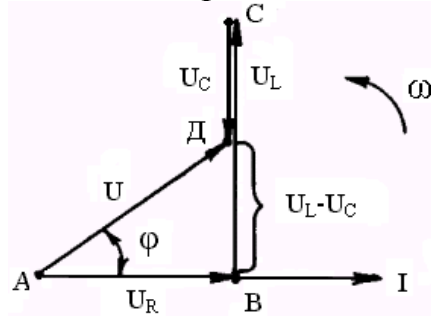


Рисунок 3.2 - Топографическая векторная диаграмма последовательной цепи  $R, L, C$

Рассматривая так называемый треугольник напряжений  $ABD$ , можно записать:

$$U^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2, \quad \text{или} \quad U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}. \quad (3.6)$$

Если в выражение (3.6) подставить напряжения из формулы (3.5), то получим:

$$U = \sqrt{(I \cdot R)^2 + (I \cdot X_L - I \cdot X_C)^2} = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = I \sqrt{R^2 + X^2} = I \cdot Z, \quad (3.7)$$

где  $X = X_L - X_C$  – реактивное сопротивление цепи, а

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$$

называют полным сопротивлением цепи.

Выражение (3.7) по форме похоже на закон Ома, т.е. действующее значение тока в цепи (рисунок 3.1) равно действующему значению приложенного напряжения, деленному на полное сопротивление цепи.

Угол сдвига фаз между током в цепи и приложенным напряжением из векторной диаграммы (рисунок 3.2) определится:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R}, \quad \text{или}$$

$$\begin{aligned} \varphi &= \operatorname{arctg} \frac{U_L - U_C}{U_R} = \operatorname{arctg} \frac{I \cdot X_L - I \cdot X_C}{I \cdot R} = \operatorname{arctg} \frac{X_L - X_C}{R} = \operatorname{arctg} \frac{\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}}{R} = \\ &= \operatorname{arctg} \frac{X}{R}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Отсюда видно, что угол  $\varphi$  не зависит от приложенного напряжения, а зависит от соотношения сопротивлений отдельных элементов цепи.

Из формулы (3.8) следует, что при  $X_L > X_C$  в цепи преобладает индуктивное сопротивление, а угол сдвига фаз  $\varphi > 0$ , так как  $U_L > U_C$  и приложенное напряжение опережает ток (рисунок 3.22) по фазе. Если в цепи преобладает емкостное сопротивление ( $X_L < X_C$ ), то цепь имеет емкостный характер и угол сдвига фаз  $\varphi < 0$ , а ток в цепи опережает приложенное напряжение, так как  $U_C > U_L$  (рисунок 3.2). При  $X_L = X_C$  цепь носит чисто активный характер ( $Z=R$ ) и в ней наблюдается режим резонанса. Величину

$$U_R = I \cdot R = U \cdot \cos \varphi = U_a \quad (3.9)$$

называют *активной составляющей напряжения*, совпадающей по фазе с током, а величину

$$U_L - U_C = I(X_L - X_C) = I \cdot X = U \cdot \sin \varphi = U_p \quad (3.10)$$

называют *реактивной составляющей напряжения*, сдвинутой по фазе относительно тока на угол  $\pi/2$ .

Из треугольника напряжений следует, что приложенное к цепи напряжение определяется:

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}, \quad (3.11)$$

а второй закон Кирхгофа выполняется для действующих значений напряжений, но только при геометрическом сложении их изображающих векторов, т.е.:

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C. \quad (3.12)$$

Если поделить все стороны треугольника напряжений АДВ (рисунок 3.2) на ток, то получим треугольник сопротивлений (рисунок 3.3), из которого можно получить следующие соотношения:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R} = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}}{R}, \quad \sin \varphi = \frac{X}{Z}, \quad \cos \varphi = \frac{R}{Z}, \quad (3.13)$$

которые используются в практических расчетах.

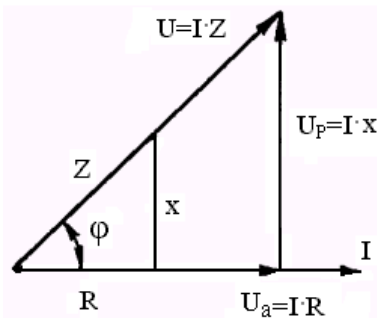


Рисунок 3.3 - Треугольник сопротивлений

Постоянный ток можно считать частным случаем переменного, когда период  $T = \infty$ , а частота равна нулю  $\left(f = \frac{1}{T} = 0\right)$ . Сопротивление индуктивного элемента на

постоянном токе  $X_L = \omega \cdot L = 2\pi fL = 0$ , а емкостного  $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi fC} = \infty$ . Таким образом, индуктивный элемент не оказывает сопротивления постоянному току, а емкостный элемент ведет себя как разрыв, т.е. постоянный ток не течет через него. По этой причине в схемах замещения на постоянном токе нет смысла учитывать эти элементы.

При расчете цепей переменного тока можно использовать замену нескольких последовательно соединенных элементов одним эквивалентным, имеющим активную составляющую сопротивления  $R_s$  и реактивную составляющую  $X_s$ .

Общее активное сопротивление  $R_s$  равно арифметической сумме активных сопротивлений заменяемой последовательной цепи, т.е.:

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3.$$

Эквивалентное реактивное сопротивление  $X_s$  равно алгебраической сумме реактивных сопротивлений, в которой емкостные сопротивления входят со знаком «минус»:

$$X_s = X_{L1} - X_C + X_{L2}.$$

В случае замены « $n$ » последовательно соединенных элементов эквивалентным полное сопротивление запишется:

$$Z = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^n R_k\right)^2 + \left(\sum_{k=1}^n X_k\right)^2}. \quad (3.14)$$

Активная и реактивная составляющие напряжения определяются формулами:

$$U_a = \sum_{k=1}^n U_{Rk}, \quad U_p = \sum_{k=1}^n U_{Xk}.$$

При этом напряжения на емкостных элементах входят с отрицательным знаком.

**Пример 3.1.** Для цепи (рисунок 3.4) определить ток в цепи, угол сдвига фаз между током и напряжением, активную, реактивную и полную мощности цепи, если  $U = 220$  В,  $R_1 = 3$  Ом,  $X_{L1} = 11$  Ом,  $R_2 = 4$  Ом,  $X_C = 3$  Ом,  $X_{L2} = 7$  Ом,  $R_3 = 5$  Ом.

**Решение.** Определяем полное сопротивление цепи:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(R_1 + R_2 + R_3)^2 + (X_{L1} + X_{L2} - X_C)^2} = \sqrt{12^2 + 14^2} = 18,44 \text{ Ом}.$$

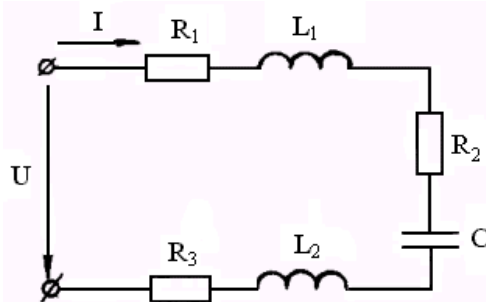


Рисунок 3.4 - К расчету последовательной цепи

Действующее значение тока в цепи:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{18,44} = 11,93 \text{ А,}$$

а угол сдвига фаз его относительно напряжения определится:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R} = \operatorname{arctg} \frac{14}{12} = \operatorname{arctg} 1,167 = 49,4^\circ.$$

Мощности в цепи:

$$P = UI \cos \varphi = 220 \cdot 11,93 \cdot \cos 49,4^\circ = 1708 \text{ Вт,}$$

$$Q = UI \sin \varphi = 220 \cdot 11,93 \cdot \sin 49,4^\circ = 1992,8 \text{ вар,}$$

$$S = UI = 220 \cdot 11,93 = 2624,6 \text{ ВА.}$$

### 3.2. РАСЧЕТ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ

Расчет цепей переменного тока с параллельным соединением элементов, как правило, проводят через проводимости. В цепях переменного тока вводят понятие активной, реактивной и полной проводимостей. На рисунке 3.5 изображена цепь  $R, L$  и ее векторная диаграмма.

Действующее значение тока в такой цепи определяется выражением

$$I = \frac{U}{Z} = yU. \quad (3.15)$$

Величину, обратную полному сопротивлению цепи, называют *полной проводимостью*, т.е.

$$y = \frac{1}{Z}. \quad (3.16)$$

Ток в любой ветви можно рассматривать состоящим из двух составляющих: активной  $I_a$  (рисунок 3.5,б), совпадающей по фазе с напряжением, и реактивной  $I_p$ , сдвинутой по отношению к напряжению на угол  $\pi/2$ .

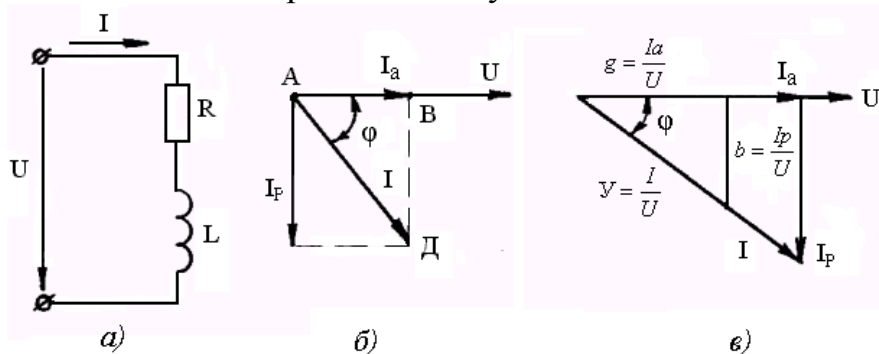


Рисунок 3.5 - Цепь  $R, L$  и ее векторная диаграмма

Активная составляющая тока из векторной диаграммы (рисунок 3.5,б) определится:

$$I_a = I \cdot \cos \varphi = \frac{U}{Z} \cos \varphi.$$

Если в это выражение подставить равенство  $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$ , то получим:

$$I_a = \frac{U}{Z} \cdot \frac{R}{Z} = U \frac{R}{Z^2} = U \cdot g, \quad (3.17)$$

где величина

$$g = \frac{R}{Z^2} \quad (3.18)$$

называется *активной проводимостью* ветви (цепи).

Аналогично можно записать выражения для реактивной составляющей тока:

$$I_p = I \cdot \sin \varphi = \frac{U}{Z} \sin \varphi = \frac{U}{Z} \frac{X}{Z} = U \frac{X}{Z^2} = U \cdot b. \quad (3.19)$$

В этом выражении величину

$$b = \frac{X}{Z^2} \quad (3.20)$$

называют *реактивной проводимостью* ветви (цепи).

Если все стороны треугольника токов АД (рисунок 3.5,б) поделить на напряжение  $U$ , то получится треугольник проводимостей с катетами  $b$  и  $g$  и гипотенузой  $y$  (рисунок 3.5,в). Из этого треугольника следуют соотношения:

$$g = y \cos \varphi, \quad b = y \sin \varphi, \quad y = \sqrt{g^2 + b^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{b}{g}. \quad (3.21)$$

Если ветвь содержит  $R$  и  $C$ , то соотношения (3.15) - (3.21) будут справедливы и для этой цепи, только треугольник проводимостей окажется перевернутым, так как в ней ток  $I$  будет опережать приложенное напряжение  $U$  на угол  $\varphi$ .

**Параллельное соединение элементов.** Пусть в цепи (рисунок 3.6,а) по известным действующему значению приложенного напряжения  $U$  и параметрам цепи  $R_1, R_2, L, C$  необходимо определить токи.

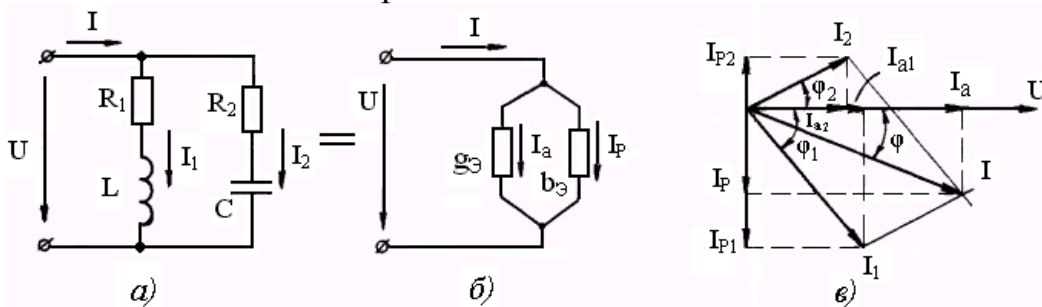


Рисунок 3.6 - Параллельное соединение элементов и его векторная диаграмма

Построим векторную диаграмму. При параллельном соединении построение диаграммы удобнее начинать с вектора приложенного напряжения, отложив его, допустим, горизонтально (рисунок 3.6,в).

Затем откладываются векторы токов параллельных ветвей, значения которых можно определить из соотношений:

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + (\omega \cdot L)^2}}, \quad I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{U}{\sqrt{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}},$$

так как эти ветви находятся под одним напряжением, а углы сдвига фаз их относительно напряжения будут:

$$\varphi_1 = \arctg \frac{\omega L}{R_1}, \quad \varphi_2 = \arctg \frac{1}{\omega \cdot C \cdot R_2}.$$

Ток  $I$  в неразветвленной части цепи определится как геометрическая сумма токов параллельных ветвей.

Если разложить полученные токи на активную и реактивную составляющие, то можно записать:

$$\begin{aligned} I_a &= I \cos \varphi = I_{a1} + I_{a2} = g_1 U + g_2 U = (g_1 + g_2) U, \\ I_p &= I \sin \varphi = I_{p1} - I_{p2} = b_1 U - b_2 U = (b_1 - b_2) U. \end{aligned} \quad (3.22)$$

Очевидно, что и параллельно соединенные ветви можно заменить одной эквивалентной с параметрами  $g_3$  и  $b_3$  (рисунок 3.6,б), для которой можно записать:

$$I_a = g_3 U, \quad I_p = b_3 U.$$

Следовательно, при замене параллельных ветвей эквивалентной ее активная проводимость *равна арифметической сумме активных проводимостей параллельных ветвей*, а реактивная – *алгебраической сумме реактивных проводимостей ветвей*, емкостные проводимости входят с отрицательным знаком, т.е.:

$$\begin{aligned} g_3 &= g_1 + g_2, \\ b_3 &= b_1 - b_2. \end{aligned} \quad (3.23)$$

В случае « $n$ » параллельных ветвей полная проводимость цепи и угол сдвига фаз между током на входе цепи и приложенным напряжением запишутся:

$$\begin{aligned} y &= \sqrt{\left(\sum_{\kappa=1}^n g_{\kappa}\right)^2 + \left(\sum_{\kappa=1}^n b_{\kappa}\right)^2}, \\ \varphi &= \arctg \frac{\sum_{\kappa=1}^n b_{\kappa}}{\sum_{\kappa=1}^n g_{\kappa}}. \end{aligned} \quad (3.24)$$

### 3.3. КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Сложность расчета разветвленных цепей переменного тока обусловлена тем, что необходимо находить не только абсолютные значения электрических величин, но и углы сдвига фаз между ними. Облегчение решения задач построением векторных диаграмм не обеспечивает необходимую точность решения, поэтому



используется комплексный метод расчета, который сочетает в себе наглядность векторных диаграмм и обеспечивает желаемую степень точности расчетов.

Комплексный метод основан на формальном изображении синусоидальных электрических величин комплексными числами (символами), что позволяет свести задачу расчета разветвленной цепи к решению алгебраических уравнений в комплексном виде и использовать при этом известные приемы расчета цепей постоянного тока.

**1. Комплексные числа.** Комплексным числом принято называть сумму вида:

$$\underline{C} = A + jB, \quad (3.25)$$

где  $A$  – действительная (вещественная) часть комплексного числа,  $jB$  – мнимая часть комплексного числа,  $j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица (в электротехнике, в отличие от математики, не используют обозначение  $i = \sqrt{-1}$  с целью исключения путаницы с обозначением мгновенного значения тока).

Символ, обозначающий комплексное число, в соответствии с ГОСТ 1494-77 подчеркивается снизу чертой.

Вещественную часть комплексного числа кратко записывают как  $A = \text{Re } \underline{C}$  (от латинского слова *Realis* – вещественный), а мнимую –  $B = \text{Im } \underline{C}$  (от латинского слова *Imaginaris* – мнимый).

Выражение (3.25) называют алгебраической формой записи комплексного числа.

Комплексные числа графически изображают точками на комплексной плоскости (рисунок 3.7,а). По горизонтальной оси (ось действительных чисел) от начала координат откладывается действительная часть комплексного числа, а по вертикальной (ось мнимых чисел) – мнимая часть.

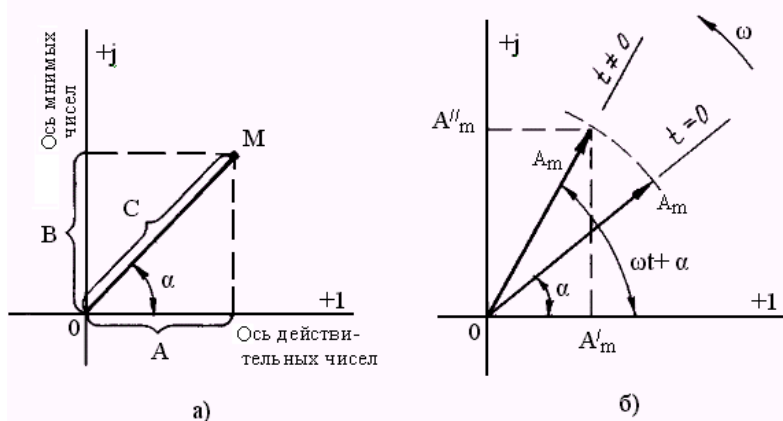


Рисунок 3.7 - Комплексная плоскость

При этом положительные числа откладываются по соответствующим осям вправо и вверх, а отрицательные – влево и вниз от начала координат.

Комплексное число (3.25) можно изобразить точкой  $M$  на комплексной плоскости с абсциссой  $A$  и ординатой  $B$  (рисунок 3.7,а).

Положение точки  $M$  на комплексной плоскости можно также определить отрезком  $OM$  (радиус-вектор) и углом  $\alpha$  между этим отрезком и положительным направлением оси действительных чисел (рисунок 3.7, а).

Длину отрезка  $OM$  называют модулем комплексного числа  $\underline{C}$ . Его значение определяется формулой:

$$C = \sqrt{A^2 + B^2}. \quad (3.26)$$

Угол  $\alpha$ , на который нужно повернуть ось вещественных чисел в положительном направлении (против часовой стрелки) до совпадения с отрезком  $OM$ , называют аргументом комплексного числа  $\underline{C}$ . Согласно рисунку 3.7, а, он определяется как

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{B}{A}. \quad (3.27)$$

Введение этих определений позволяет представить комплексное число в показательной форме записи:

$$\underline{C} = A + jB = Ce^{j\alpha}, \quad (3.28)$$

где  $e$  - основание натуральных логарифмов.

Модуль комплексного числа  $C$  имеет единственное значение, а аргумент  $\alpha$  - бесконечное множество значений, отличающихся друг от друга на  $360^\circ \cdot K$  ( $K$  - любое целое положительное или отрицательное число).

Из рисунка 3.7,а следует, что

$$A = C \cdot \cos \alpha, \quad B = C \cdot \sin \alpha. \quad (3.29)$$

Если эти выражения подставить в формулу (3.25), то получится тригонометрическая форма записи комплексного числа:

$$\underline{C} = A + jB = C \cdot \cos \alpha + jC \cdot \sin \alpha. \quad (3.30)$$

**2. Комплексное изображение синусоиды.** Если поместить на комплексную плоскость вектор длиной  $A_m$ , изображающий синусоидальную электрическую величину и вращающийся против часовой стрелки с постоянной угловой скоростью  $\omega$ , занимавший в момент времени  $t=0$  угол  $\alpha$  с осью вещественных чисел (рисунок 3.7, б), то через определенное время  $t$  он составит с этой осью угол  $(\omega \cdot t + \alpha)$ . В соответствии с изложенным выше, этот вектор (синусоидальная электрическая величина) можно представить комплексным числом и записать в трех формах записи: алгебраической, тригонометрической и показательной.

$$A_m^I + jA_m^{II} = A_m \cos(\omega \cdot t + \alpha) + jA_m \sin(\omega \cdot t + \alpha) = A_m e^{j(\omega t + \alpha)}.$$

Отсюда следует, что проекция этого вращающегося вектора на ось мнимых чисел  $A_m^{II}$  изменяется по синусоидальному закону.

Показательную форму записи комплексного числа можно представить следующим образом:

$$A_m e^{j(\omega t + \alpha)} = A_m e^{j\alpha} \cdot e^{j\omega t} = \underline{A}_m e^{j\omega t},$$

где  $\underline{A}_m = A_m e^{j\alpha}$  - комплексная амплитуда, величина, не зависящая от времени.

Комплекс действующего значения (в дальнейшем будем называть комплексом) синусоидальной функции определится как:

$$\underline{A} = \frac{A_m}{\sqrt{2}} = \frac{A_m}{\sqrt{2}} e^{j\alpha} = Ae^{j\alpha}. \quad (3.31)$$

Комплексом (3.31) и обозначают в электротехнике синусоидальные электрические величины (напряжение, ЭДС, ток и т.д.), точнее сказать, мнимой частью этого комплекса:

$$A_m \sin(\omega \cdot t + \alpha) = \text{Im}[\underline{A}\sqrt{2}e^{j\omega t}]. \quad (3.32)$$

Переход от мгновенного значения электрической величины к ее комплексу осуществляется по формуле 3.31. К примеру, известному мгновенному значению напряжения  $u = 141 \sin(\omega \cdot t - 45^\circ)$  В соответствует следующий комплекс:

$$\underline{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{j\alpha} = \frac{141}{\sqrt{2}} e^{-j45^\circ} = 100e^{-j45^\circ} \text{ В.}$$

Формула (3.32) позволяет перейти от комплекса к мгновенному значению электрической величины. Для этого необходимо комплекс умножить на  $\sqrt{2}$ , а также на оператор поворота  $e^{j\omega t}$  и взять мнимую часть получившегося комплекса.

Если, к примеру, известен комплекс тока  $\underline{I} = 10e^{j30^\circ}$  А, то мгновенное значение этого тока запишется:

$$i = \text{Im}[\underline{I}\sqrt{2}e^{j\omega t}] = \text{Im}[10e^{j30^\circ} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{j\omega t}] = \text{Im}[14,1e^{j(\omega t + 30^\circ)}] = 14,1 \sin(\omega \cdot t + 30^\circ) \text{ А.}$$

### 3. Алгебраические действия с комплексными числами.

Сложению или вычитанию двух синусоидальных функций соответствует сумма или разность их изображающих комплексов. Эти операции удобнее производить в алгебраической форме записи комплексного числа, отдельно складывая (вычитая) их действительные и мнимые части:

$$\underline{C}_1 \pm \underline{C}_2 = (A_1 + jB_1) \pm (A_2 + jB_2) = (A_1 \pm A_2) + j(B_1 \pm B_2).$$

Умножение комплексных чисел удобнее выполнять в показательной форме. При этом модуль произведения равен произведению модулей сомножителей, а аргумент произведения равен сумме аргументов этих сомножителей:

$$\underline{C}_1 \cdot \underline{C}_2 = C_1 e^{j\alpha_1} \cdot C_2 e^{j\alpha_2} = C_1 \cdot C_2 e^{j(\alpha_1 + \alpha_2)}.$$

Деление проще выполняется, если комплексные числа представлены в показательной форме записи. Модуль частного от деления двух комплексных чисел равен частному от деления модуля делимого на модуль делителя, а аргумент – алгебраической разности аргументов делимого и делителя:

$$\frac{\underline{C}_1}{\underline{C}_2} = \frac{C_1 e^{j\alpha_1}}{C_2 e^{j\alpha_2}} = \frac{C_1}{C_2} e^{j(\alpha_1 - \alpha_2)}.$$

Чтобы не допустить ошибки при записи показательной формы, следует сначала качественно представить заданное в алгебраической форме записи комплексное число на комплексной плоскости.

Пусть необходимо представить в показательной форме записи комплексное число  $\underline{C} = A + jB = 4 + j3$ . Модуль комплексного числа определится:

$$C = \sqrt{A^2 + B^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5,$$

а угол (обозначим его буквой  $\psi$ ),  $\psi = \operatorname{arctg} \frac{B}{A} = \operatorname{arctg} \frac{3}{4} = 36,87^\circ$ .

В соответствии с алгебраической формой записи радиус-вектор, изображающий это комплексное число, должен располагаться в первом квадранте комплексной плоскости (рисунок 3.8), ближе к оси вещественных чисел, так как  $|A| > |B|$ . Поэтому  $\alpha = \psi$  и окончательно будем иметь:

$$\underline{C} = 4 + j3 = 5e^{j36,87^\circ}.$$

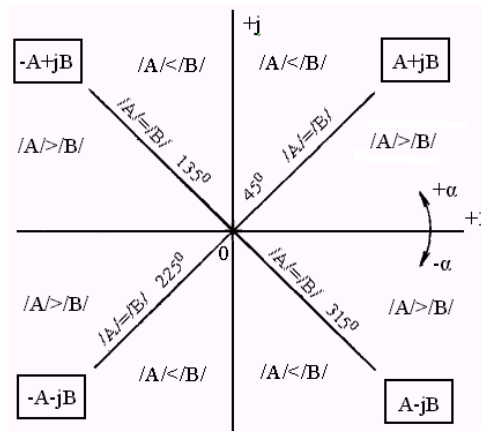


Рисунок 3.8 - К определению положения комплексного числа на комплексной плоскости

Показательную форму этого числа можно записать и с отрицательным аргументом:

$$\underline{C} = 4 + j3 = 5e^{-j323,13^\circ}.$$

**4. Закон Ома в комплексной форме.** Для цепи (рисунок 3.1) закон Ома можно в комплексной форме имеет вид:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{R + j\omega \cdot L + \frac{1}{j\omega \cdot C}} = \frac{\underline{U}}{R + j(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C})} = \frac{\underline{U}}{R + j(X_L - X_C)} = \frac{\underline{U}}{R + jX} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}}. \quad (3.33)$$

Знаменатель выражения (3.33) является комплексным сопротивлением цепи,

$$\text{т.е.} \quad \underline{Z} = R + jX = R + j(X_L - X_C) = R + j(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}). \quad (3.34)$$

Вещественная часть комплексного сопротивления является активным сопротивлением, а мнимая – реактивным.

Комплексное сопротивление можно представить и в показательной форме:

$$\underline{Z} = Ze^{j\varphi}, \quad \text{где} \quad Z = \sqrt{R^2 + X^2} - \text{модуль, а аргумент его } \varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}.$$

Выражение (3.33) можно записать и следующим образом:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} = \frac{Ue^{j\alpha}}{Ze^{j\varphi}} = \frac{U}{Z} e^{j(\alpha-\varphi)} = Ie^{j(\alpha-\varphi)}. \quad (3.35)$$

Сопротивление цепи будет представлено:

$$\underline{Z}_R = R, \quad \underline{Z}_L = jX_L = j\omega \cdot L \quad \underline{Z}_C = -jX_C = -j \frac{1}{\omega \cdot C}.$$

То есть комплексные сопротивления складываются алгебраически, а емкостные сопротивления берутся с отрицательным знаком.

Величина, обратная комплексному сопротивлению, есть его комплексная проводимость:

$$\underline{y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{Z e^{j\varphi}} = y e^{-j\varphi} = y \cos(-\varphi) + jy \sin(-\varphi) = y \cos \varphi - jy \sin \varphi = g - jb. \quad (3.36)$$

В формуле (3.36) модуль комплексной проводимости определяется как  $y = \sqrt{g^2 + b^2}$ , а аргумент  $\varphi = \text{arctg} \frac{b}{g}$  равен углу сдвига фаз между напряжением и током.

**5. Законы Кирхгофа в комплексной форме.** Первый закон Кирхгофа в комплексной форме можно сформулировать так: *алгебраическая сумма комплексных токов ветвей, сходящихся в узле, равна нулю.*

$$\sum_{\kappa=1}^n \underline{I}_{\kappa} = 0. \quad (3.37)$$

Уравнение по первому закону Кирхгофа в комплексной форме для узла (рисунок 3.9,а) будет иметь вид:

$$\underline{I}_1 - \underline{I}_2 + \underline{I}_3 - \underline{I}_4 - \underline{I}_5 = 0.$$

Второй закон Кирхгофа в комплексной форме можно сформулировать следующим образом: *в любом замкнутом контуре разветвленной цепи алгебраическая сумма комплексных напряжений на отдельных элементах контура равна алгебраической сумме комплексных ЭДС, действующих в этом контуре.*

$$\sum_{\kappa=1}^n \underline{U}_{\kappa} = \sum_{\kappa=1}^n \underline{E}_{\kappa}, \quad \text{или} \quad \sum_{\kappa=1}^n \underline{I}_{\kappa} \cdot \underline{Z}_{\kappa} = \sum_{\kappa=1}^n \underline{E}_{\kappa}. \quad (3.38)$$

Запишем уравнение по второму закону Кирхгофа в комплексной форме для контура рисунка 3.9,б.

$$\underline{U}_{R_1} + \underline{U}_L + \underline{U}_{R_2} + \underline{U}_C - \underline{U}_{R_3} = \underline{E}_1 - \underline{E}_3 \quad \text{или} \quad \underline{I}_1 \cdot R_1 + \underline{I}_1 \cdot jX_L + \underline{I}_2 R_2 + \underline{I}_2 (-jX_C) - \underline{I}_3 \cdot R_3 = \underline{E}_1 - \underline{E}_3$$

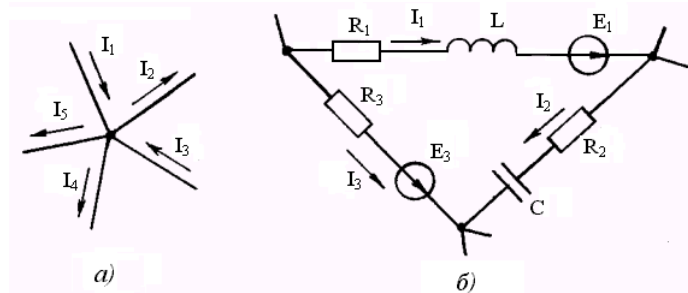


Рисунок 3.9 - Иллюстрация к уравнениям Кирхгофа в комплексной форме

**6. Мощность переменного тока в комплексной форме.** Если в разветвленной цепи синусоидального тока известны комплекс тока  $\underline{I} = I e^{j\alpha}$  на

входе ее и комплекс приложенного напряжения  $\underline{U} = Ue^{j(\alpha+\varphi)}$ , то можно определить мощность, поступающую в нее. Для этого необходимо перемножить комплекс напряжения на сопряженный комплекс тока:

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = Ue^{j(\alpha+\varphi)} \cdot Ie^{-j\alpha} = UIe^{j\varphi} = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi, \quad (3.39)$$

где  $\underline{S}$  – комплексная полная мощность. Звездочкой у тока обозначают комплексную величину, сопряженную с комплексом тока  $I$ .

Отсюда следует, что действительная часть комплекса полной мощности представляет собой активную мощность ( $Re \underline{S} = P$ ), поступающую в цепь, а мнимая часть – реактивную ( $Im \underline{S} = Q$ ).

Если мнимая часть выражения (3.40) положительна, то цепь имеет индуктивный характер. Если же она отрицательна, то характер цепи – емкостный.

Действительно, если цепь имеет емкостный характер ( $\underline{I} = Ie^{j\alpha}$ ,  $\underline{U} = Ue^{j(\alpha-\varphi)}$ ), то комплекс полной мощности

$$\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = Ue^{j(\alpha-\varphi)} Ie^{-j\alpha} = UIe^{-j\varphi} = UI \cos \varphi - jUI \sin \varphi.$$

Результат расчета в цепях переменного тока обычно проверяется также составлением баланса мощностей, только здесь он распадается на два равенства – равенство по активной и равенство по реактивной мощностям, т.е.

$$P_u = P_n, \quad Q_u = Q_n.$$

Мощности  $P_u$  и  $Q_u$ , поступающие в цепь, определяются из выражения (3.39), а мощности на пассивных элементах схемы находятся по следующим формулам:

$$P_n = \sum_{k=1}^n I_k^2 \cdot R_k, \quad Q_n = \sum_{k=1}^n I_k^2 \cdot X_k \quad (3.40)$$

Последняя сумма алгебраическая, реактивные мощности емкостных элементов входят с отрицательным знаком.

**7. Расчет сложных цепей комплексным методом.** При анализе линейных электрических цепей синусоидального тока используют их комплексные схемы замещения, в которых все источники электрической энергии, а также сопротивления ветвей представляются своими комплексными значениями. В ветвях таких схем протекают комплексы токов, а на пассивных элементах существуют комплексы падений напряжений.

Расчет этих схем замещения проводится любыми методами, известными из расчета линейных цепей постоянного тока. Положительные направления электрических величин выбираются аналогично тому, как это делается при расчете цепей постоянного тока.

Ниже приведен пример расчета цепей комплексным методом.

**Пример 3.2.** Для цепи (рисунок 3.10,а) по известным значениям ЭДС  $e_1 = 14 \sin(\omega \cdot t + 75^\circ)$  В,  $e_3 = 28 \sin(\omega \cdot t + 25^\circ)$  В и параметрам  $C_1 = 12,5$  мкФ,  $C_3 = 88,4$  мкФ,  $R_2 = 65$  Ом,  $L_3 = 26,3 \cdot 10^{-3}$  Гн,  $f = 200$  Гц определить токи в ветвях методом контурных

токов. Составить баланс мощностей и построить топографическую векторную диаграмму напряжений, совмещенную с векторной диаграммой токов.

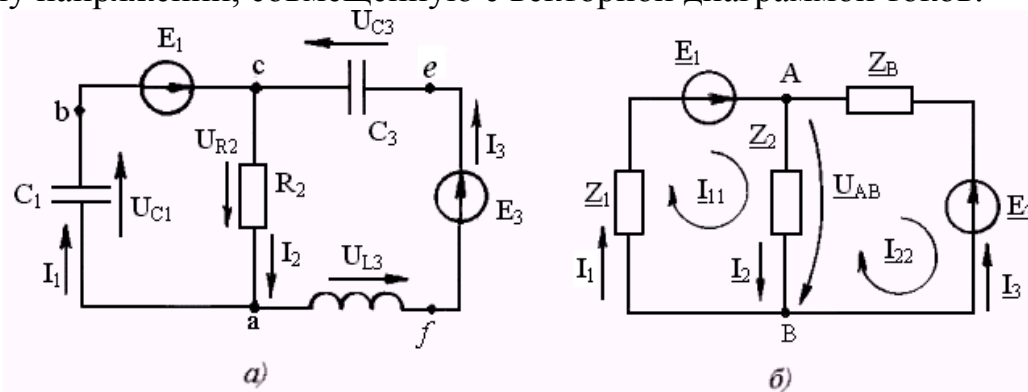


Рисунок 3.10 - Схема цепи и ее комплексная схема замещения

**Решение.** Определяем комплексы ЭДС и комплексные сопротивления ветвей схемы замещения (рисунок 3,10,б).

$$\underline{E}_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} e^{j\alpha} = \frac{14}{\sqrt{2}} e^{j75^\circ} = 9,9e^{j75^\circ} \text{ В}, \quad \underline{E}_3 = \frac{E_{3m}}{\sqrt{2}} e^{j\alpha} = \frac{28}{\sqrt{2}} e^{j25^\circ} = 19,8e^{j25^\circ} \text{ В},$$

$$\underline{Z}_1 = -jX_{C_1} = -j \frac{1}{\omega \cdot C_1} = -j \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_1} = -j \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 200 \cdot 12,5 \cdot 10^{-6}} =$$

$$= -j63,66 = 63,66e^{-j90^\circ} \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 = 65 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_3 = jX_{L_3} - jX_{C_3} = j\omega \cdot L_3 - j \frac{1}{\omega \cdot C_3} = j \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 200 \cdot 26,3 \cdot 10^{-3} - j \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 200 \cdot 88,4 \cdot 10^{-6}} =$$

$$= j33 - j9 = 24e^{j90^\circ} \text{ Ом}.$$

В соответствии с выбранным направлением контурных токов (рисунок 3.10,б) система уравнений по методу контурных токов в комплексной форме будет иметь вид:

$$\underline{I}_{11}(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2) - \underline{I}_{22} \cdot \underline{Z}_2 = \underline{E}_1;$$

$$- \underline{I}_{11} \underline{Z}_2 + \underline{I}_{22}(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3) = -\underline{E}_3.$$

Подставив в уравнения числовые значения, получим два уравнения с двумя неизвестными контурными токами:

$$\underline{I}_{11}(-j63,66 + 65) - \underline{I}_{22} \cdot 65 = 9,9e^{j75^\circ};$$

$$- \underline{I}_{11} \cdot 65 + \underline{I}_{22}(65 + j24) = -19,8e^{j25^\circ}.$$

Решив совместно уравнения, получим значения контурных токов:

$$\underline{I}_{11} = 0,413e^{-j127,12^\circ} \text{ А}; \quad \underline{I}_{22} = 0,654e^{j200,83^\circ} \text{ А}.$$

Определяем действительные токи в ветвях:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{11} = 0,413e^{-j127,12^\circ} \text{ А}, \quad \underline{I}_2 = \underline{I}_{11} - \underline{I}_{22} = 0,413e^{-j127,12^\circ} - 0,654e^{j200,83^\circ} = 0,374e^{-j15^\circ} \text{ А}.$$

$$\underline{I}_3 = -\underline{I}_{22} = -0,654e^{j200,83^\circ} = 0,654e^{j20,83^\circ} \text{ А}.$$

Активная мощность источников  $P_u=9,12$  Вт, а реактивная мощность  $Q_u=0,59$  вар.

Активная мощность, потребленная в схеме:

$$P_n = I_2^2 \cdot R_2 = 0,374^2 \cdot 65 = 9,1 \text{ Вт.}$$

Реактивная мощность потребителей в схеме:

$$Q_n = -I_1^2 \cdot X_1 + I_3^2 X_3 = -0,413^2 \cdot 63,66 + 0,654^2 \cdot 24 = -0,59 \text{ вар.}$$

Для построения векторной диаграммы напряжений необходимо предварительно определить комплексы напряжений на пассивных элементах цепи.

$$\underline{U}_{C_1} = \underline{I}_1(-jX_{C_1}) = 0,413e^{-j127,12^\circ} \cdot 63,66e^{-j90^\circ} = 26,3e^{-j217,12^\circ} \text{ В,}$$

$$\underline{U}_{C_3} = \underline{I}_3(-jX_{C_3}) = 0,654e^{j20,8^\circ} \cdot 9e^{-j90^\circ} = 5,89e^{-j69,2^\circ} \text{ В,}$$

$$\underline{U}_{L_3} = \underline{I}_3 jX_{L_3} = 0,654e^{j20,8^\circ} \cdot 33e^{j90^\circ} = 21,61e^{j110,8^\circ} \text{ В,}$$

$$\underline{U}_{R_2} = \underline{I}_2 R_2 = \underline{U}_{AB} = 24,36e^{-j15^\circ} \text{ В.}$$

Топографическая векторная диаграмма напряжений, совмещенная с диаграммой токов, представлена на рисунке 3.11.

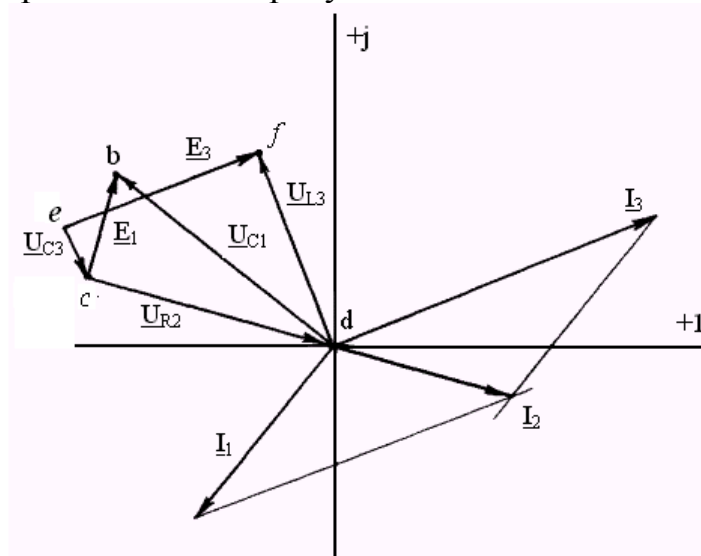


Рисунок 3.11 - Топографическая векторная диаграмма напряжений, совмещенная с диаграммой токов

Построенная векторная диаграмма напряжений позволяет найти комплекс напряжения между двумя любыми точками цепи.

#### 4. ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Трёхфазная цепь переменного тока – это совокупность трех однофазных цепей, содержащих ЭДС одинаковой частоты и амплитуды и сдвинутых относительно друг друга на угол  $120^\circ$ . Однофазные цепи, входящие в состав трёхфазной системы, называют фазами трёхфазной цепи, и их обозначают буквами латинского алфавита: А, В, С. На рисунке 4.1 показана трёхфазная цепь.



Основная масса электрической энергии, используемая в технике и быту, вырабатывается на электрических станциях трехфазными синхронными генераторами. В простейшем виде такой генератор имеет на статоре три одинаковые обмотки, электрические оси которых сдвинуты на  $120^\circ$ . При вращении ротора, который в простейшем виде представляет собой постоянный магнит, в обмотках наводятся синусоидальные ЭДС, имеющие одинаковую амплитуду и частоту и сдвинутые по фазе относительно друг друга на одну треть периода ( $120^\circ$ ).

От направления вращения ротора генератора зависит порядок возникновения максимума ЭДС в фазах. Обычно используют прямой порядок чередования фаз ( $A \rightarrow B \rightarrow C$ ); когда ЭДС в фазах достигают своих максимальных значений, в таком порядке: сначала в фазе А, затем в фазе В и далее в фазе С.

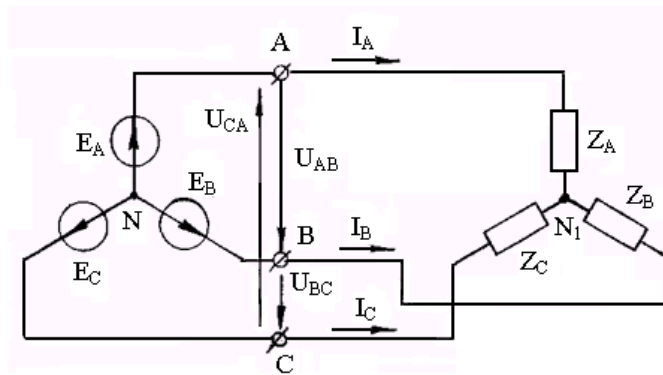


Рисунок 4.1 - Трехфазная цепь

При прямом порядке чередования фаз мгновенные значения ЭДС трехфазного генератора аналитически выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega \cdot t; \\ e_B &= E_m \sin(\omega \cdot t - 120^\circ); \\ e_C &= E_m \sin(\omega \cdot t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega \cdot t + 120^\circ). \end{aligned} \quad (4.1)$$

Уравнениям (4.1) соответствуют графики ЭДС и векторная диаграмма, изображенные на рисунке 4.2.

В комплексной форме ЭДС фаз генератора запишутся:

$$\underline{E}_A = \frac{E_m}{\sqrt{2}} e^{j0^\circ} = E; \quad \underline{E}_B = E e^{-j120^\circ}; \quad \underline{E}_C = E e^{j120^\circ}. \quad (4.2)$$

Из-за того, что фазные ЭДС генератора сдвинуты относительно друг друга на  $120^\circ$ , в ряде случаев электрические величины (токи и напряжения) в трехфазной цепи оказываются также сдвинутыми на угол  $120^\circ$ .

Из рисунка 4.2,б следует, что геометрическая сумма изображающих векторов ЭДС симметричной трехфазной системы равна нулю.

Обмотки трехфазных генераторов обычно соединяют звездой (рисунок 4.1,б). При этом на выводах его возникают напряжения  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ , которые называют линейными (напряжение между двумя линейными проводами). Векторная

диаграмма фазных ЭДС и линейных напряжений симметричного трехфазного генератора приведена на рисунке 4.3.

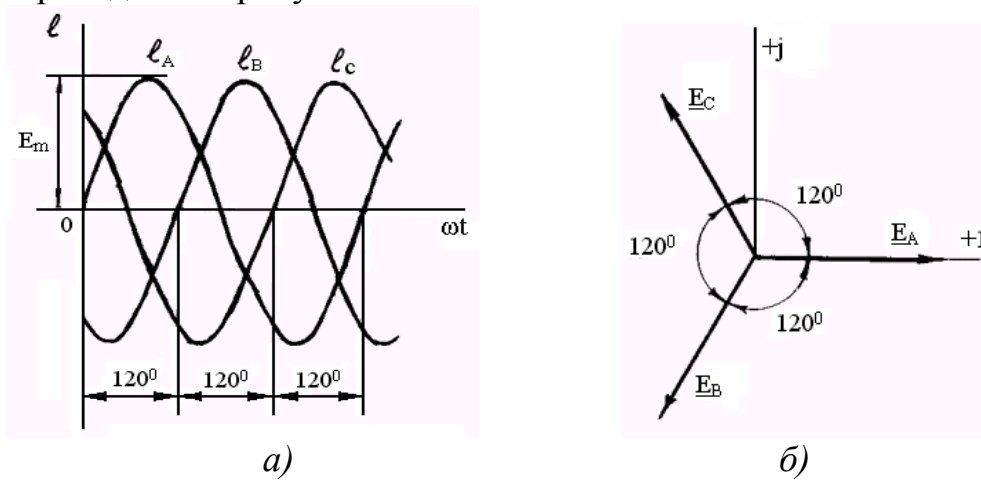


Рисунок 4.2 - Графики и векторная диаграмма симметричной трехфазной системы ЭДС

Линейные напряжения генератора можно определить из уравнений по второму закону Кирхгофа из схемы рисунка 4.1,б.

$$\underline{U}_{AB} = \underline{E}_A - \underline{E}_B; \quad \underline{U}_{BC} = \underline{E}_B - \underline{E}_C; \quad \underline{U}_{CA} = \underline{E}_C - \underline{E}_A. \quad (4.3)$$

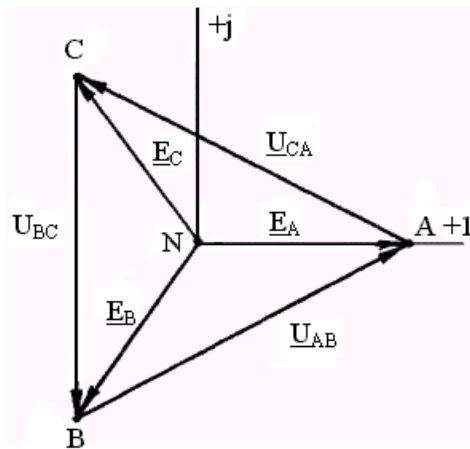


Рисунок 4.3 - Векторная диаграмма фазных ЭДС и линейных напряжений генератора

Из рисунка 4.3 следует, что *линейное напряжение симметричного трехфазного генератора в  $\sqrt{3}$  раз больше фазной ЭДС и опережает ее на угол  $30^\circ$* , т.е.  $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = \sqrt{3}E_A$ .

Нагрузка в фазах может соединяться звездой или треугольником. Если сопротивления нагрузки в фазах одинаковые, т.е.  $Z_A = Z_B = Z_C$  (рисунок 4.1,б), то такую нагрузку называют *симметричной*. Если сопротивления в фазах отличаются по характеру или по модулю, то такая нагрузка считается *несимметричной*.

#### 4.1. РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ НАГРУЗКИ В ЗВЕЗДУ

Рассмотрим соединение трехфазной цепи при соединении нагрузки в звезду (рисунок 4.4) с нейтральным проводом, объединяющим нейтральные точки генератора ( $N$ ) и нагрузки ( $N_1$ ).

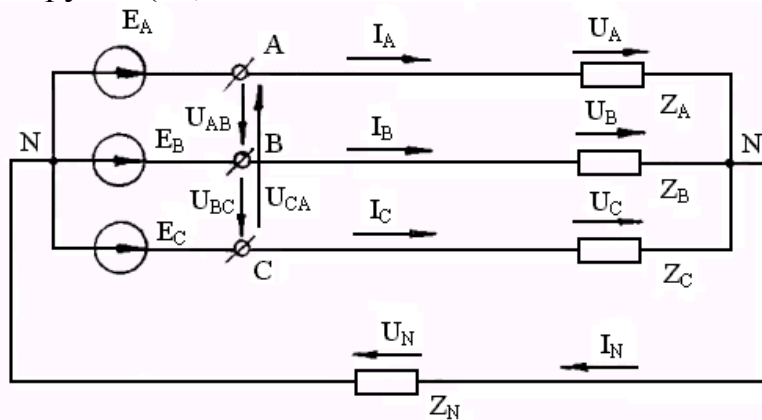


Рисунок 4.4 – Трехфазная четырехпроводная цепь

По линейным проводам протекают линейные токи  $I_A, I_B, I_C$ , положительное направление которых – от генератора к нагрузке. Из схемы (рисунок 4.4) следует, что линейный ток протекает по фазам нагрузки и генератора, т.е. является при таком соединении одновременно фазным током ( $I_L = I_\Phi$ ). Напряжения  $U_A, U_B, U_C$  – фазные напряжения нагрузки (напряжение между нейтральной точкой  $N_1$  и линейным проводом).

Порядок анализа электрической цепи зависит от того, симметричная или несимметричная нагрузка.

**1. Симметричный режим.** В этом случае сопротивления по фазам нагрузки  $Z_A = Z_B = Z_C = Ze^{j\varphi}$ , а ЭДС генератора  $\underline{E}_A, \underline{E}_B = a^2 \underline{E}_A, \underline{E}_C = a \underline{E}_A$ .

Если пренебречь сопротивлением нейтрального провода ( $Z_N = 0$ ), то разность потенциалов между нейтральными точками  $N$  и  $N_1$  (рисунок 4.4) равна нулю, и из схемы образуется три самостоятельных однофазных контура. К примеру, для фазы А будем иметь схему, изображенную на рисунке 4.5. Подобные схемы будут для фаз В и С.

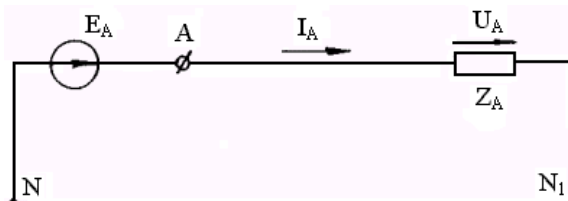


Рисунок 4.5 - Схема для расчета электрических величин фазы А

Комплекс тока в фазе А определится по закону Ома как

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{E}_A}{\underline{Z}_A}.$$

Токи в фазах  $B$  и  $C$  определяются:

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{E}_B}{\underline{Z}_B} = \frac{\underline{E}_A e^{-j120^\circ}}{\underline{Z}_A} = \underline{I}_A e^{-j120^\circ},$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{E}_C}{\underline{Z}_C} = \frac{\underline{E}_A e^{j120^\circ}}{\underline{Z}_A} = \underline{I}_A e^{j120^\circ}.$$

То есть при симметричной нагрузке, соединенной в звезду, *достаточно провести расчет для одной фазы, а электрические величины в оставшихся фазах будут такими же, только сдвинутыми по фазе на угол  $\pm 120^\circ$ .*

Векторная диаграмма при симметричном режиме представлена на рисунке 4.6. Диаграмма построена для случая активно-индуктивной нагрузки в фазах, когда линейные токи отстают от соответствующих фазных ЭДС генератора на угол  $\varphi$ , обусловленный нагрузкой в фазе.

Положительное направление тока в нейтральном проводе (рисунок 4.4) выбирается от нагрузки к генератору. Поэтому комплекс тока в нейтральном проводе по первому закону Кирхгофа будет равен сумме линейных токов, т.е.

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C. \quad (4.4)$$

При симметричной нагрузке линейные токи имеют одинаковые значения и сдвинуты по фазе на угол  $120^\circ$ , т.е. образуют на комплексной плоскости симметричную трехфазную систему векторов (рисунок 4.6). Их сумма

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = \underline{I}_N = 0. \quad (4.5)$$

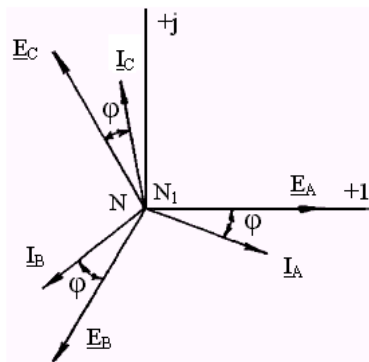


Рисунок 4.6 - Векторная диаграмма четырехпроводной трехфазной цепи в симметричном режиме

Равенство (4.5) означает, что при симметричной нагрузке ток в нейтральном проводе отсутствует, необходимость в нем отпадает и трехфазная система становится трехпроводной (рисунок 4.1). На практике симметричная нагрузка встречается достаточно часто: все двигатели трехфазного тока представляют собой симметричную нагрузку и обычно включаются в сеть по трехпроводной схеме, т.е. без нейтрального провода.

При симметричной нагрузке в трехпроводной цепи расчет проводится подобно тому, как это делается при наличии нейтрального провода. В этом случае фазы находятся в одинаковых условиях и потенциалы нейтральных точек

генератора и нагрузки оказываются одинаковыми ( $\varphi_N = \varphi_{N_1}$ ). Эти точки можно мысленно объединить и вести также расчет на одну фазу.

**2. Несимметричный режим.** Несимметрия в трехфазной цепи может быть вызвана: неодинаковым сопротивлением фаз (несимметричная нагрузка); несимметричными короткими замыканиями, обрывами фаз.

При несимметричной нагрузке ( $\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$ ) нарушается симметрия линейных токов, появляется ток в нейтральном проводе и между нейтральными точками генератора и нагрузки (рисунок 4.4) возникает так называемое напряжение смещения нейтрали  $\underline{U}_N = \underline{I}_N \cdot \underline{Z}_N$ , и расчет на одну фазу проводить нельзя.

Четырехпроводную трехфазную цепь при несимметричной нагрузке рассматривают как трехконтурную цепь с тремя ЭДС (рисунок 4.4). Такая цепь может быть рассчитана известными методами расчета однофазных цепей, например: методом контурных токов. Поскольку в цепи только два узла, то целесообразнее применить метод двух узлов, определив напряжение между нейтральными точками  $N$  и  $N_I$  по формуле:

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{Y}_A \cdot \underline{E}_A + \underline{Y}_B \cdot \underline{E}_B + \underline{Y}_C \cdot \underline{E}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}, \quad (4.6)$$

где  $\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A}$ ,  $\underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B}$ ,  $\underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C}$ ,  $\underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N}$  - проводимости

соответствующих ветвей.

Комплексы фазных напряжений на нагрузке определяются из уравнений по второму закону Кирхгофа (рисунок 4.4):

$$\underline{U}_A = \underline{E}_A - \underline{U}_N; \quad \underline{U}_B = \underline{E}_B - \underline{U}_N; \quad \underline{U}_C = \underline{E}_C - \underline{U}_N, \quad (4.7)$$

а линейные токи и ток в нейтральном проводе:

$$\underline{I}_A = \underline{U}_A \cdot \underline{Y}_A; \quad \underline{I}_B = \underline{U}_B \cdot \underline{Y}_B; \quad \underline{I}_C = \underline{U}_C \cdot \underline{Y}_C; \quad \underline{I}_N = \underline{U}_N \cdot \underline{Y}_N. \quad (4.8)$$

В случае трехпроводной цепи ( $\underline{Z}_N = \infty$ ) при несимметричной нагрузке расчет проводится аналогично, только напряжение смещения нейтрали определяется по формуле:

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{Y}_A \cdot \underline{E}_A + \underline{Y}_B \cdot \underline{E}_B + \underline{Y}_C \cdot \underline{E}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}, \quad (4.9)$$

так как  $\underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N} = 0$ .

Из выражения (4.6) следует, что при наличии нейтрального провода, сопротивление которого мало ( $\underline{Y}_N \rightarrow \infty$ ), напряжение  $U_N$  близко к нулю и фазные напряжения на нагрузке ( $U_A, U_B, U_C$ ) в соответствии с уравнениями (4.7) мало отличаются от соответствующих фазных ЭДС, которые симметричны и практически не зависят от режима работы нагрузки. Неравномерность нагрузки в этом случае сказывается на величине тока в нейтральном проводе.

При обрыве нейтрального провода ( $Y_N=0$ ) и несимметричной нагрузке фаз напряжение  $U_N$  оказывается весьма значительным и может привести к резкой несимметрии фазных напряжений.

В процессе работы возможна неравномерная нагрузка по фазам, то такой трехфазный приемник соединяют звездой с нейтральным проводом. При этом необходимо следить за тем, чтобы не происходило обрыва нейтрального провода, так как это может вызвать недопустимые изменения фазных напряжений: повышение на одних фазах приемника (вплоть до линейного напряжения) и понижение на других. По этой же причине не ставят в нейтральный провод коммутирующие аппараты и предохранители.

**Пример 4.1.** К симметричному трехфазному генератору с линейным напряжением  $U_{AB}=U_{BC}=U_{CA}=380\text{ В}$  (рисунок 4.4) подключена симметричная нагрузка  $\underline{Z}_A=\underline{Z}_B=\underline{Z}_C=(4+j3)\text{ Ом}$ . Определить токи в фазах и нейтральном проводе и построить топографическую диаграмму напряжений, совмещенную с векторной диаграммой токов. Сопротивлением линейных и нейтрального проводов пренебречь.

**Решение.** Так как нагрузка симметричная, то достаточно провести расчет на одну фазу.

Действующее значение фазной ЭДС симметричного генератора:

$$E_A = E_B = E_C = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В.}$$

Если ЭДС фазы А направить по вещественной оси комплексной плоскости, то комплекс тока в фазе А определится:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{E}_A}{\underline{Z}_A} = \frac{220}{4+j3} = \frac{220}{5e^{j36,9^\circ}} = 44e^{-j36,9^\circ} \text{ А.}$$

Токи в фазах В и С можно записать через фазовый оператор:

$$\underline{I}_B = \underline{I}_A e^{-j120^\circ} = 44e^{-j36,9^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} = 44e^{-j156,9^\circ} \text{ А,}$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_A e^{-j120^\circ} = 44e^{-j36,9^\circ} \cdot e^{j120^\circ} = 44e^{j83,1^\circ} \text{ А.}$$

Действующие значения токов в фазах нагрузки:

$$I_A = I_B = I_C = 44 \text{ А.}$$

Так как токи  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  представляют симметричную трехфазную систему, то ток в нейтральном проводе, согласно формуле (4.4):

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0.$$

На рисунке 4.7 построена совмещенная топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов.

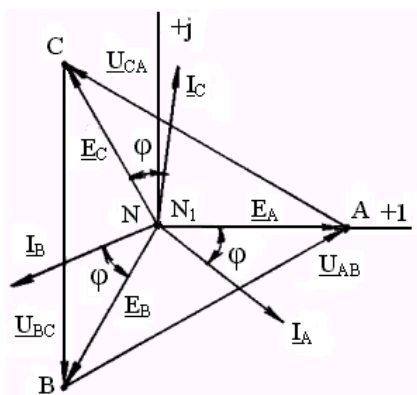


Рисунок 4.7 - Векторная диаграмма четырехпроводной трехфазной цепи при симметричной нагрузке

Точки  $N$  и  $N_1$  совпадают и находятся в начале координат комплексной плоскости.

**Пример 4.2.** К трехфазной линии с линейным напряжением  $U_{л} = 220$  В подключена несимметричная нагрузка, соединенная звездой с нейтральным проводом (рисунок 4.8,а).

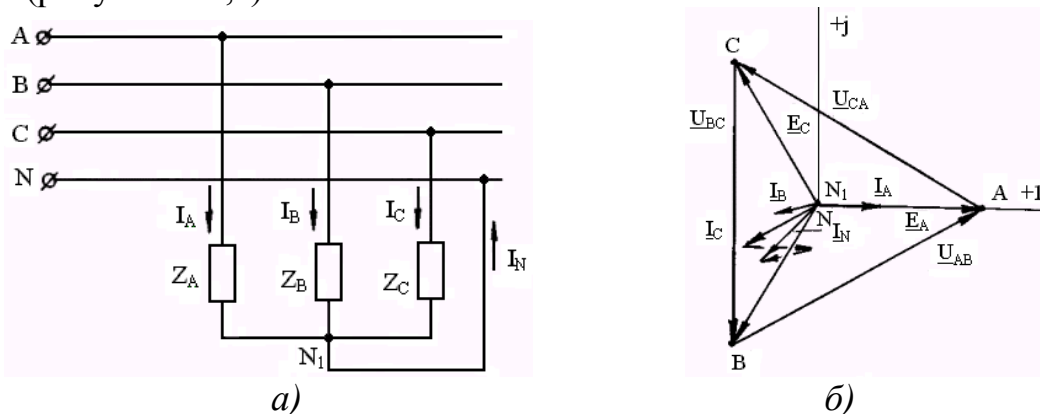


Рисунок 4.8 - Четырехпроводная трехфазная цепь в несимметричном режиме и ее векторная диаграмма

Комплексы сопротивлений фаз нагрузки соответственно равны:  $\underline{Z}_A = 20$  Ом,  $\underline{Z}_B = (20 + j20)$  Ом,  $\underline{Z}_C = -j15$  Ом. Определить токи в фазах нагрузки и в нейтральном проводе. Построить топографическую диаграмму напряжений, совмещенную с векторной диаграммой токов. Определить токи в фазах и нейтральном проводе при обрыве фазы  $A$ .

**Решение.** Комплексы ЭДС фаз питающей линии (генератора):

$$\underline{E}_A = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}} e^{j0^\circ} = \frac{220}{\sqrt{3}} e^{j0^\circ} = 127 \text{ В}; \quad \underline{E}_B = a^2 \underline{E}_A = 127 e^{-j120^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{E}_C = a \underline{E}_A = 127 e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Токи в линейных проводах и фазах нагрузки одинаковы и рассчитываются по закону Ома:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{E}_A}{\underline{Z}_A} = \frac{127}{20} = 6,35 \text{ A},$$

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{E}_B}{\underline{Z}_B} = \frac{127e^{-j120^\circ}}{20 + j20} = \frac{127e^{-j120^\circ}}{28,28e^{j45^\circ}} = 4,5e^{-j165^\circ} \text{ A},$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{E}_C}{\underline{Z}_C} = \frac{127e^{j120^\circ}}{15e^{-j90^\circ}} = 8,47e^{j210^\circ} \text{ A}.$$

Ток в нейтральном проводе

$$\begin{aligned} \underline{I}_N &= \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 6,35 + 4,5e^{-j165^\circ} + 8,47e^{j210^\circ} = 6,35 - 4,34 - j1,16 - 7,335 - j4,23 = \\ &= -5,325 - j5,39 = 7,58e^{-j134,66^\circ} \text{ A}. \end{aligned}$$

Таким образом, действующие значения токов в фазах  $I_A = 6,35 \text{ A}$ ,  $I_B = 4,5 \text{ A}$ ,  $I_C = 8,47 \text{ A}$ , а в нейтральном проводе  $I_N = 7,58 \text{ A}$ .

Топографическая векторная диаграмма напряжений представлена на рисунке 4.8,б. При построении векторной диаграммы токов необходимо учесть, что токи в фазах сдвинуты относительно фазных ЭДС на разные углы сдвига фаз:  $\varphi_a = 0^\circ$  - нагрузка чисто активная,  $\varphi_b = 45^\circ$  - нагрузка активно-индуктивная,  $\varphi_c = 90^\circ$  - нагрузка емкостная.

Вектор тока в нейтральном проводе также можно построить двумя способами: или как сумму векторов  $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$ , или непосредственно отложить вектор  $\underline{I}_N$  в соответствии с результатами расчета (действующее значение тока в нейтральном проводе равно 7,58 А, а его начальная фаза  $\psi_N = -134,66^\circ$ ).

В случае обрыва фазы А ток в нейтральном проводе станет равным нулю ( $\underline{I}_A = 0$ ), а токи в фазах В и С не изменятся, так как в схеме с нейтральным проводом режимы фаз не зависят друг от друга, т.е.  $\underline{I}_B = 4,5e^{-j165^\circ} \text{ A}$ ,  $\underline{I}_C = 8,47e^{j210^\circ} \text{ A}$ . Комплекс тока в нейтральном проводе определится из первого закона Кирхгофа как

$$\underline{I}_N = \underline{I}_B + \underline{I}_C = -4,34 - j1,16 - 7,335 - j4,23 = -11,675 - j5,39 = 12,86e^{j204,8^\circ} \text{ A}.$$

## 4.2 РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ НАГРУЗКИ В ТРЕУГОЛЬНИК

На рисунке 4.9 показана схема соединения фаз нагрузки треугольником. Сопротивлениям фаз нагрузки при таком соединении принято присваивать двойной индекс:  $Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA}$ .

Из схемы соединения следует, что каждая фаза нагрузки оказывается включенной на линейное напряжение генератора, т.е. линейное напряжение генератора является фазным напряжением нагрузки:

$$U_\phi = U_L. \quad (4.10)$$



Фазные токи нагрузки  $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$ ,  $I_{CA}$  отличаются от линейных токов  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ . Положительное направление фазных токов обычно выбирают так, как показано на рисунке 4.9.

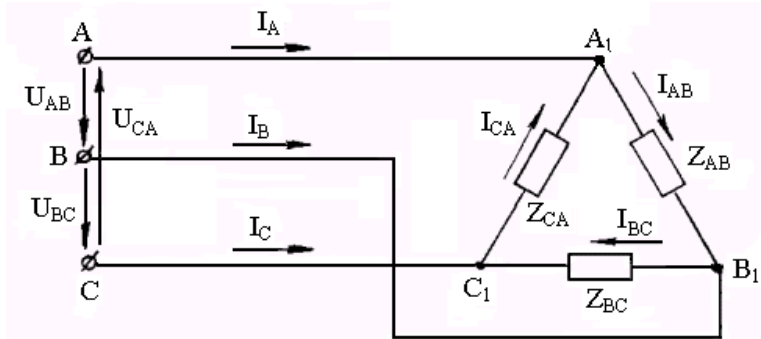


Рисунок 4.9 - Трехфазная цепь при соединении нагрузки треугольником

В общем случае, при любой нагрузке, токи в фазах рассчитывают по закону Ома:

$$\underline{I}_{AB} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}; \quad \underline{I}_{BC} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}}; \quad \underline{I}_{CA} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}}, \quad (4.11)$$

а линейные – по первому закону Кирхгофа. Для узлов  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  соответственно будем иметь:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A - \underline{I}_{AB} + \underline{I}_{CA} &= 0; & \underline{I}_B + \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{BC} &= 0; & \underline{I}_C - \underline{I}_{CA} + \underline{I}_{BC} &= 0, \\ \text{или} \quad \underline{I}_A &= \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA}; & \underline{I}_B &= \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB}; & \underline{I}_C &= \underline{I}_{CA} - \underline{I}_{BC}. \end{aligned} \quad (4.12)$$

**1. Симметричный режим.** В этом случае ( $\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA}$ ) фазы находятся в одинаковых условиях и фазные токи  $\underline{I}_{AB}, \underline{I}_{BC}, \underline{I}_{CA}$ , определяемые по (4.11), представляют симметричную систему, т.е. одинаковы по величине и сдвинуты относительно друг друга на угол  $120^\circ$ .

Линейные токи  $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ , также будут образовывать симметричную систему. Поэтому при симметричной нагрузке, соединенной в треугольник, расчет можно проводить на одну фазу, а электрические величины для двух других фаз будут такими же, только сдвинутые на  $\pm 120^\circ$ .

В симметричном режиме при соединении нагрузки треугольником линейный ток в  $\sqrt{3}$  раз больше фазного:

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_\phi \quad (4.13)$$

и отстает от фазного тока на угол  $30^\circ$ .

**2. Несимметричный режим.** При несимметричной нагрузке, когда сопротивления по фазам различны, расчет на одну фазу выполнять нельзя. В этом случае сначала определяют токи в каждой фазе  $\underline{I}_{AB}, \underline{I}_{BC}, \underline{I}_{CA}$  по формулам (4.11), а затем по выражениям (4.12) рассчитывают линейные токи  $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ . При этом соотношение (4.13) чаще всего не выполняется.

На рисунке 4.10 представлена топографическая векторная диаграмма напряжений, совмещенная с векторной диаграммой токов, при различной нагрузке фаз. Очень часто строят обычные (лучевые) векторные диаграммы напряжений, совмещенные с диаграммой токов (рисунок 4.11). В этом случае векторы проводят из начала координат комплексной плоскости, расположив вектор напряжения  $\underline{U}_{AB}$  по положительной полуоси вещественных чисел.

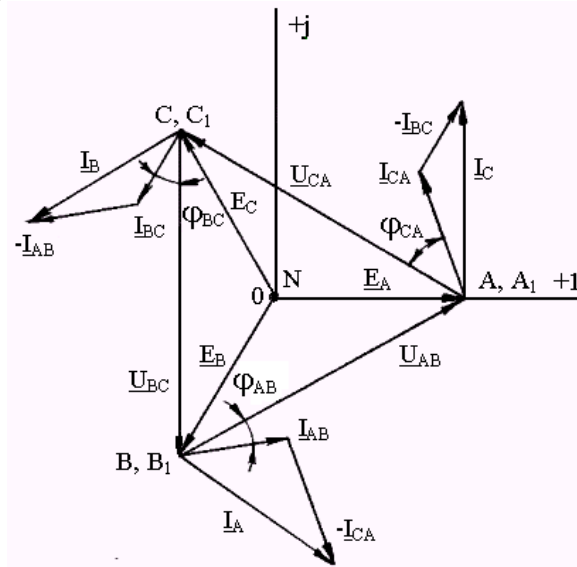


Рисунок 4.10 - Топографическая векторная диаграмма при соединении нагрузки треугольником в несимметричном режиме

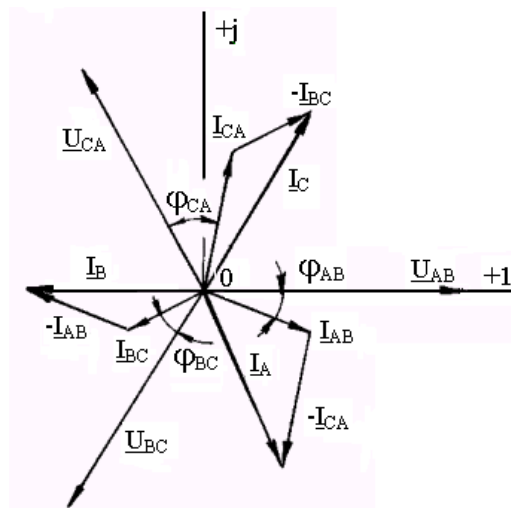


Рисунок 4.11 - Лучевая векторная диаграмма

**Пример 4.3.** Пусть для схемы рисунка 4.9 известны линейное напряжение генератора  $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = 380$  В и комплексы сопротивлений фаз нагрузки  $\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA} = \underline{Z}_{\phi} = 4 + j3 = 5e^{j36,9^\circ}$  Ом. Определить фазные и линейные токи и построить векторную диаграмму напряжений и токов.

**Решение.** Из-за того, что нагрузка симметричная, расчет проводим на одну фазу. Если принять, что  $\underline{U}_{AB} = U_{AB} = 380$  В, то ток  $\underline{I}_{AB}$  определится:

$$\underline{I}_{AB} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}} = \frac{380}{5e^{j36,9^\circ}} = 76e^{-j36,9^\circ} \text{ А.}$$

В двух других фазах токи запишутся:

$$\underline{I}_{BC} = \underline{I}_{AB}e^{-j120^\circ} = 76e^{-j156,9^\circ} \text{ А;} \quad \underline{I}_{CA} = a\underline{I}_{AB}e^{j120^\circ} = 76e^{j83,1^\circ} \text{ А.}$$

Комплекс линейного тока  $\underline{I}_A$  определится

$$\underline{I}_A = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_{AB}e^{-j30^\circ} = 131,64e^{-j66,9^\circ} \text{ А.}$$

Линейные токи  $\underline{I}_B$  и  $\underline{I}_C$ :

$$\underline{I}_B = \underline{I}_Ae^{-j120^\circ} = 131,64e^{-j186,9^\circ} \text{ А;} \quad \underline{I}_C = \underline{I}_Ae^{j120^\circ} = 131,64e^{j53,1^\circ} \text{ А.}$$

Векторная диаграмма для симметричного режима представлена на рисунке 4.12.

### Мощность трехфазной цепи

Активная и реактивная мощности трехфазной цепи в общем случае, при любой нагрузке, равны суммам мощностей отдельных фаз.

Активная мощность трехфазной цепи  $P = P_A + P_B + P_C$ , если нагрузка соединена звездой, и  $P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}$  при соединении фаз нагрузки треугольником. Здесь  $P_A, P_B, P_C$  - активные мощности фаз при соединении нагрузки в звезду, а  $P_{AB}, P_{BC}, P_{CA}$  - при соединении треугольником. Активная мощность каждой фазы рассчитывается так же, как и для однофазной цепи:

$$P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi = R_\phi I_\phi^2.$$

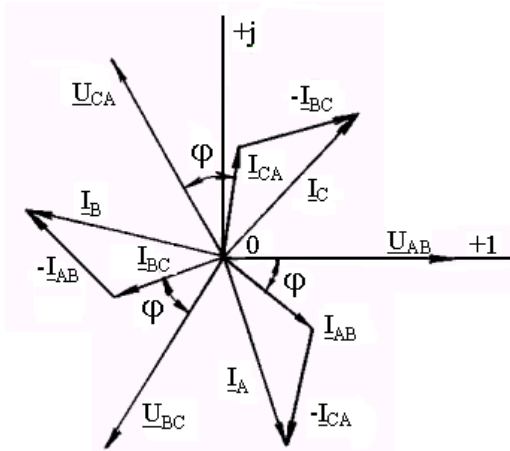


Рисунок 4.12 - Векторная диаграмма в симметричном режиме для соединения нагрузки треугольником

В случае симметричной нагрузки мощности всех фаз одинаковы, поэтому активная мощность трехфазной цепи равна утроенной мощности одной фазы:

$$P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi.$$

Часто мощность при симметричной нагрузке выражают через линейные величины. При соединении нагрузки звездой  $U_{\phi} = \frac{U_{Л}}{\sqrt{3}}$ , а  $I_{\phi} = I_{Л}$ , поэтому активная мощность:

$$P = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi = 3\left(\frac{U_{Л}}{\sqrt{3}}\right)I_{Л} \cos \varphi = \sqrt{3}U_{Л}I_{Л} \cos \varphi. \quad (4.14)$$

Такая же формула будет соответствовать и соединению нагрузки треугольником ( $U_{\phi} = U_{Л}$ ,  $I_{\phi} = \frac{I_{Л}}{\sqrt{3}}$ ):

$$P = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi = 3 \cdot U_{Л} \left(\frac{I_{Л}}{\sqrt{3}}\right) \cos \varphi = \sqrt{3}U_{Л}I_{Л} \cos \varphi.$$

Реактивная мощность трехфазной цепи при несимметричной нагрузке  $Q = Q_A + Q_B + Q_C$  для схемы соединения фаз нагрузки звездой или  $Q = Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CA}$  для схемы соединения треугольником. Реактивная мощность каждой фазы при этом определяется как

$$Q_{\phi} = U_{\phi}I_{\phi} \sin \varphi = X_{\phi} \cdot I_{\phi}^2.$$

В симметричном режиме:

$$Q = 3Q_{\phi} = \sqrt{3}U_{Л}I_{Л} \sin \varphi. \quad (4.15)$$

Угол  $\varphi$  в этих формулах - это угол сдвига фазного тока относительно одноименного фазного напряжения.

Полная мощность трехфазной цепи при несимметричной нагрузке определяется из выражения

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

а в симметричном режиме

$$S = 3S_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} = \sqrt{3}U_{Л}I_{Л}. \quad (4.16)$$

Мощность трехфазной цепи по аналогии с однофазной цепью может быть определена в комплексной форме. Так, для схемы соединения звездой:

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \underline{S}_A + \underline{S}_B + \underline{S}_C = \underline{U}_A \underline{I}_A^* + \underline{U}_B \underline{I}_B^* + \underline{U}_C \underline{I}_C^* = \\ &= P + jQ = (P_A + P_B + P_C) + j(Q_A + Q_B + Q_C). \end{aligned} \quad (4.17)$$

Результат расчета токов в трехфазной цепи также проверяют составлением баланса мощностей.

## 5. РАЗРАБОТКА И ВЫБОР СХЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

### 5.1 РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НАПРЯЖЕНИЕМ 1000 В

Расчет электрических нагрузок следует выполнять в следующей последовательности:

1) распределить все электроприемники по узлам нагрузок (распределительным шкафам и шинопроводам);

2) определить расчетную нагрузку по каждому узлу, а затем по участку или цеху.

Распределение всех электроприемников по узлам нагрузок предусматривает расстановку распределительных шкафов (ШР) и распределительных шинопроводов (ШС) и присоединение к ним электроприемников (ЭП), ориентируясь на их взаимное расположение. На один шкаф рекомендуется присоединять до 8-10 электроприемников, на шинопроводы - до 20-25, электроприемники мощностью свыше 100 - 120 кВт рекомендуется присоединять к низковольтному щиту трансформаторной подстанции (рисунок 5.1).

Питание подъемно-транспортных устройств (мостовых кранов, кран-балок и т.п.) должно осуществляться от внутренних питающих электрических сетей общего назначения напряжением 380/220 В переменного тока через троллейные шинопроводы или с помощью гибких кабельных токопроводов от ШР или ШС.

Расчет электрических нагрузок должен выполняться в соответствии с «Указаниями по расчету электрических нагрузок» по форме Ф63-6-92, приведенной в таблице 5.1.

Все ЭП, присоединенные к узлу, разбиваются на однородные по режиму работы подгруппы с одинаковыми значениями коэффициента использования  $K_{И}$  и коэффициента мощности  $\cos\varphi$ , которые принимаются по справочным данным приложения А1. По величине  $\cos\varphi$  определяют  $tg\varphi$ .

Исходные данные для расчета (графы 1-4) заполняются на основании полученного задания и согласно справочным материалам (графы 5, 6), в которых приведены значения коэффициентов использования и реактивной мощности для индивидуальных ЭП.

Для ЭП с повторно-кратковременным режимом работы их номинальные мощности не приводятся к длительному режиму (ПВ=100%), а записываются паспортными значениями.

Заносится в графу 2 количество ЭП по каждой группе  $n$  и определяется в целом по узлу присоединения  $\Sigma n$ .

Для каждой группы однородных ЭП (станки, сварочные установки, вентиляторы и т.п.) определяется суммарная номинальная мощность  $\Sigma P_{Н}$ . В графах 7 и 8 соответственно записываются построчно промежуточные средние величины активной и реактивной нагрузки:

$$P_{CP} = P_{Н} \cdot K_{И}, \text{ кВт}; \quad (5.1)$$

$$Q_{CP} = P_{Н} \cdot K_{И} \cdot tg\varphi, \text{ квар}. \quad (5.2)$$

В итоговой строке для узла присоединения (ШС, ШР и т.п.) определяются суммы этих величин  $\Sigma P_{Н}$ ,  $\Sigma P_{CP}$ ,  $\Sigma Q_{CP}$ .

Для узла определяется групповой коэффициент использования  $K_{И}$  и групповой тангенс  $tg\varphi$  по формулам:

$$K_{И} = \frac{\Sigma P_{CP}}{\Sigma P_{Н}}, \quad tg\varphi = \frac{\Sigma Q_{CP}}{\Sigma P_{CP}}. \quad (5.3)$$

Значения найденных величин заносятся в графы 5 и 6 итоговой строки.

Для определения эффективного числа ЭП  $n_{\text{Э}}$  в графе 9 построчно определяются для каждой характерной группы ЭП одинаковой мощности величины  $n \cdot P^2_H$ , а в итоговой строке – их суммарное значение  $\Sigma n \cdot P^2_H$ . Как правило,  $n_{\text{Э}}$  для итоговой строки определяется по выражению:

$$n_{\text{Э}} = \frac{(\Sigma P_H)^2}{\Sigma n P^2_H}. \quad (5.4)$$

Найденное значение  $n_{\text{Э}}$  округляется до ближайшего меньшего целого числа и не может быть больше фактического значения  $n$ . Если получается, что  $n_{\text{Э}} > n$ , то принимают  $n_{\text{Э}} = n$ .

В зависимости от средневзвешенного (группового) коэффициента использования  $K_H$  и эффективного числа ЭП  $n_{\text{Э}}$  определяется и заносится в графу 11 итоговой строки расчетный коэффициент  $K_P$ , который для ШС или ШР принимается по приложению А2.

Расчетная активная мощность подключенных к узлу питания ЭП (графа 12) определяется с учетом  $K_P$  по выражению:

$$P_P = K_P \cdot \Sigma P_{CP} = K_P \cdot \Sigma K_H \cdot P_H. \quad (5.5)$$

В случаях, когда расчетная мощность окажется меньше номинальной мощности наибольшего ЭП, следует принимать  $P_P = P_{H, \text{MAX}}$ .

Расчетная реактивная мощность (графа 13) для групп ЭП (ШР, ШС) определяется:

$$Q_P = 1,1 \cdot \Sigma Q_{CP} \quad \text{при } n_{\text{Э}} \leq 10; \quad (5.6)$$

$$Q_P = \Sigma Q_{CP} \quad \text{при } n_{\text{Э}} > 10; \quad (5.7)$$

Для шин цеховых ТП, а также при определении реактивной мощности в целом по участку, цеху

$$Q_P = P_P \cdot \text{tg} \varphi. \quad (5.8)$$

Расчетная полная мощность (графа 14) и расчетный ток (графа 15) находятся:

$$S_P = \sqrt{P_P^2 + Q_P^2}, \quad (5.9)$$

$$I_P = \frac{S_P}{\sqrt{3} \cdot U_H}. \quad (5.10)$$

Результаты расчетов оформляются в виде в таблицы 5.1.

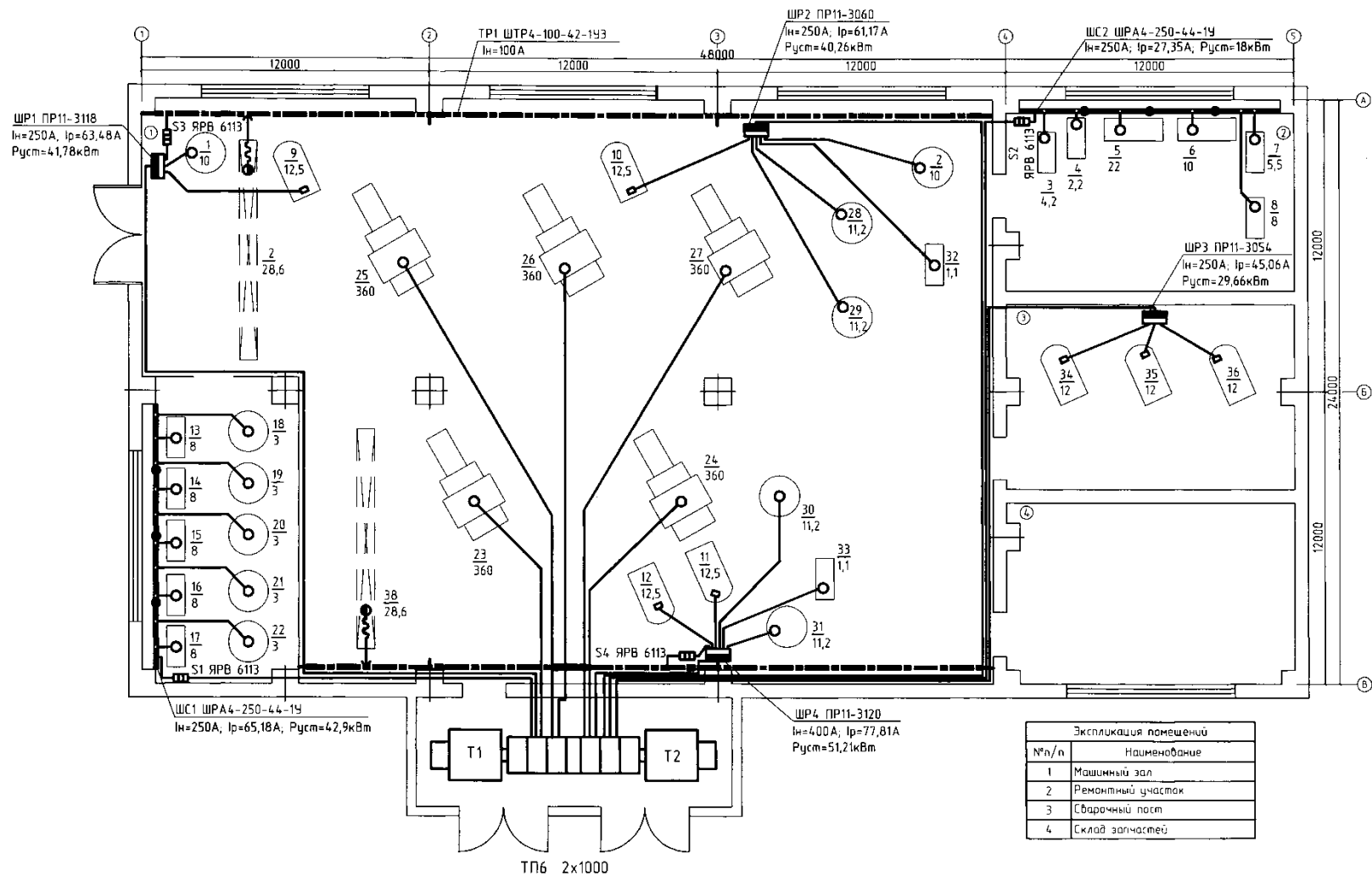


Рисунок 5.1 – План силовой распределительной сети цеха

Таблица 5.1 – Расчет электрических нагрузок цеха

Наименование электроприемников	Количество ЭП, $n$	Установленная мощность, кВт		Коэффициент использования $K_{и}$	$\cos\varphi$	$tg\varphi$	Расчетные величины			Эффективное число ЭП, $n_{э}$	Расчетный коэффициент $K_p$	Расчетная мощность			Расчетный ток $I_p, A$
		одного ЭП, $P_H, кВт$	общая $P_H, кВт$				$P_{CP}, кВт$	$Q_{CP}, квар$	$\Sigma P_H^2, кВт^2$			$P_p, кВт$	$Q_p, квар$	$S_p, кВА$	
1	2	3	4	5	6		7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>ШР1</b>															
Кран мостовой (37)	1	28,6	28,6	0,1	0,6	1,33	2,86	3,8	817,96						
Электронагреватель (9)	1	12,5	12,5	0,75	0,95	0,33	9,375	3,09	156,25						
Вентилятор (1)	1	10	10	0,65	0,8	0,75	6,5	4,88	100						
Итого по ШР1:	3	10-28,6	51,1	0,37	0,85	0,63	18,735	11,77	1074,2	2	2,12	39,72	12,947	41,78	63,48
<b>ШР2</b>															
Электронагреватель (10)	1	12,5	12,5	0,75	0,95	0,33	9,375	3,09	156,25						
Дренажные насосы (28,29)	2	11,2	22,4	0,7	0,8	0,75	15,68	11,76	250,88						
Щит сигнализации (32)	1	1,1	1,1	0,1	0,95	0,33	0,11	0,04	1,21						
Вентилятор (2)	1	10	10	0,65	0,8	0,75	6,5	4,88	100						
Итого по ШР2:	5	1,1-12,5	46	0,69	0,85	0,62	31,665	19,77	508,34	4	1,07	33,88	21,747	40,26	61,17
<b>ШР3</b>															
Сварочные агрегаты (34-36)	3	12	36	0,4	0,6	1,33	14,4	19,15	432						
Итого по ШР3:	3	12	36	0,4	0,6	1,33	14,4	19,15	432	3	1,45	20,88	21,065	29,66	45,06
<b>ШР4</b>															
Электронагреватель (11,12)	2	12,5	25	0,75	0,95	0,33	18,75	6,19	312,5						



Продолжение таблицы 5.1

1	2	3	4	5	6		7	8	9	10	11	12	13	14	15
Дренажные насосы (30,31)	2	11,2	22,4	0,7	0,8	0,75	15,68	11,76	250,88						
Щит сигнализации (33)	1	1,1	1,1	0,1	0,95	0,33	0,11	0,04	1,21						
Кран мостовой (38)	1	28,6	28,6	0,1	0,6	1,33	2,86	3,8	817,96						
Итого по ШР4:	6	1,1-28,6	77,1	0,49	0,86	0,58	37,4	21,79	1382,5	4	1,21	45,25	23,969	51,21	77,81
<b>ШС1</b>															
Электродвигатели вакуумных насосов (13-17)	5	8	40	0,7	0,8	0,75	28	21	320						
Электродвигатели задвижек (18-22)	5	3	15	0,3	0,8	0,75	4,5	3,38	45						
Итого по ШС1:	10	3-8	55	0,59	0,8	0,75	32,5	24,38	365	8	1,03	33,48	26,818	42,9	65,18
<b>ШС2</b>															
Сверлильный станок (3)	1	4,2	4,2	0,16	0,6	1,33	0,672	0,89	17,64						
Заточной станок (4)	1	2,2	2,2	0,16	0,6	1,33	0,352	0,47	4,84						
Токарно-револьверный станок (5)	1	22	22	0,16	0,6	1,33	3,52	4,68	484						
Фрезерный станок (6)	1	10	10	0,16	0,6	1,33	1,6	2,13	100						
Круглошлифовальный станок (7)	1	5,5	5,5	0,16	0,6	1,33	0,88	1,17	30,25						
Резьбонарезной станок (8)	1	8	8	0,16	0,6	1,33	1,28	1,7	64						
Итого по ШС2:	6	2,2-22	51,9	0,16	0,6	1,33	8,304	11,04	700,73	3	1,6	13,29	12,144	18	27,35
Насосные агрегаты (23-27)	5	360	1800	0,7	0,8	0,75	1260	945	648000						
Итого по цеху:	38	1,1-360	2117,1	0,66	0,8	0,75	1403	1052,9	652462,8	6	0,91	1276,7	957,55	1595,9	2424,7

## 6. РАСЧЕТ И ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ЕГО НАГРУЗОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

### 6.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ

Электродвигатели к рабочим машинам и механизмам выбирают по следующим параметрам:

- а) напряжению;
- б) роду тока (постоянный или переменный);
- в) частоте вращения;
- г) условиям окружающей среды;
- д) характеру и значению нагрузки.

Выбор электродвигателей по напряжению и роду тока сводится к применению асинхронных машин с короткозамкнутым ротором напряжением 380/220В переменного тока, так как они наиболее дешевы, просты и надежны в эксплуатации. Асинхронные электродвигатели с фазным ротором применяют сравнительно редко, главным образом, когда необходимы большой пусковой момент и пониженное значение пускового тока. Применение таких двигателей оказывается целесообразным при питании от источников малой мощности в тех случаях, когда короткозамкнутые двигатели не проходят по условиям запуска.

При выборе электродвигателя по частоте вращения нужно стремиться к тому, чтобы частота вращения двигателя была как можно ближе к частоте вращения рабочей машины, так как в этом случае электродвигатель работает с наивысшим коэффициентом мощности  $\cos \varphi$ . Однако длительная перегрузка двигателя недопустима, потому что она приводит к недоиспользованию его мощности и резкому понижению  $\cos \varphi$ , что отрицательно влияет на работу электроустановки в целом. Следовательно, при несовпадении мощности двигателя и рабочей машины следует выбирать ближайший больший по мощности двигатель.

### 6.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Основные номинальные режимы работы электродвигателей: продолжительный – S1, кратковременный – S2, повторно-кратковременный – S3.

**1. Выбор мощности двигателя для продолжительного режима.** Если момент и мощность рабочей машины не изменяется, то должен быть выбран двигатель с номинальной мощностью  $P_n$ , равной мощности нагрузки с учетом потерь:

$$P_n = \frac{P_m}{\eta}, \quad (6.1)$$

где  $P_m$  – мощность рабочей машины,  
 $\eta$  – КПД.

Нагрузка на валу электродвигателя может периодически изменяться, тогда также периодически будут меняться потери в двигателе и его температура.

Выбирая электродвигатель по нагреву, рассматривают условие, чтобы средняя температура в двигателе равнялась номинальной. Для этого необходимо, чтобы средняя мощность потерь электродвигателя, работающего с переменной нагрузкой, была равна потерям мощности при номинальной нагрузке.

Так как потери в двигателе состоят из постоянных и переменных, которые пропорциональны квадрату тока, то можно использовать формулу для определения эквивалентного тока. *За эквивалентный ток принимают некоторый постоянный по величине продолжительный ток, который вызывает такой же нагрев двигателя, как и действительный изменяющийся ток в рассматриваемый промежуток времени.*

Для ступенчато-прямоугольного графика:

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (6.2)$$

В двигателях с неизменным магнитным потоком момент электродвигателя прямо пропорционален току, и для них получим аналогичное уравнение для вычисления эквивалентного момента:

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (6.3)$$

В асинхронных двигателях мощность практически прямо пропорциональна моменту, поэтому

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (6.4)$$

Номинальный момент электродвигателя, требуемый по условиям нагрева:

$$M_{\text{н}} \geq M_{\text{э}}. \quad (6.5)$$

Номинальная мощность по условиям нагрева

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{э}}. \quad (6.6)$$

При резкопеременной нагрузке следует определить также требуемый номинальный момент по условиям перегрузки:

$$M_{\text{н(пер)}} = \frac{M_{\text{макс}}}{m_{\text{м}}}, \quad (6.7)$$

где  $M_{\text{макс}}$  – наибольший момент переменной нагрузки.

Коэффициент допустимой перегрузки для асинхронных двигателей:

$$m_{\text{м}} = 0,75 k_{\text{мин}}. \quad (6.8)$$

Из двух значений  $M_{\text{н}}$  и  $M_{\text{н(пер)}}$  выбирается большее.

Если пуск осуществляется под нагрузкой, следует проверить, обеспечит ли двигатель достаточно быстрый разгон агрегата. Для этого определяют номинальный момент двигателя по условиям пуска, учитывая, что минимальный

пусковой момент двигателя должен быть в 1,25 раза больше статического момента рабочей машины при пуске:

$$M_{н(пуск)} = \frac{1,25M_c}{k_{мин}u^2}, \quad (6.9)$$

где  $k_{мин}$  – кратность минимального пускового момента;

$u$  – напряжение во время пуска, выраженное в относительных единицах.

Для агрегатов с большим приведенным моментом инерции надо определить время пуска. Предельное время пуска для короткозамкнутых асинхронных двигателей равно 10... 15 с.

## 2. Определение мощности при кратковременном режиме работы.

Двигатели выбирают так, чтобы их номинальная мощность равнялась мощности рабочей машины при соответствующем времени работы.

Обычно для машин малой и средней мощности применяют двигатели, предназначенные для продолжительного режима. При этом по условиям нагрева за счет кратковременности работы номинальная мощность их может быть меньше мощности нагрузки.

При выборе мощности двигателя должны выполняться равенства:

$$M_n \geq M_{кр} \sqrt{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}} \quad (6.10)$$

или

$$P_n \geq P_{кр} \sqrt{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}, \quad (6.11)$$

где  $M_{кр}$ ,  $P_{кр}$  – момент и мощность нагрузки;

$t_p$  – время работы,  $T = 25 \dots 30$  мин.

Так как необходимый момент, требуемый по условиям пуска, получается обычно больше, чем момент, вычисленный по условиям нагрева, то окончательный выбор номинального момента асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором чаще приходится делать по условию обеспечения надежного пуска:

$$M_{н(пуск)} = \frac{1,25M_{кр}}{k_{мин}u^2}. \quad (6.12)$$

## 3. Определение мощности двигателя при повторно-кратковременном режиме работы.

Двигатели могут быть выбраны из серии двигателей нормального исполнения либо из серии крановых, специально предназначенных для такой работы.

Двигатели, предназначенные для повторно-кратковременного режима, рассчитаны на стандартные продолжительности работы: 0,15; 0,25; 0,40; 0,60 с длительностью цикла не более 10 мин.

При выборе двигателей мощность их принимают равной мощности нагрузки при соответствующей относительной продолжительности работы.

Если фактическая продолжительность работы рабочей машины отличается от стандартной, выполняют пересчет по формуле:

$$P_n = P \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_n}}, \quad (6.13)$$

где  $P$ ,  $ПВ$  — мощность и относительная продолжительность работы машины;  $ПВ_n$  — стандартная продолжительность работы.

Приняв  $ПВ_n=1$ , получим равенство для выбора двигателя, рассчитанного для продолжительной работы:

$$P_{дл}=P_{ПВ} \sqrt{ПВ}. \quad (6.14)$$

Эти двигатели можно выбирать так же, как это делается при продолжительной нагрузке.

**Пример 6.1** Выбрать асинхронный короткозамкнутый двигатель для привода измельчителя, установленного в цехе. Частота вращения рабочего органа машины  $\omega_m=73,5 \text{ с}^{-1}$  ( $700 \text{ мин}^{-1}$ ). Данные нагрузочной диаграммы (рисунок 6.1):  $M_1=100 \text{ Нм}$ ;  $M_2=150 \text{ Нм}$ ;  $t_1=10 \text{ мин}$ ;  $t_2=10 \text{ мин}$ ,  $t_3=120 \text{ мин}$ . Электрическая сеть 380/220 В, 50 Гц.

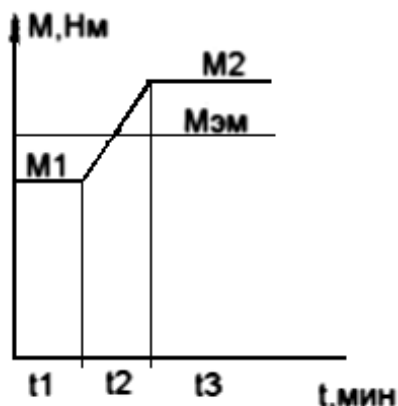


Рисунок 6.1 – Нагрузочная диаграмма измельчителя

**Решение:**

1 Определяем режим работы электропривода.

Определяем максимальную мощность измельчителя.

$$P_m = M_2 \omega_m = 150 \cdot 73,5 \text{ Вт} = 11025 \text{ Вт}.$$

$$t_p = t_1 + t_2 + t_3 = 140 \text{ мин}.$$

При  $t_p > T$  ( $140 \text{ мин} > 30 \text{ мин}$ ).

За время  $t_p=140 \text{ мин}$ , следовательно, двигатель успеет нагреться до установившейся температуры, а в период отключения успеет охладиться до температуры окружающей среды. Такой режим работы называется продолжительным и обозначается S1.

2 Определяем эквивалентные мощности машины и двигателя.

$$M_{\text{эм}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + \frac{M_1^2 + M_1 M_2 + M_2^2}{3} t_2 + M_2^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} =$$

$$= \sqrt{\frac{100^2 \cdot 10 + \frac{100^2 + 100 \cdot 150 + 150^2}{3} \cdot 10 + 150^2 \cdot 120}{140}} = 141,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Эквивалентная мощность машины за рабочий период

$$P_{\text{эм}} = M_{\text{эм}} \omega_M = 141,8 \cdot 73,5 = 10422 \text{ Вт}.$$

Эквивалентная мощность на валу двигателя

$$P_3 = \frac{P_{\text{эм}}}{\eta},$$

где  $\eta$  – КПД передачи, принимаем,  $\eta = 0,95$ .

$$P_3 = \frac{10422}{0,95} = 10970 \text{ Вт}.$$

3 Выбираем предварительно двигатель. Номинальная мощность двигателя должна быть равна или несколько больше эквивалентной мощности:

$$P_{\text{ном}} > P_3, \quad P_{\text{ном}} > 10970 \text{ Вт}.$$

По каталогу принимаем асинхронный двигатель трехфазного тока с короткозамкнутым ротором, напряжением 380/220В, типа 4А132М4, у которого  $P_{\text{ном}} = 11 \text{ кВт}$ ;  $n_{\text{ном}} = 1460 \text{ мин}^{-1}$  ( $153,3 \text{ с}^{-1}$ );  $K_{\text{мин}} = 1,7$ ;  $K_{\text{макс}} = 3,0$ .

4 Проверяем пусковые и перегрузочные свойства двигателя. Предположим, что двигатель запускается при наибольшей нагрузке  $M_2 = 150 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Определим значение момента сопротивления машины, приведенного к валу двигателя при нагрузке  $M_2$ :

$$M_{\text{см}} = \frac{M_2 \omega_M}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{150 \cdot 73,5}{153,3} = 71,9 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номинальный момент двигателя по условиям пуска с учетом снижения напряжения в сети:

$$M_{\text{н(пуск)}} = \frac{1,25 M_{\text{см}}}{k_{\text{мин}} \cdot u^2};$$

где  $k_{\text{мин}}$  — кратность минимального момента двигателя по каталогу;

$u$  – напряжение в сети во время пуска двигателя, выраженное в относительных единицах.

$$M_{\text{н(пуск)}} = \frac{1,25 \cdot 71,9}{1,7 \cdot 0,925^2} = 62,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номинальный момент двигателя:

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{11000}{153,3} = 71,75 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Из расчета,  $M_{\text{ном}} > M_{\text{н(пуск)}}$ .

Выбранный двигатель обеспечит пуск измельчителя при полной нагрузке. Проверим, не перегрузится ли двигатель, преодолевая пик нагрузки.

$$M_{н(пер)} = M_{макс} / (0,75 k_{макс}),$$

где  $M_{макс}$  – наибольший момент, взятый по нагрузочной диаграмме;

$k_{макс}$  – кратность максимального момента двигателя по каталогу.

$$M_{н(пер)} = 150 / (0,75 \cdot 3) \text{ Н}\cdot\text{м} = 66,7 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Как видно,  $M_{ном} > M_{н(пер)}$ , т.е. двигатель преодолеет эту перегрузку. Двигатель выбран верно.

Если при решении примеров получится, что  $M_{н(пуск)} > M_{ном}$  или  $M_{н(пер)} > M_{ном}$ , то следует выбрать двигатель большей мощности.

**Пример 6.2** Выбрать асинхронный короткозамкнутый двигатель для привода подъемника, установленного в мастерских. Частота вращения вала  $\omega_m = 50 \text{ с}^{-1}$ . Данные нагрузочной диаграммы (рисунок 6.2)  $M_1 = 125 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $M_2 = 100 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $t_1 = 30 \text{ с}$ ,  $t_2 = 300 \text{ с}$ . Электрическая сеть 380/220 В, 50 Гц.

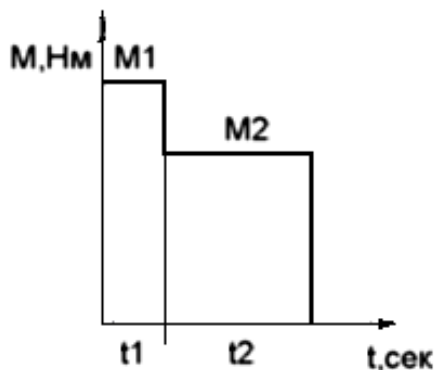


Рисунок 6.2 - Нагрузочная диаграмма подъемника

### Решение.

1 Определяем режим работы электропривода.

Для этого найдем максимальную мощность подъемника.

$$P_m = M_1 \omega_m = 125 \cdot 50 = 6250 \text{ Вт}.$$

$$t_p = t_1 + t_2 = 330 \text{ с}.$$

При этом  $t_p < T$  (330 с. < 30 мин.), электродвигатель будет работать в кратковременном режиме работы S2.

2 Определяем эквивалентные мощности подъемника и двигателя.

Эквивалентный момент подъемника:

$$M_{эм} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2}{t_1 + t_2}} = \sqrt{\frac{125^2 \cdot 30 + 100^2 \cdot 300}{330}} = 102,5 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Эквивалентная мощность подъемника за рабочий период:

$$P_{эм} = M_{эм} \omega_m = 102,5 \cdot 50 = 5125 \text{ Вт}.$$

Эквивалентная мощность на валу двигателя:

$$P_э = \frac{P_{эм}}{\eta} = \frac{5125}{0,97} = 5283 \text{ Вт.}$$

3 Выбираем двигатель.

Здесь возможны два варианта. Можно выбрать двигатель кратковременного режима работы S2, в паспорте которого указывается продолжительность работы и мощность. Стандартные продолжительности работы 10, 30, 60, 90 мин. Исходя из этого можно выбрать двигатель режима S2, у которого  $P_{ном} > P_э$  и  $t_{насп} > t_p$ . В данном случае  $P_{ном} = 5,5$  кВт и  $t_{насп} = 10$  мин. Однако такие двигатели дефицитны, и поэтому на практике часто выбирают двигатель режима S1. Номинальная мощность двигателя продолжительного режима, который будет работать в кратковременном режиме, определяется следующим образом:

$$P_{ном} = P_э \sqrt{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}},$$

где  $t_p$  – время работы двигателя в режиме S2,  $t_p = t_1 + t_2 = 330$  с;

$T$  – постоянная времени нагрева. Принимаем  $T = 30$  мин = 1800 с.

$$P_{ном} = 5,28 \sqrt{1 - 2,72^{-\frac{330}{1800}}} = 2,3 \text{ кВт.}$$

Выбираем предварительно двигатель типа 4А112МА6, у которого  $P_{ном} = 3$  кВт,  $n_{ном} = 955$  мин<sup>-1</sup>,  $k_{мин} = 1,8$ ,  $k_{макс} = 2,5$ . Проверяем пусковые и перегрузочные свойства двигателя, используя методику, показанную в примере 6.1.

## 7 РАСЧЕТ И ВЫБОР АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ И НИЗКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ

Основным методом выбора площади сечения проводников является выбор по нагреву длительным расчетным током и по условию соответствия, выбранному току аппарата защиты.

Сначала выбирается марка проводника в зависимости от характеристики среды помещения и способа прокладки сети (провода в трубе, кабель в воздухе, кабель в земле и т.д.). Затем определяются номинальные токи ЭП или расчетные токи групп ЭП и сравниваются с длительно допустимым током проводника принятой марки и условий прокладки.

В производственных помещениях наиболее распространенными способами является прокладка проводов марок АПВ, АПР в стальных тонкостенных или электросварных трубах и прокладка небронированных кабелей типа АВВГ, АВРГ, АНРГ по фермам, стенам зданий, а также на тросу внутри помещений с прокладкой и их размещением на высоте не менее 2,5 м от пола, что снижает возможность механических повреждений.

Расчет и выбор сечения проводов заключается в определении номинальных токов ЭП или расчетных токов групп ЭП и сравнении их с допустимыми токами проводов или кабелей в зависимости от способа их прокладки (приложение В).

$$I_H \leq I_{доп},$$



$$\text{или } I_P \leq I_{\text{Доп}}. \quad (7.1)$$

Допустимые токовые нагрузки на провода и кабели, а также выбор условного диаметра труб в зависимости от сечения и количества проводов приведены в приложениях В1, В2 и В3.

При определении номинальных или расчетных токов необходимо обратить внимание на то, в чем выражена мощность ЭП (в кВт или кВ·А), трехфазный или однофазный ЭП, а также подключен он на фазное или линейное напряжение.

Номинальный ток  $I_H$ , определяется по общей формуле для большинства трехфазных ЭП:

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}}, \quad (7.2)$$

$$I_H = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_H}. \quad (7.3)$$

Для многодвигательного электропривода номинальный ток равен:

$$I_H = \frac{\sum P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}}. \quad (7.4)$$

Для однофазных ЭП, подключенных на фазное напряжение,

$$I_H = \frac{P_\Phi}{U_{H.\Phi} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}}, \quad (7.5)$$

где  $P_\Phi$  – активная мощность однофазного ЭП, кВт;

$U_{H.\Phi}$  – номинальное фазное напряжение сети, кВ, например, 0,22 кВ в трехфазной сети 0,38/0,22 кВ и 0,38 кВ в трехфазной сети 0,66/0,38 кВ.

Для ЭП с двигательной нагрузкой -  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8 - 0,85$ ;

для электронагревательных приборов и печей -  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,95 - 1,0$ ;

для сварочных машин и машин контактного нагрева -  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,5 - 0,6$ ;

для сварочных трансформаторов -  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,4 - 0,5$ .

При повторно-кратковременном режиме работы ЭП ( $ПВ \leq 40\%$ ) в соответствии с ПУЭ, а также для сечения медных проводов выше 6 мм<sup>2</sup> и алюминиевых сечением выше 10 мм<sup>2</sup> применяется условие:

$$I_{\text{Доп}} \geq \frac{I_H \cdot \sqrt{ПВ}}{0,875}. \quad (7.6)$$

При сечении медных проводов менее 6 мм<sup>2</sup> и алюминиевых менее 10 мм<sup>2</sup> ПВ не учитывается.

При эксплуатации электрической сети возможны нарушения нормального режима ее работы: перегрузки, короткие замыкания, при которых ток в проводниках резко возрастает. Поэтому электрические сети должны быть надежно защищены от аварийный режимов. Согласно ПУЭ защита электрических сетей от токов КЗ должна быть предусмотрена во всех случаях.

От перегрузок необходимо защищать:

1) силовые и осветительные сети, выполненные внутри помещения открыто проложенными изолированными незащищенными проводниками с горючей изоляцией;

2) силовые сети при длительных технологических перегрузках;

3) сети в пожаро- или взрывоопасных помещениях.

Для защиты сетей до 1000 В следует отдавать предпочтение автоматическим выключателям с тепловым или комбинированным расцепителем.

Автоматические воздушные выключатели предназначены для автоматического размыкания электрических цепей при КЗ и перегрузках, для редких оперативных переключений при нормальных режимах.

При защите сетей от перегрузки автоматическими выключателями номинальные токи тепловых, полупроводниковых или комбинированных расцепителей следует выбирать по условию:

$$I_{Н.РАСЦ.Т(К)} \geq k_H I_H, \\ \text{или } I_{Н.РАСЦ.Т(К)} \geq k_H I_P, \quad (7.7)$$

где  $k_H$  – коэффициент надежности;

$I_H$  – номинальный ток электроприемника;

$I_P$  – расчетный ток группы электроприемников.

Значения коэффициентов  $k_H$  принимаются:

$k_H = 1,05$  – для ЭП без пусковых токов;

$k_H = 1,2$  – для сварочного оборудования;

$k_H = 1,2 \div 1,35$  – для ЭП с пусковыми токами в зависимости от типа автоматических выключателей (1,2 – для серий АЕ20, АЗ700; 1,25 – для АЗ100, АП50; 1,35 – для серии ВА).

В зависимости от вида защиты (от токов КЗ или от перегрузки) ПУЭ устанавливает соотношение между токами защитных аппаратов  $I_3$  (предохранителей или выключателей) и допустимым током провода  $I_{ДОП}$ .

$$I_{ДОП} \geq K_{ЗАЩ} I_3. \quad (7.8)$$

Для сетей, защищаемых от перегрузки выключателями с тепловыми или комбинированными расцепителями, коэффициент защиты принимается равным  $K_3 = 1,0$ .

Условие защиты сети выключателями от перегрузки принимает вид:

$$I_{ДОП} \geq I_{Н.РАСЦ.К(Т)}. \quad (7.9)$$

Расчет удобнее выполнить в виде таблицы 7.1.

Выбор распределительных шинпроводов осуществляется по расчетному току группы электроприемников. Условие выбора принимает вид:

$$I_H \geq I_P, \quad (7.10)$$

где  $I_H$  – номинальный ток распределительного шинпровода;

$I_P$  – расчетный ток группы электроприемников.

Выбор силовых шкафов и пунктов выполняют по степени защиты в зависимости от характера среды в цехе, от его комплектации — предохранителями или автоматическими выключателями.

Номинальный ток силового пункта  $I_H$  должен быть больше расчетного тока  $I_P$  группы приемников:

$$I_H \geq I_P, \quad (7.11)$$

где  $I_H$  — номинальный ток распределительного шкафа (пункта);

$I_P$  — расчетный ток группы электроприемников.

Число присоединений к силовому пункту и их токи не должны превышать числа отходящих от силового пункта линий и их допустимые токи:

$$N_{ПРИС} \leq N_{ЛИН}, \quad (7.12)$$

$$I_H \leq I_{ЛИН}, \quad (7.13)$$

где  $I_H$  — номинальный ток электроприемника;

$I_{ЛИН}$  — номинальный ток линии распределительного шкафа (пункта).

Выбор ящиков с рубильниками или пакетными выключателями выполняют, по степени защиты в зависимости от характера среды в цехе, от его комплектации.

Условие выбора принимает вид:

$$I_H \geq I_P, \quad (7.14)$$

где  $I_H$  — номинальный ток ящика;

$I_P$  — расчетный ток группы или одного электроприемника.

Рассмотрим пример выбора аппаратов защиты и проводников для отдельных ЭП.

Для токарно-револьверного станка (поз.5) мощностью 22 кВт номинальный ток рассчитывается по формуле:

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \varphi_{ном}} = \frac{22}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,85} = 39,4 \text{ А.}$$

Токарно-револьверный станок (поз. 5) получает питание от распределительного шинпровода ШС2 типа ШРА4-250-441У. Шинопроводы типа ШРА4-250-441У комплектуются автоматическими выключателями А3710, номинальный ток выключателя  $I_H=160$  А, номинальный ток теплового расцепителя  $I_{H.РАСЦ.Т}=16-160$  А, АЕ2050 номинальный ток выключателя  $I_H=100$  А, номинальный ток теплового расцепителя  $I_{H.РАСЦ.Т} =16-100$  А. Для защиты сети от перегрузки принимается автоматический выключатель типа АЕ2050 с меньшим номинальным током.

По приложению Г принимается ближайшее стандартное значение номинального тока теплового расцепителя 50 А по условию:

$$I_{H.РАСЦ.Т(К)} \geq \kappa_H I_H = 1,2 \cdot 39,4 = 47,3 \text{ А.}$$

Таблица 7.1 – Выбор аппаратов защиты, проводов и кабелей

Номер на плане	Наименование ЭП	Номинальная мощность ЭП, $P_H$ , кВт, расчетная мощность группы ЭП, $S_P$ , кВА	Номинальный ток ЭП, $I_H$ , расчетный ток группы ЭП, $I_P$ , А	Тип аппарата защиты ток номинал.	Ток расцепителя ток плавкой вставки, А		Марка, сечение проводника, способ прокладки	Ток допустимый провода (кабеля), $I_{Доп}$ , А
					расчетный	номинальный $I_H$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,2	Вентилятор	10	18	<u>AE2066</u> 160 А	21,6	25	<u>АПВ 4(1×6)</u> Т20	30
3	Сверлильный станок	4,2	7,5	<u>AE2050</u> 100 А	9	16	<u>АПВ 4(1×2,5)</u> Т15	19
4	Заточной станок	2,2	4	<u>AE2050</u> 100 А	4,8	16	<u>АПВ 4(1×2,5)</u> Т15	19
5	Токарно-револьверный станок	22	39,4	<u>AE2050</u> 100 А	47,3	50	<u>АПВ4(1×16)</u> Т32	55
6	Фрезерный станок	10	18	<u>AE2050</u> 100 А	21,6	25	<u>АПВ4(1×6)</u> Т20	30
7	Круглошлифовальный станок	5,5	9,8	<u>AE2050</u> 100 А	12	16	<u>АПВ 4(1×2,5)</u> Т15	19
8	Резьбонарезной станок	8	14,3	<u>AE2056</u> 100 А	17	25	<u>АПВ4(1×6)</u> Т20	30
9-12	Электронагреватели	12,5	19	<u>AE2066</u> 160 А	22,8	25	<u>АПВ4(1×6)</u> Т20	30
13-17	Электродвигатели вакуумных насосов	8	14,3	<u>ПН2-100</u> 100 А	43	50	<u>АПВ 4(1×2,5)</u> Т15	19
18-22	Электродвигатели задвижек	3	5,4	<u>ПН2-100</u> 100 А	16,1	30	<u>АПВ 4(1×2,5)</u> Т15	19
23-27	Насосные агрегаты	360	643	<u>ВА53-41</u> 1000 А	868	1000	<u>4ВВГ 4×150</u> Открыто	1100

Продолжение таблицы 7.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
28-31	Дренажные насосы	11,2	20	<u>АЕ2060</u> 160 А	24	25	<u>АПВ 4(1×6)</u> Т20	30
32,33	Щит сигнализации	1,1	2,0	<u>АЕ2040</u> 63 А	2,4	16	<u>АПВ 4(1×2,5)</u> Т15	19
34-36	Сварочные агрегаты	12	30,39	<u>АЕ2040</u> 63 А	36,4	40	<u>АПВ4(1×16)</u> Т32	55
37,38	Кран мостовой	28,6	51	<u>АЕ2060</u> 160 А	61,2	63	<u>ВВГ 4×16</u> открыто	68
ШР1	Шкаф распределительный ПР11-3118	41,8	63,5	<u>ВА57-35</u> 250 А	86	100	<u>АВВГ 4×50</u> открыто	100
ШР2	Шкаф распределительный ПР11-3060	40,3	61,2	<u>ВА57-35</u> 250 А	83	100	<u>АВВГ 4×50</u> открыто	100
ШР3	Шкаф распределительный ПР11-3054	29,66	45,1	<u>ВА57-35</u> 250 А	61	80	<u>АВВГ 4×35</u> открыто	81
ШР4	Шкаф распределительный ПР11-3120	51,21	77,81	<u>ВА57-35</u> 250 А	100	100	<u>АВВГ 4×50</u> открыто	100
ШС1	Шинопровод распределительный ШРА4-250-44	42,9	65,18	<u>ВА57-35</u> 250 А	88	100	<u>АВВГ 4×50</u> открыто	100
ШС2	Шинопровод распределительный ШРА4-250-44	18	27,5	<u>ВА57-35</u> 250 А	37	80	<u>АВВГ 4×35</u> открыто	81

По приложению В1 и В3 выбирается для подключения станка четыре алюминиевых провода сечением  $16 \text{ мм}^2$  в металлической трубе диаметром 32 мм - АПВ4(1х16) Т32.

Условие выбора провода –  $I_{\text{ДОП}} = 55 \text{ А} \geq I_{\text{Н}} = 39,4 \text{ А}$ .

Условие защиты сети от перегрузки выполняется, если:

$I_{\text{ДОП}} = 55 \text{ А} \geq I_{\text{Н.РАСЦ.Т}} = 50 \text{ А}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербаков Е.Ф. Электроснабжение и электропотребление в строительстве [Электронный ресурс] : учебное пособие / Е.Ф. Щербаков, Д.С. Александров, А.Л. Дубов. – Электрон. дан. – СПб. : Лань, 2012. – 512 с.
2. Электротехника и электроника: Учебное пособие для вузов / Ред. В.В. Кононенко. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 784с.
3. Иванов И.И., Соловьев Г.И., Фролов В.Я. Электротехника и основы электроники: Учебник. 7-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2012. – 736 с
4. Справочник современного проектировщика / Г.Б. Вержбовский, Ю.А. Веселев, В.В. Лагутин, Э.Б. Лукашевич ; под общ. ред. Л.Р. Маиляна. – 7-е изд. – Ростов-н/Д : Феникс, 2011. – 544 с.
5. Шеховцов В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению: [Текст]: / В.П. Шеховцов. – М.: ФОРУМ: ИНФРА – М, 2009.-136с.
6. Киреева Э.А. Электроснабжение и электрооборудование промышленных предприятий: [Текст]: Учебное пособие / Э.А. Киреева. М.: КНОРУС, 2011. – 368 с.
7. Гетманов В.Т. Электротехника: Курс лекций (часть I): Учебное пособие для студентов неэлектрических специальностей всех форм обучения. – Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2011. – 135 с.
8. Нормативные основы устройства и эксплуатации электроустановок: [Текст]: – Нормативно-технический сборник. – Барнаул, 2002. – 976 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Приложение А1 – Коэффициенты использования и мощности некоторых приемников и потребителей электроэнергии

Потребитель электроэнергии	Коэффициент	
	исполь- зования $K_u$	мощности $\cos\varphi$
1	2	3
Металлорежущие станки с нормальным режимом работы	0,14	0,6
То же при крупносерийном производстве	0,16	0,65
То же при тяжелом режиме работы	0,2-0,25	0,65
Поточные линии, станки с ЧПУ	0,6	0,7
Переносной электроинструмент	0,06	0,65
Вентиляторы, санитарно-техническая вентиляция, эксгаустеры	0,6-0,7	0,8-0,85
Насосы, компрессоры, двигатель-генераторы	0,7-0,8	0,8-0,85
Краны, тельферы, кран-балки при ПВ=25%	0,06	0,5
То же при ПВ=40%	0,1	0,5
Транспортеры, конвейеры	0,5-0,6	0,7-0,8
Сварочные трансформаторы дуговой сварки	0,25-0,3	0,4-0,5
Приводы молотов, ковочных машин, прессов, волочильных станков, очистных барабанов, бегунов и др.	0,25-0,3	0,65
Элеваторы, шнеки, несблокированные конвейеры мощностью до 10 кВт	0,4-0,5	0,6-0,7
То же мощностью выше 10 кВт	0,55-0,75	0,7-0,8
Однопостовые сварочные двигатель-генераторы	0,3	0,6
То же многопостовые	0,5	0,7
Сварочные машины шовные	0,25	0,7
То же стыковые и точечные	0,3-0,35	0,6
Сварочные дуговые автоматы	0,35	0,5
Печи сопротивления с автоматической загрузкой изделий	0,75-0,8	0,95
Печи сопротивления с неавтоматической загрузкой изделий	0,5	0,95
Вакуум-насосы	0,95	0,85
Вентиляторы высокого давления	0,75	0,85
Вентиляторы к дробилкам	0,4-0,5	0,75



Продолжение приложения А1

1	2	3
Газодувки (аглоэкстаустеры) при синхронных двигателях	0,6	0,8-0,9
То же при асинхронных двигателях	0,8	0,8
Молотковые дробилки	0,8	0,85
Шаровые мельницы	0,8	0,8
Грохоты	0,5-0,6	0,6-0,7
Смесительные барабаны	0,6-0,7	0,8
Чашевые охладители	0,7	0,85
Сушительные барабаны и сепараторы	0,6	0,7
Электрофильтры	0,4	0,85
Сушильные шкафы	0,75-0,8	1,0
Вагоноопрокидыватели	0,6	0,5
Грейферные краны	0,2	0,6
Лампы накаливания. Освещение лампами накаливания	0,85-0,9	1,0
Люминесцентные лампы	0,85-0,9	0,8-0,9
Выпрямители для гальванических ванн	0,8	0,8
Установки ВЧ нагрева (ТВЧ)	0,65	0,7
Пресс с электрообогревателем	0,25	0,95
Станок для обработки пластмасс	0,2	0,65
Термопластавтомат	0,5	0,95
Сталеплавильные печи	0,7	0,85
Лабораторное оборудование	0,25	0,75
Прокатные станы	0,4	0,85
Сварочная машина 1ф. ПВ=20%	0,35	0,6
Сварочная машина 1ф. ПВ=50%	0,25	0,7
Сварочные трансформаторы. ПВ=65%	0,3	0,4
Муфельная печь 1ф	0,7	1,0
Соляная печь	0,7	0,95
Термобарокамера	0,7	0,8
Вибрационная машина	0,3	0,8
Литейная машина	0,3	0,8
Молот	0,4	0,7
Заточный, расточный станок	0,17	0,65
Ножницы роликовые	0,45	0,65

Таблица А2 – Значения коэффициентов расчетной нагрузки  $K_R$  для питающих сетей напряжением до 1000 В (сети к ШР, ШС, ПР и т.п.)

Эффективное число ЭП $n_{\Sigma}$	Коэффициент использования $K_u$								
	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
1	8,00	5,33	4,00	2,67	2,00	1,60	1,33	1,14	1,0
2	6,22	4,33	3,39	2,45	1,98	1,60	1,33	1,14	1,0
3	4,05	2,89	2,31	1,74	1,45	1,34	1,22	1,14	1,0
4	3,24	2,35	1,91	1,47	1,25	1,21	1,12	1,06	1,0
5	2,84	2,09	1,72	1,35	1,16	1,16	1,08	1,03	1,0
6	2,64	1,96	1,62	1,28	1,11	1,13	1,06	1,01	1,0
7	2,49	1,86	1,54	1,23	1,12	1,10	1,04	1,0	1,0
8	2,37	1,78	1,48	1,19	1,10	1,08	1,02	1,0	1,0
9	2,27	1,71	1,43	1,16	1,09	1,07	1,01	1,0	1,0
10	2,18	1,65	1,39	1,13	1,07	1,05	1,0	1,0	1,0
11	2,11	1,61	1,35	1,1	1,06	1,04	1,0	1,0	1,0
12	2,04	1,56	1,32	1,08	1,05	1,03	1,0	1,0	1,0
13	1,99	1,52	1,29	1,06	1,04	1,01	1,0	1,0	1,0
14	1,94	1,49	1,27	1,05	1,02	1,0	1,0	1,0	1,0
15	1,89	1,46	1,25	1,03	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
16	1,85	1,43	1,23	1,02	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
17	1,81	1,41	1,21	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
18	1,78	1,39	1,19	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
19	1,75	1,36	1,17	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
20	1,72	1,35	1,16	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
21	1,69	1,33	1,15	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
22	1,67	1,31	1,13	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
23	1,64	1,3	1,12	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
24	1,62	1,28	1,11	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
25	1,6	1,27	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
30	1,51	1,21	1,05	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
40	1,4	1,13	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
50	1,3	1,07	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
70	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
100	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б – Технические данные асинхронных электродвигателей трёхфазного тока с короткозамкнутым ротором серии 4А мощностью от 0,75 до 55 кВт

Тип двигателя	При номинальной нагрузке					Кратность пускового тока	Кратность моментов		
	Мощность, кВт	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Сила тока статора, А	КПД, %	Коэффициент мощности, cos φ		пускового	максимального	минимального
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4A71A2Y3	0,75	2840	1,7	77,0	0,87	5,5	2,0	2,2	1,5
4A71B2Y3	1,1	2810	2,5	77,5	0,87	5,5	2,0	2,2	1,5
4A80A2Y3	1,5	2850	3,3	81,0	0,85	6,5	2,1	2,6	1,4
4A80B2Y3	2,2	2850	4,7	83,0	0,87	6,5	2,1	2,6	1,4
4A90L2Y3	3,0	2840	6,1	84,5	0,88	6,5	2,1	2,5	1,6
4A100S2Y3	4,0	2880	7,8	86,5	0,89	7,5	2,0	2,5	1,6
4A100L2Y3	5,5	2880	10,5	87,5	0,91	7,5	2,0	2,5	1,6
4A112M2Y3	7,5	2900	14,9	87,5	0,88	7,5	2,0	2,8	1,8
4A132M2Y3	11,0	2900	21,2	88,0	0,90	7,5	1,7	2,8	1,5
4A160S2Y3	15,0	2940	28,5	88,0	0,91	7,0	1,4	2,2	1,0
4A160M2Y3	18,5	2940	34,5	88,5	0,92	7,0	1,4	2,2	1,0
4A180S2Y3	22,0	2945	41,6	88,5	0,91	7,5	1,4	2,5	1,1
4A180M2Y3	30,0	2945	56,0	90,5	0,90	7,5	1,4	2,5	1,1
4A200M2Y3	37,0	2945	70,0	90,0	0,89	7,5	1,4	2,5	1,0
4A200L2Y3	45,0	2945	83,8	91,0	0,90	7,5	1,4	2,5	1,0
4A225M2Y3	55,0	2945	100	91,0	0,92	7,5	1,4	2,5	1,2
4A71B4Y3	0,75	1390	2,17	72,0	0,73	4,5	2,0	2,2	1,8
4A80A4Y3	1,1	1420	2,76	75,0	0,81	5,0	2,0	2,2	1,6
4A80B4Y3	1,5	1415	3,57	77,0	0,83	5,0	2,0	2,2	1,6
4A90L4Y3	2,2	1425	5,0	80,0	0,83	6,0	2,1	2,4	1,6
4A100S4Y3	3,0	1435	6,7	82,0	0,83	6,0	2,0	2,4	1,6
4A100L4Y3	4,0	1430	8,6	81,0	0,84	6,0	2,0	2,4	1,6
4A112M4Y3	5,5	1445	11,5	85,5	0,85	7,0	2,0	2,2	1,6

Продолжение таблицы Б

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4A132S4Y3	7,5	1455	11,1	87,5	0,86	7,5	2,2	3,0	1,7
4A132M4Y3	11,0	1460	22,0	87,5	0,87	7,5	2,2	3,0	1,7
4A160S4Y3	15,0	1465	29,3	88,5	0,88	7,0	1,4	2,3	1,0
4A160M4Y3	18,5	1465	35,7	89,5	0,88	7,0	1,4	2,3	1,0
4A180S4Y3	22,0	1470	41,3	90,0	0,90	6,5	1,4	2,3	1,0
4A180M4Y3	30,0	1470	56,0	91,0	0,89	6,6	1,4	2,3	1,0
4A200M4Y3	37,0	1475	68,8	91,0	0,90	7,0	1,4	2,5	1,0
4A200L4Y3	45,0	1475	82,6	92,0	0,90	7,0	1,4	2,5	1,0
4A225M4Y3	55,0	1480	100	92,5	0,90	7,0	1,3	2,5	1,0
4A80A6Y3	0,75	915	2,24	69,0	0,74	4,0	2,0	2,2	1,6
4A80B6Y3	1,1	920	3,05	74,0	0,74	4,0	2,0	2,2	1,6
4A90L6Y3	1,5	935	4,1	75,0	0,74	4,5	2,0	2,2	1,7
4A100L6Y3	2,2	950	5,65	81,0	0,73	5,0	2,0	2,2	1,6
4A112MA6Y3	3,0	955	7,4	81,0	0,76	6,0	2,0	2,5	1,8
4A112MB6Y3	4,0	950	9,13	82,0	0,81	6,0	2,0	2,5	1,8
4A132S6Y3	5,5	965	12,2	85,0	0,80	6,5	2,0	2,5	1,8
4A132M6Y3	11,0	870	16,5	85,5	0,81	6,5	2,0	2,5	1,0
4A160S6Y3	7,5	975	22,6	87,5	0,86	6,0	1,2	2,0	1,0
4A160M6Y3	15,0	970	30,0	86,0	0,87	6,0	1,2	2,0	1,8
4A180M6Y3	18,0	975	36,6	88,0	0,87	5,0	1,2	2,0	1,0
4A200M6Y3	22,0	975	41,3	90,0	0,90	6,5	1,3	2,4	1,0
4A200L6Y3	30,0	980	56,0	90,0	0,90	6,5	1,3	2,4	1,0
4A225M6Y3	37,0	980	69,4	90,5	0,89	6,5	1,2	2,3	1,0
4A250S6Y3	45,0	985	84,0	91,0	0,89	6,5	1,2	2,1	1,0
4A250M6Y3	55,0	985	103	91,5	0,89	6,5	1,2	2,1	1,0

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В1 – Длительно допустимый ток  $I_{дон}$  для проводов и кабелей на напряжение 1кВ с алюминиевыми жилами при окружающей температуре воздуха 25°С и земли 15°С

Группа проводников	Провода с резиновой и пластмассовой изоляцией						Кабели и защищенные провода с резиновой и пластмассовой изоляцией						Кабели с бумажной пропитанной изоляцией					
Марка	АПР - АПРВ - АПВ						АВРГ-АНРГ-АВВГ-АВРВГ			АВВБ-АНРБ-АВРБ			ААГ-АСГ-ААБГ-АСБГ			ААБ-АСБ		
Способ прокладки	открыто	в стальных трубах					в воздухе			в земле			в воздухе			в земле		
Сечение, мм <sup>2</sup>	$I_{дон}, A$	$I_{дон}, A$ , при числе проводов, равном					$I_{дон}, A$ , при числе жил (одножильных проводов), равном											
	-	2	3	4	5-6	7-9	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4
2,5	24	20	19	19	15	14	21	19	17	34	29	26	23	22	-	35	31	-
4	32	28	28	23	22	21	29	27	24	42	38	35	31	29	27	46	42	38
6	39	36	32	30	26	24	38	32	29	55	46	42	42	35	35	60	55	46
10	60	50	47	39	38	35	55	42	38	80	70	63	55	46	45	80	75	65
16	75	60	60	55	48	45	70	60	54	105	90	81	75	60	60	110	90	90
25	105	85	80	70	65	60	90	75	68	135	115	104	100	80	75	140	125	115
35	130	100	95	85	75	70	105	90	81	160	140	126	115	95	95	175	145	135
50	165	140	130	120	105	95	135	110	100	205	175	158	140	120	110	210	180	165
70	210	175	165	140	130	125	165	140	126	245	210	190	175	155	140	250	220	200
95	255	215	200	175	-	-	200	170	153	295	255	230	210	190	165	290	260	240
120	295	245	220	200	-	-	230	200	190	340	295	266	245	220	200	335	300	270
150	340	275	255	-	-	-	270	235	212	390	335	302	290	255	230	385	335	305
185	390	-	-	-	-	-	310	270	243	440	385	347	-	290	260	-	380	345

Таблица В2 – Длительно допустимый ток  $I_{доп}$  для проводов и кабелей на напряжение 1кВ с медными жилами при окружающей температуре воздуха 25°С и земли 15°С

Группа проводников	Провода с резиновой и пластмассовой изоляцией						Кабели и защищенные провода с резиновой и пластмассовой изоляцией						Кабели с бумажной пропитанной изоляцией					
Марка	ПР - ПРВ - ПВ						ВРГ-НРГ-ВВГ- ВРБГ- НРБГ			ВВБ – НРБ – ВРБ			АГ- СГ- АБГ- СБГ			АБ - СБ		
Способ прокладки	открыто	в стальных трубах					в воздухе			в земле			в воздухе			в земле		
Сечение, мм <sup>2</sup>	$I_{доп}$ , А	$I_{доп}$ , А, при числе проводов, равном					$I_{доп}$ , А, при числе жил (одножильных проводов), равном											
	-	2	3	4	5-6	7-9	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4
1,5	23	19	17	16	15	14	19	19	17	33	27	24	-	-	-	-	-	-
2,5	30	27	25	25	20	19	27	25	22	44	38	34	30	28	-	45	40	-
4	41	38	35	30	28	26	38	35	31	55	49	44	40	37	35	60	55	50
6	50	46	42	40	34	31	50	42	38	70	60	54	55	45	45	80	70	60
10	80	70	60	50	48	45	70	55	50	105	90	81	75	60	60	105	95	85
16	100	85	80	75	64	60	90	75	68	135	115	103	95	80	80	140	120	115
25	140	115	100	90	80	75	115	95	85	175	150	135	130	105	100	185	160	150
35	170	135	125	115	100	95	140	120	108	210	180	162	150	125	120	225	190	175
50	215	185	170	150	135	125	175	145	130	265	225	202	185	155	145	270	235	215
70	270	225	210	185	165	155	215	180	162	320	275	247	225	200	185	325	285	265
95	330	275	255	225	-	-	260	220	200	385	330	300	275	245	215	380	340	310
120	385	315	290	260	-	-	300	260	234	445	385	347	320	285	260	435	390	350
150	440	360	330	300	-	-	350	305	275	505	435	392	375	330	300	500	435	395

Таблица В3 – Условный проход стальных и пластмассовых труб, мм,  
в зависимости от числа, марки и сечения проводников

Сечение, мм <sup>2</sup>	Одножильные провода ПРТО, АПРТО, ПВ, АПВ, ПР, АПР, ПРВ, АПРВ при числе проводов, равном							Кабели АВВГ с сечением жил 25 мм <sup>2</sup> и выше при числе жил, равном			Кабели АВВБ с жилами 25 мм <sup>2</sup> и выше при числе жил, равном 4	Кабели АВВГ до 16 мм <sup>2</sup> и ВВГ при числе жил, равном			Кабели АВВБ до 15 мм <sup>2</sup> и ВВБ при числе жил, равном 4	
	2	3	4	5	6	7	8	2	3	4		2	3	4		
1,5	15	15	15	15+	20-	20	20									
2,5	15	15	15+	20-	20	20	20					25-	25+			
4	15	15	15+	20	20	20+	25-					25+	25+	25+	40+	
6	15	15+	20	20+	20+	25	25					25+	25+	32-	40+	
10	20	20+	25+	32-	32-	32+	32					32-	32+	32+	50-	
16	25	25+	32-	32	32+	40+	40					32+	32+	40-	50+	
25	32-	32	32+	40+	50-	50	50	40+	50+	70-	70+	32+	40+	40+	50+	
35	32	32+	40+	50-	50	50+	70-	50-	70-	70-	80+	32+	40+	40+	70-	
50	40-	40-	50	50+	70-	70	70			70+	80+			50+	70	
70	50	50	70-	70	70+	80-	80			70+	100			50+	70+	
95	70-	70-	70+							80+				70-	70+	
120	70	70	80-							100-				70	80+	
150	70	70+	80+											70+	80+	
185	80-	80+	100-													

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г1 – Технические данные автоматических выключателей серии АЕ2000

Тип	Номинальный ток, $I_n, A$	Номинальный ток тепловых и комбинированных расцепителей, $I_{н.расц}, A$	Уставка срабатывания тока отсечки в кратности к $I_{н.расц}$	Пределы регулирования по току срабатывания теплового расцепителя	Предельная коммутационная способность, $kA$
выключатели с комбинированными расцепителями					
АЕ2046	63	10; 12,5	12	0,9 – 1,15	2
		16; 20; 25			2,5 - 3
		31,5; 40; 50;63			6
АЕ2056	100	16; 20; 25	12	0,9 – 1,15	3
		31,5; 40;			6
		50; 63; 80; 100			9
АЕ2066	160	16; 20; 25	12	0,9 – 1,15	3 - 6
		31,5; 40;50,63			
		80; 100; 125; 160			

Таблица Г2 – Технические данные серии ВА51

Тип	Номинальный ток, $I_n, A$	Номинальный ток расцепителя с обратозависимой характеристикой, $I_{н.расц}, A$	Уставка срабатывания тока отсечки в кратности к $I_{н.расц}$	Уставка по времени срабатывания в зоне КЗ, $c$	Предельная коммутационная способность, $kA$
выключатели с комбинированными расцепителями					
ВА51-31	100	6,3; 8,0;	3; 7; 10		2
ВА51Г-31		10; 12,5;			2,5
		16; 20; 25;			3,8
		31,5; 40; 50;63;			6,0
	80; 100	7,0			
ВА51-33 ВА51Г-33	160	80; 100; 125; 160	10		12,5
ВА51-35	250	80;	12		10
		100; 125;			8
		160; 200; 250			6
ВА51-37	400	250; 320; 400	10		25
ВА51-39	630	400; 500; 630	10		35



Таблица Г3 – Шкафы навесные распределительные для силовых установок переменного тока ПР8501 – 1000

Номер схемы шкафа при номинальном токе 630 А				Число и тип выключателей на отходящих линиях	
без выключателей на вводе с зажимами	с выключателем на вводе			ВА51-31	ВА51-35
	ВА51-39	ВА55-39	ВА56-39	с расцепителями на токи	
				16-100 А	100-250 А
149	090	115	140	6	-
150	091	116	141	8	-
151	092	117	142	10	-
152	093	118	143	12	-
153	094	119	144	-	4
154	095	120	145	2	2
155	096	121	146	4	2
156	097	122	147	6	2
157	098	123	148	8	2

Таблица Г4 – Технические характеристики комплектных распределительных шинопроводов ШРА4 для сетей с глухозаземленной нейтралью напряжением 380/220 В

Характеристика	Тип шинопровода			
	ШРА4-250-44-ІУ	ШРА4-400-44-ІУ	ШРА4-630-44-ІУ	ШРА4-100-44-ІУ
Номинальный ток, А	250	400	630	100
Электродинамическая стойкость (амплитудное значение), кА,	15	25	35	10
Термическая стойкость, кА	7	10	14	7
Сопротивление на фазу, мОм/м:				
активное	0,21	0,15	0,10	0,27
индуктивное	0,21	0,17	0,13	0,28
Степень защиты	IP44	IP44	IP44	IP44
Типы автоматических выключателей, установленных в ответвительных коробках (ток, А)	A3710 (160); A3120 (100); AE2050 (100) BA51-33 (100)	A3710 (160); A3720 (250); A3120 (100); AE2050 (100) BA51-33 (100)	A3710 (160); A3720 (250); A3120 (100); AE2050 (100) BA51-33 (100)	AE 2033 (25) BA51-25 (25)

Таблица Г5 – Шкафы распределительные для силовых установок переменного тока ПР11 с автоматическими выключателями серии АЕ2046, АЕ2066

Тип шкафа при исполнении		Номинальный ток шкафа, $I_N$ , А	Тип выключателя на вводе	Количество линейных выключателей
навесном	напольном			
Шкафы с линейными выключателями АЕ2046				
ПР11-3047	-	100	-	2
ПР11-3048	-		АЕ2066	2
ПР11-3053	-	250	-	4
ПР11-3054	-		А3726 ФУЗ	4
ПР11-3059	-	250	-	6
ПР11-3060	-		А3726 ФУЗ	6
ПР11-3067	-	250	-	8
ПР11-3068	-		А3726 ФУЗ	8
ПР11-3077	ПР11-7077	250	-	10
ПР11-3078	ПР11-7078		А3726 ФУЗ	10
ПР11-3089	-	400	-	6
ПР11-3090			А3726ФУЗ или А3796НУЗ	6
ПР11-3090	-	400	А3726ФУЗ или А3796НУЗ	6
ПР11-3097	-		-	8
ПР11-3098	-	400	А3726ФУЗ или А3796НУЗ	8
ПР11-3107	-		-	10
ПР11-3108	-	400	А3726ФУЗ или А3796НУЗ	10
Шкафы с линейными выключателями АЕ2066				
ПР11-3117	-	250	-	4
ПР11-3118	-		А3726 ФУЗ	4
ПР11-3119	ПР11-7119	400	-	6
ПР11-3120	ПР11-7120		А3736ФУЗ или А3796НУЗ	6
ПР11-3121	ПР11-7121	630	-	8
ПР11-3122	ПР11-7122		А3736ФУЗ или А3796НУЗ	8
-	ПР11-7123	630	-	12
	ПР11-7124		А3736ФУЗ или А3796НУЗ	12



Балашов Олег Петрович

## Электроснабжение

Методические указания к выполнению практических работ  
для студентов, обучающихся по направлению «Строительство»

Редактор Е.Ф. Изотова

Подписано в печать 25.12.17. Формат 60x84/16.  
Усл. печ. л. 4,62. Тираж 25 экз. Заказ 171654. Рег. № 38.

Отпечатано в ИТО Рубцовского индустриального института  
658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6.