

**Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
МИНИСТЕРСТВА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»**

Кафедра «Электротехника»

**ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
(ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНЫЕ И КУРСОВУЮ РАБОТЫ ДЛЯ
СТУДЕНТОВ ЗАОЧНОГО ФАКУЛЬТЕТА)**

Методические указания

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2004**

ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания предназначены для самостоятельной подготовки студентов-заочников к выполнению контрольных работ по расчету цепей переменного тока, а также курсовой работы по расчету электроснабжения объектов строительства.

Перед выполнением работ необходимо проработать соответствующие разделы учебников, в частности [1], и изучить материал данных методических указаний.

В соответствии с учебными планами, действующими с 2000 года, студенты строительных специальностей ПГС, ВиВ и ЗОС выполняют по дисциплине «Электротехника и электроника» две контрольные работы, а специальностей СЖД и МиТ – курсовую работу. Студенты специальности УПП выполняют три контрольные работы.

В данных методических указаниях приведены варианты задач по расчету и анализу цепей однофазного и трехфазного тока, оформленные в виде двух контрольных работ.

В первую контрольную работу включены задачи по расчету цепей однофазного тока двумя методами: параметрическим и символическим (с использованием аппарата комплексных чисел).

Студенты специальностей ПГС, ВиВ и ЗОС выполняют в контрольной работе №1 8 задач (1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 2.1, 2.4), а студенты специальности УПП – 11 задач (1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4).

Контрольная работа №2 содержит одну задачу по расчету символическим методом трехфазной цепи, соединенной по схеме «звезда с нейтральным проводом». Студенты строительных специальностей ведут расчет этой цепи только в нормальном режиме (при наличии нейтрального провода), а студенты специальности УПП, кроме нормального, рассчитывают режим при обрыве нейтрального провода.

Контрольные и курсовая работы выполняются студентами-заочниками до лабораторно-экзаменационной сессии не позднее, чем за две недели до начала занятия по данной дисциплине и сдаются на проверку.

Каждый студент выполняет контрольные и курсовую работы в соответствии с заданным вариантом. Номер варианта для курсовой и контрольной работы №1 определяется по последней цифре учебного шифра студента, а вариант контрольной работы №2 – по двум последним, причем если в учебном шифре одна цифра, то предпоследней цифрой необходимо считать ноль.

Студентам специальности УПП, выполняющим обе контрольные работы в увеличенном объеме, две работы засчитываются как три.

При оформлении контрольных работ необходимо соблюдать следующие требования:

1) Контрольные работы следует выполнять чернилами, оставляя поля для замечаний преподавателя.

2) Контрольные задачи решать в общем виде, подробно объясняя основные этапы решения. В полученные формулы подставлять цифровые значения величин, указывая размерность полученного результата.

3) Все рисунки графики, векторные диаграммы выполнять аккуратно, в достаточно крупном масштабе. Для выполнения графиков и векторных диаграмм пользоваться миллиметровкой.

4) Схемы и векторные диаграммы выполнять с помощью чертежных инструментов, элементы схем обозначать в соответствии с ГОСТом.

5) В начале контрольной работы указать фамилию, имя, отчество, учебный шифр, специальность, домашний адрес студента, наименование и год издания методических указаний, которыми он пользовался.

6) В конце контрольной работы проставить дату ее выполнения и личную подпись студента.

Контрольные работы зачитываются, если решение всех задач выполнено принципиально правильно и отвечает перечисленным требованиям. В случае если контрольная работа не зачтена, все исправления должны быть выполнены в той же тетради после подписи преподавателя-рецензента.

К сдаче теоретического зачета или экзамена по дисциплине «Электротехника и электроника» допускаются студенты, выполнившие лабораторные работы и защитившие отчеты по ним, а также защитившие курсовую работу или имеющие зачтенные контрольные работы.

В соответствии с рабочей программой по дисциплине «Электротехника и электроника» на кафедре «Электротехника» составлен перечень вопросов к теоретическому зачету (экзамену), приведенный в Приложении 4.

1. РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

1.1. Цепь с последовательным соединением приемников

Приемник электрической энергии, включенный в цепь синусоидального тока, в отличие от цепи постоянного тока в общем случае, кроме электрического (активного) сопротивления r , обладает индуктивным x_L и емкостным x_C сопротивлениями, причем

$$x_L = \omega L = 2\pi fL, \quad x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC},$$

где L – индуктивность; C – емкость; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; f – частота питающей сети.

Рассмотрим цепь с последовательным соединением r , L и C , представленную на рисунке 1.1а.

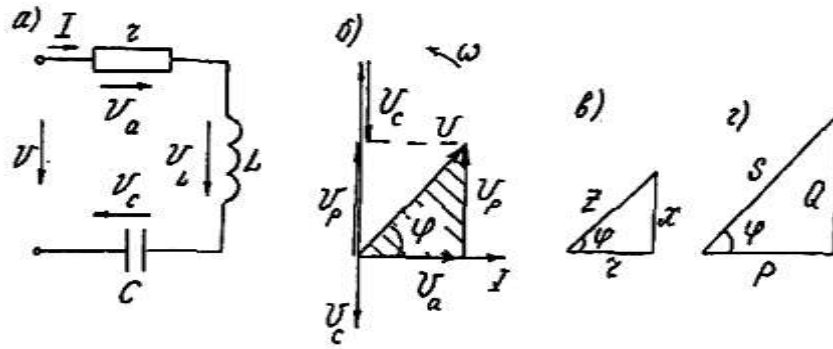


Рис.1.1

Можно показать, что при общем для всей цепи токе $i = I_m \sin \omega t$ напряжение на активном сопротивлении $u = U_{m_a} \sin \omega t$ совпадает по фазе с током, напряжение на индуктивном элементе $u_L = U_{m_L} \sin(\omega t + \pi/2)$ опережает ток на угол $\pi/2$, напряжение на емкости $u_C = U_{m_C} \sin(\omega t - \pi/2)$ отстает от тока на угол $\pi/2$. Согласно второму закону Кирхгофа, для мгновенных значений синусоидальных напряжений справедливо соотношение $u = u_a + u_L + u_C$.

Как известно, можно заменить операции алгебраического сложения мгновенных значений синусоидальных величин операциями геометрического сложения вращающихся векторов, изображающих эти синусоиды $\vec{U}_m = \vec{U}_{m_a} + \vec{U}_{m_L} + \vec{U}_{m_C}$, а для действующих значений $\vec{U} = \vec{U}_a + \vec{U}_L + \vec{U}_C$, где согласно закону Ома: $U_m = I_m z$; $U_{m_a} = I_m r$; $U_{m_L} = I_m x_L$; $U_{m_C} = I_m x_C$. Разделив обе части этих равенств на $\sqrt{2}$, получим: $U = Iz$; $U_a = Ir$; $U_L = Ix_L$; $U_C = Ix_C$.

Графическое решение векторного уравнения $\vec{U} = \vec{U}_a + \vec{U}_L + \vec{U}_C$ представляет собой векторную диаграмму напряжений, представленную на рисунке 1.1б. Из диаграммы видно, что индуктивное и емкостное напряжения находятся в противофазе, образуя вектор реактивного напряжения $\vec{U}_p = \vec{U}_L - \vec{U}_C = Ix$, где $x = x_L - x_C$ — реактивное сопротивление. На диаграмме можно выделить прямоугольный векторный треугольник напряжений (на рис. 1.1б он заштрихован). По теореме Пифагора

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2} = \sqrt{I^2 r^2 + I^2 x^2} = I \sqrt{r^2 + x^2} = Iz,$$

где $z = \sqrt{r^2 + x^2}$ — полное сопротивление цепи. Разделив стороны треугольника напряжений на ток I , получим подобный исходному треугольник сопротивлений (см. рис. 1.1в). Из треугольника сопротивлений вытекают следующие соотношения:

$$\cos \varphi = \frac{r}{z}; \quad \sin \varphi = \frac{x}{z}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{r}; \quad \varphi = \arccos \frac{r}{z} = \arcsin \frac{x}{z} = \operatorname{arctg} \frac{x}{r}.$$

Умножив стороны треугольника напряжений на ток или стороны треугольника сопротивлений на квадрат тока, получим треугольник мощностей (см. рис. 1.1г) со сторонами:

$P = U_a I = I^2 r = S \cos \varphi$ Вт – активная мощность;

$Q = Q_L - Q_C = U_p I = I^2 x = S \sin \varphi$ вар – реактивная мощность;

$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI = I^2 z$ ВА – полная мощность.

1.2. Цепь с параллельным соединением ветвей

Имея на векторной диаграмме (см. рис. 1.2а) правильно ориентированные друг относительно друга вектор напряжения $\vec{U}$ и вектор тока $\vec{I}$, можно представить последний в виде двух составляющих.

Составляющую тока, совпадающую по направлению с вектором напряжения, называют *активной составляющей*, или *активным током* (I_a), составляющую, перпендикулярную вектору напряжения – *реактивной составляющей*, или *реактивным током* (I_p).

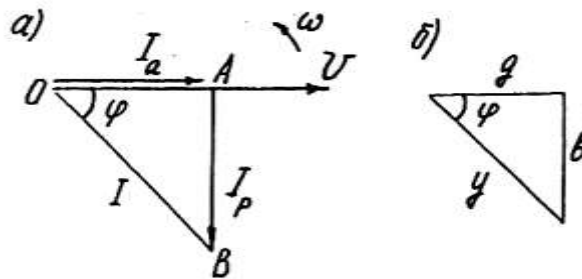


Рис. 1.2

$\triangle OAB$ на рисунке 1.2а называется *треугольником токов*, из него следует:

$$I_a = I \cos \varphi; \quad I_p = I \sin \varphi; \quad I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}.$$

Воспользовавшись законом Ома $I = \frac{U}{z}$ и соотношениями, вытекающими из треугольника сопротивлений, получим:

$$\cos \varphi = \frac{r}{z}; \quad \sin \varphi = \frac{x}{z}.$$

Для активного, реактивного и полного токов можно получить следующие формулы:

$$I_a = I \cos \varphi = \frac{U}{z} \cdot \frac{r}{z} = Ug, \quad \text{где } g = \frac{r}{z^2} \text{ – активная проводимость;}$$

$$I_p = I \sin \varphi = \frac{U}{z} \cdot \frac{x}{z} = Ub, \quad \text{где } b = \frac{x}{z^2} \text{ – реактивная проводимость;}$$

$$I = U \frac{1}{z} = Uy, \quad \text{где } y = \frac{1}{z} \text{ – полная проводимость.}$$

Размерность проводимости:

$$[g] = [b] = [y] = \frac{1}{\text{Ом}} = \text{Ом}^{-1} = \text{См (Сименс)}.$$

Так как $r > 0$ и $z > 0$, то всегда $g > 0$ и $y > 0$; при $x > 0$ и $b > 0$; при $x < 0$ и $b < 0$.

Разделив величину каждой из сторон треугольника токов на U , получим треугольник проводимостей (см. рис. 1.2б). Из него следует:

$$\cos \varphi = \frac{g}{y}; \quad \sin \varphi = \frac{b}{y}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{g}; \quad y = \sqrt{g^2 + b^2};$$

$$\varphi = \arccos \frac{g}{y} = \arcsin \frac{b}{y} = \operatorname{arctg} \frac{b}{g}.$$

На рисунке 1.3а приведена разветвленная цепь с тремя параллельными ветвями. На основании первого закона Кирхгофа $i = i_1 + i_2 + i_3$. Синусоидальные токи можно представить вращающимися векторами и заменить алгебраическое сложение мгновенных значений токов геометрическим сложением действующих значений изображающих их векторов:

$$\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3$$

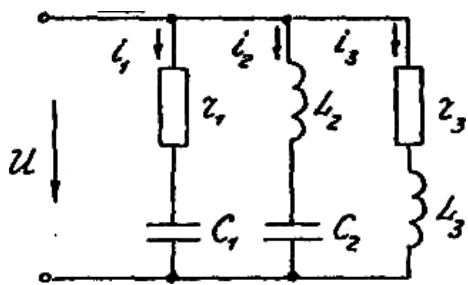


Рис. 1.3а

Решить данное уравнение, т.е. определить токи в ветвях (I_1, I_2, I_3) и в неразветвленной части цепи I , можно аналитическим методом, который называется *методом проводимостей*. Он основан на представлении токов в ветвях и неразветвленной части цепи в виде активных и реактивных составляющих (см. рис. 1.3б).

С помощью векторных диаграмм токов для всей цепи и для параллельных ветвей, совмещенных на одном графике, доказываются следующие положения.

1. Эквивалентная активная проводимость всей цепи равна арифметической сумме активных проводимостей параллельных ветвей:

$$g = g_1 + g_3.$$

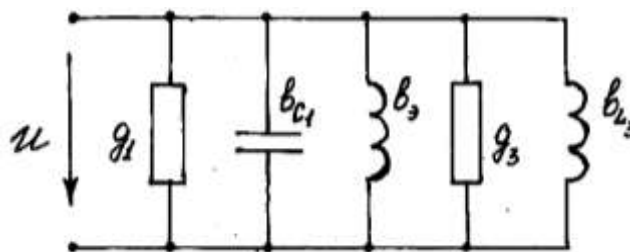


Рис.1.3б

2. Эквивалентная реактивная проводимость всей цепи равна алгебраической сумме реактивных проводимостей параллельных ветвей:

$$b = -b_{C1} + b_{L2} - b_{C2} + b_{L3}.$$

При этом эквивалентная полная проводимость всей цепи

$$y_3 = \sqrt{g_3^2 + b_3^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{b_3}{g_3}.$$

Полученные формулы позволяют вести расчет цепи однофазного тока с параллельным соединением ветвей без графических построений.

Частные случаи:

1. $r \neq 0; x_L = 0; x_C = 0; g = \frac{r}{r^2 + (x_L - x_C)^2} = \frac{1}{r}; b = 0.$
2. $r = 0; x_L \neq 0; x_C = 0; b = \frac{x_L - x_C}{r^2 + (x_L - x_C)^2} = \frac{1}{x_L} = b_L; g = 0; b_C = 0.$
3. $r = 0; x_L = 0; x_C \neq 0; b = \frac{x_L - x_C}{r^2 + (x_L - x_C)^2} = \frac{1}{x_C} = -b_C; g = 0; b_L = 0.$

1.3. Цепь со смешанным соединением приемников

На рисунке 1.4а изображена схема цепи однофазного тока, содержащая три параллельных ветви между узлами а и б и неразветвленную часть с последовательным соединением активного r и индуктивного x_L , сопротивлений.

Для определения токов в неразветвленной части цепи (I) и параллельных ветвях (I_1, I_2, I_3) при заданном напряжении на зажимах цепи и известных сопротивлениях необходимо цепь со смешанным соединением приемников привести к неразветвленной цепи. Для этого следует определить эквивалентные активное, реактивное и полное сопротивления параллельных ветвей из формул:

$$g_3 = \frac{r_3}{z_3^2}; \quad b_3 = \frac{x_3}{z_3^2}; \quad z_3 = \frac{1}{y_3},$$

согласно которым

$$r_3 = g_3 z_3^2; \quad x_3 = b_3 z_3^2; \quad z_3 = \sqrt{r_3^2 + x_3^2},$$

после чего в зависимости от знака реактивного сопротивления осуществляется переход к одной из следующих неразветвленных цепей (см. рис. 1.4б, в).

В соответствии с законом Ома ток в цепях, изображенных на рисунке 1.4б, в, равный току в неразветвленной части исходной цепи, определяется по одной из формул:

$$I = \frac{U}{z_{\Pi}} = \frac{U}{\sqrt{(r+r_3)^2 + (x_L + x_{L3})^2}}; \quad I = \frac{U}{z_{\Pi}} = \frac{U}{\sqrt{(r+r_3)^2 + (x_L - x_{C3})^2}},$$

где z_{Π} – полное сопротивление всей цепи.

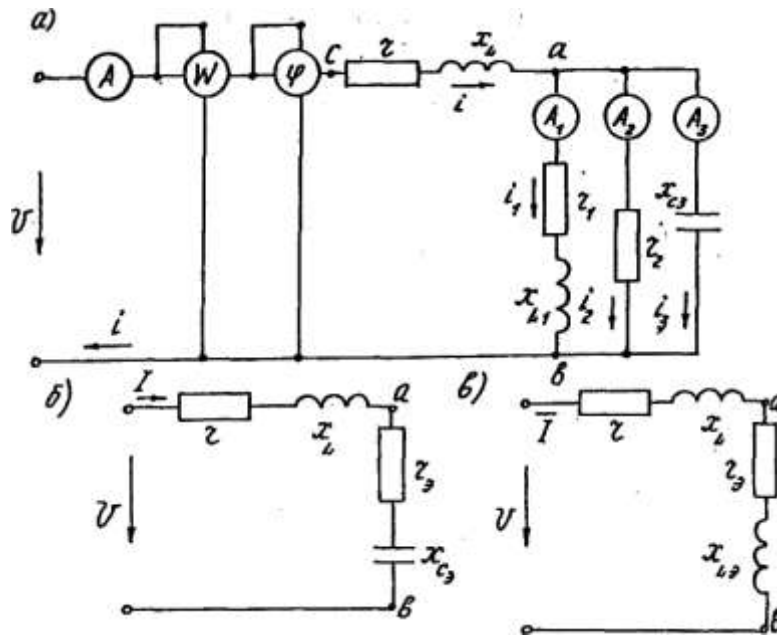


Рис. 1.4

Токи в параллельных ветвях определяются через величину напряжения между узлами а и b: $U_{ab} = Iz_3$.

$$I_1 = \frac{U_{ab}}{z_1} = U_{ab} y_1; \quad I_2 = \frac{U_{ab}}{z_2} = U_{ab} y_2; \quad I_3 = \frac{U_{ab}}{z_3} = U_{ab} y_3,$$

где $y_1 = \sqrt{g_1^2 + b_1^2}$; $y_2 = \sqrt{g_2^2 + b_2^2}$; $y_3 = \sqrt{g_3^2 + b_3^2}$.

Угол сдвига фаз между током в неразветвленной части цепи и напряжением на ее зажимах

$$\varphi = \arccos \frac{(r + r_3)}{z_n} = \arctg \frac{x_L \pm x_3}{r + r_3}.$$

Мощности в рассматриваемой цепи:

$$P = UI \cos \varphi, \text{ Вт};$$

$$Q = UI \sin \varphi, \text{ вар};$$

$$S = UI, \text{ ВА}.$$

Рассмотрим численный пример анализа цепи, показанной на рисунке 1.4а при следующих исходных данных: $U = 100\text{В}$; $r = 1,4\text{Ом}$; $x_L = 0,2\text{Ом}$; $r_1 = 4\text{Ом}$; $x_{L1} = 2\text{Ом}$; $r_2 = 5\text{Ом}$; $x_{C3} = 2,5\text{Ом}$. Необходимо определить показания электроизмерительных приборов, построить векторную диаграмму и временные диаграммы напряжения, тока и мощности на входных зажимах цепи. Найдём эквивалентные проводимости параллельных ветвей, включенных между узловыми точками а и b (см. рис. 1.4а).

$$g_1 = \frac{r_1}{r_1^2 + x_{L1}^2} = \frac{4}{4^2 + 2^2} = 0,2\text{Ом}^{-1}; \quad b_{L1} = \frac{x_{L1}}{r_1^2 + x_{L1}^2} = \frac{2}{4^2 + 2^2} = 0,1\text{Ом}^{-1};$$

$$g_2 = \frac{r_2}{r_2^2} = \frac{1}{r_2} = \frac{1}{5} = 0,2\text{Ом}^{-1}; \quad b_{C3} = \frac{-x_{C3}}{(-x_{C3})^2} = \frac{-1}{x_{C3}} = \frac{-1}{2,5} = -0,4\text{Ом}^{-1}.$$

Эквивалентная активная проводимость разветвленной части цепи:

$$g_3 = g_1 + g_2 = 0,2 + 0,2 = 0,4 \text{ Ом}^{-1}.$$

Эквивалентная реактивная проводимость всей цепи:

$$b_3 = b_{L_1} + b_{C_3} = 0,1 - 0,4 = -0,3 \text{ Ом}^{-1}.$$

Полная проводимость разветвленной части цепи:

$$y_3 = \sqrt{g_3^2 + b_3^2} = \sqrt{0,4^2 + (-0,3)^2} = 0,5 \text{ Ом}^{-1}.$$

Рассмотрим эквивалентную последовательную цепь между узловыми точками а и b (см. рис. 1.4б):

$$z_3 = \frac{1}{y_3} = \frac{1}{0,5} = 2 \text{ Ом};$$

$$r_3 = g_3 z_3^2 = 0,4 \cdot 2^2 = 1,6 \text{ Ом};$$

$$x_3 = b_3 z_3^2 = -0,3 \cdot 2^2 = -1,2 \text{ Ом}.$$

Найдем полное сопротивление всей цепи (см. рис. 1.4б):

$$z_n = \sqrt{(r_1 + r_3)^2 + (x_L + x_3)^2} = \sqrt{(1,4 + 1,6)^2 + (0,2 - 1,2)^2} = \sqrt{10} = 3,17 \text{ Ом}.$$

Ток в неразветвленной части цепи (показание амперметра А на схеме

рис. 1.4а) $I = \frac{U}{z_n} = \frac{100}{3,17} = 31,7 \text{ Ом}.$

Коэффициент мощности (показание фазометра φ):

$$\cos \varphi = \frac{r + r_3}{z_n} = \frac{1,4 + 1,6}{3,17} = 0,947;$$

$$\varphi = \arctg \frac{x_L + x_3}{r + r_3} = \arctg \frac{0,2 - 1,2}{1,4 + 1,6} = \arctg(-\frac{1}{3}) = -19^\circ.$$

Активная мощность (показание ваттметра W):

$$P = UI \cos \varphi = 100 \cdot 31,7 \cdot 0,947 = 3000 \text{ Вт}.$$

Напряжение между узловыми точками а и b:

$$U_{ab} = Iz_3 = 31,7 \cdot 2 = 63,4 \text{ В}.$$

Токи параллельных ветвей (показания амперметров А₁, А₂, А₃):

$$I_1 = \frac{U_{ab}}{z_1} = \frac{U_{ab}}{\sqrt{r_1^2 + x_{L_1}^2}} = \frac{63,4}{\sqrt{4 + 2}} = 14,1 \text{ А};$$

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{z_2} = \frac{U_{ab}}{r_2} = \frac{63,4}{5} = 12,7 \text{ А};$$

$$I_3 = \frac{U_{ab}}{z_3} = \frac{U_{ab}}{x_{C_3}} = \frac{63,4}{2,5} = 25,3 \text{ А}.$$

Для построения векторной диаграммы необходимо также определить углы сдвига по фазе токов в параллельных ветвях относительно напряжения U_{ab} :

$$\varphi_1 = \arctg \frac{x_{L_1}}{r_1} = \arctg \frac{2}{4} = 26,5^\circ;$$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{x_2}{r_2} = \arctg \frac{0}{5} = 0^\circ;$$

$$\varphi_3 = \arctg \frac{x_{C_3}}{r_3} = \arctg \frac{-2,5}{0} = -90^\circ,$$

а также угол φ_{ab} сдвига между током I в неразветвленной части цепи и напряжением U_{ab}

$$\varphi_{ab} = \arctg \frac{x_3}{r_3} = \arctg \frac{-1,2}{1,6} = -37^\circ$$

и угол φ_{ca} между током I и напряжением U_{ca} на неразветвленной части цепи

$$\varphi_{ca} = \arctg \frac{x_L}{r} = \arctg \frac{0,2}{1,4} = 8,14^\circ.$$

Напряжение в неразветвленной части цепи

$$U_{ca} = I \sqrt{r^2 + x_L^2} = 31,7 \sqrt{1,4^2 + 0,2^2} = 44,7 \text{ В}.$$

Векторная диаграмма для рассматриваемой цепи (см. рис. 1.4а) представляет собой графическое решение уравнений, записанных на основании первого и второго законов Кирхгофа:

$$\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3; \quad \vec{U} = \vec{U}_{ca} + \vec{U}_{ab}.$$

Построение векторной диаграммы (см. рис. 1.5) следует начинать (задавшись предварительно масштабами для напряжения и тока) с вектора напряжения $U = 100 \text{ В}$.

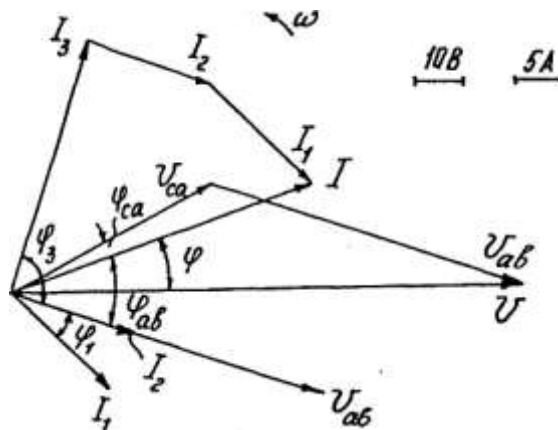


Рис. 1.5

Под углом $\varphi = -19^\circ$ к вектору напряжения строится в масштабе вектор тока $I = 31,7 \text{ А}$. Под углом $\varphi_{ab} = -37^\circ$ к вектору тока направляется вектор напряжения U_{ab} разветвленной части цепи, относительно которого строятся векторы токов $I_1 = 14,2 \text{ А}$; $I_2 = 12,7 \text{ А}$; $I_3 = 25,35 \text{ А}$ с учетом углов сдвига по фазе: $\varphi_1 = 26,5^\circ$; $\varphi_2 = 0^\circ$; $\varphi_3 = -90^\circ$. При сложении векторов тока

I_1 , I_2 и I_3 по правилу многоугольника должен получиться построенный ранее вектор тока $\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 = \vec{I}$. Вектор падения напряжения $U_{ca} = 44,7$ строится под углом $\varphi_{ca} = 8,14^\circ$ к вектору тока I . В сумме с вектором U_{ab} он должен равняться вектору напряжения U на входе цепи: $\vec{U}_{ca} + \vec{U}_{ab} = \vec{U}$.

1.4. Построение графиков (волновых диаграмм) мгновенных значений напряжения, тока и мощности

Для построения временных (волновых) диаграмм напряжения, тока и мощности на входных зажимах цепи необходимо построить векторную диаграмму для амплитудных значений напряжения $U_m = \sqrt{2}U$ и тока $I_m = \sqrt{2}I$ с учетом угла сдвига φ между ними. На рисунке 1.6 такая векторная диаграмма построена для момента $t = 0$ применительно к рассмотренному выше числовому примеру (см. схему на рис. 1.4а).

Очевидно, что для указанного на рис. 1.6 расположения векторов можно записать выражения для мгновенных значений напряжения, тока

$$u = U_m \sin \omega t, \quad i = I_m \sin(\omega t + \varphi);$$

и мощности

$$p = ui = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi) = P - S \cos(2\omega t + \varphi).$$

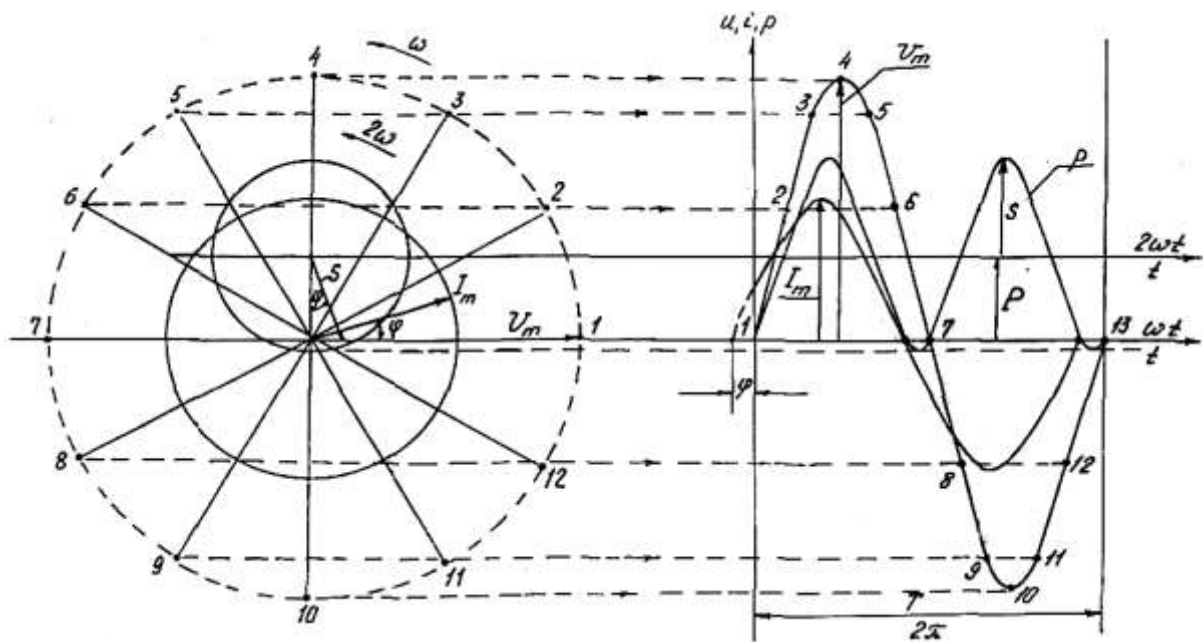


Рис. 1.6

Синусоиды напряжения и тока можно получить вращением с угловой частотой ω против часовой стрелки векторов U_m и I_m , и проектированием их на вертикальную ось (ось мгновенных значений). На рисунке 1.6 показан порядок построения синусоиды напряжения с фиксацией вращающегося вектора U_m через каждые 30° . Кривую мгновенной мощности

можно получить вращением с двойной угловой частотой 2ω вектора амплитуды косинусоиды двойной частоты $S = UI$ из центра вращения, расположенного над осью абсцисс на расстоянии $P = S \cos \varphi$.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №1. ЗАДАЧИ К РАЗДЕЛУ 1 «РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ»

Задача 1.1

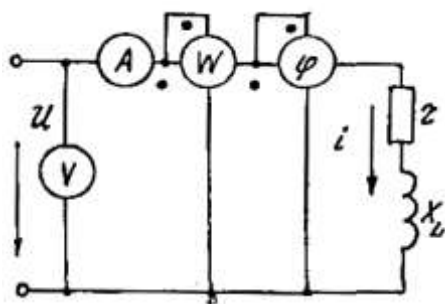


Рис. 1.7

В цепь переменного тока с частотой 50Гц (см. рис. 1.7, табл. 1.1) включена катушка, обладающая активным сопротивлением r и индуктивным сопротивлением x_L . К цепи приложено напряжение $u = U_m \sin \omega t$.

Определить показания измерительных приборов, включенных в цепь, а также реактивную и полную мощности цепи. Построить треугольник сопротивлений и векторную диаграмму.

Таблица 1.1

Величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$r, \text{ Ом}$	3	4	5	3,6	6,34	6	9	8	10	8,3
$x_L, \text{ Ом}$	4	3	3,32	6	4,9	6,7	8,34	6	6,65	10
$U_m, \text{ В}$	282	141	282	141	282	141	282	141	282	141

Задача 1.2

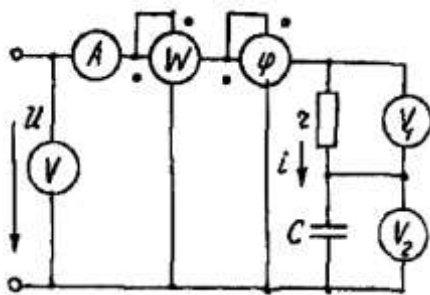


Рис. 1.8

В цепь переменного тока (см. рис. 1.8, табл. 1.2) последовательно включены резистор с активным сопротивлением r и конденсатор емкостью C . К цепи подведено переменное напряжение частотой 50Гц.

Определить показания измерительных приборов, включенных в цепь, реактивную мощность цепи; построить векторную диаграмму и треугольник сопротивлений.

Таблица 1.2

Величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$r, \text{ Ом}$	25	30	40	50	60	70	80	90	100	120
$C, \text{ мкФ}$	50	60	70	80	90	100	40	110	120	150
$U_m, \text{ В}$	141	282	141	282	141	282	141	282	141	282

Задача 1.3

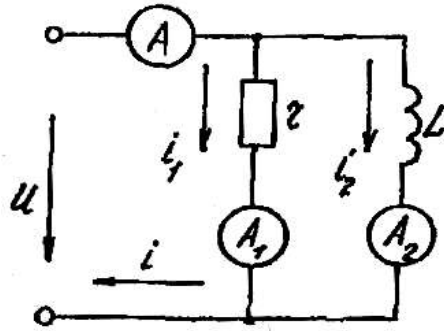


Рис. 1.9

В сеть переменного тока (см. рис. 1.9, табл. 1.3), напряжение в которой изменяется по закону $u = U_m \sin \omega t$, параллельно включены резистор с активным сопротивлением r и катушка с индуктивностью L .

Определить показания измерительных приборов, включенных в цепь, написать выражение мгновенного значения тока в неразветвленной части цепи, построить векторную диаграмму.

Таблица 1.3

Величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
U_m , В	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
ω , рад/с	314	628	1256	1570	1884	314	618	1236	1540	1854
r , Ом	5	10	15	20	125	130	135	140	145	150
L , мГц	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110

Задача 1.4

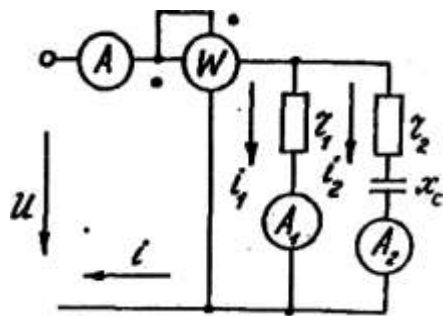


Рис. 1.10

В сеть переменного тока напряжением U включена цепь, состоящая из двух параллельных ветвей с сопротивлениями r_1 , r_2 и x_C (см. рис. 1.10, табл. 1.4).

Определить показания измерительных приборов, реактивную мощность цепи, построить векторную диаграмму.

Таблица 1.4

Величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
U , В	127	220	380	127	220	380	127	220	380	220
r_1 , Ом	5	10	15	10	5	20	8	12	18	15
r_2 , Ом	3	6	8	12	14	16	2	4	8	7,5
x_C , Ом	4	9	10	8	10	20	6	8	3	9

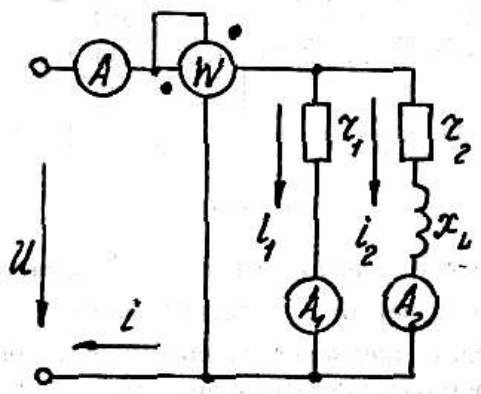


Рис. 1.11

Задача 1.5

В сеть переменного тока напряжением U включена цепь, состоящая из двух параллельных ветвей с сопротивлениями r_1 , r_2 и x_L (см. рис. 1.11, табл. 1.5).

Определить показания измерительных приборов, реактивную мощность цепи, построить векторную диаграмму.

Таблица 1.5

Величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
U , В	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
r_1 , Ом	10	25	20	25	30	35	40	45	50	55
r_2 , Ом	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4
x_L , Ом	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

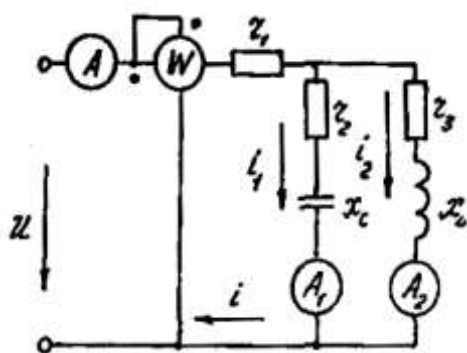


Рис. 1.12

Задача 1.6

В сеть переменного тока напряжением U включена цепь, состоящая из ветвей с активным сопротивлением r_1 , r_2 и r_3 индуктивным сопротивлением x_L и емкостным сопротивлением x_C (см. рис. 1.12, табл. 1.6).

Определить показания измерительных приборов, полную и реактивную мощность цепи; построить векторную диаграмму и треугольник мощностей.

Таблица 1.6

Величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
U , В	110	150	200	250	300	350	380	400	500	600
r_1 , Ом	1,8	2,7	3,5	4	4,8	5,6	6,5	7	8	10
r_2 , Ом	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36
r_3 , Ом	3,8	5,2	6,6	8	9,4	10,8	12,2	13,6	15	16,6
x_C , Ом	10	8	6	4	12	14	17	12	14	10
x_L , Ом	4,8	7,2	9,6	12	14,4	17,4	18	19,6	21,6	25,2

Задача 1.7

В сеть переменного тока с напряжением U включена цепь, схема которой показана на рисунке 1.4а (номера вариантов – таблица 1.7). Необходимо определить показания приборов, построить векторную диаграмму и временные диаграммы напряжения, тока и мгновенной мощности на входных зажимах цепи.

Таблица 1.7

Величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
U , В	268.	200.	180	160	140	120	100	220	240	80
r , Ом	0,8	2,0	1,6,	1,6	1,4	1,2	1,0	2,2	2,4	1,0
x_L , Ом	1,6	1,0	2,4	1,8	2,0	2,1	1,5	1,8	2,2	1,2
r_1 , Ом	3,0	8,0	4,0	5,0	6,0	7,0	3,6	4,2	9,0	2,0
x_{L1} , Ом	4,0	6,0	4,2	7,0	5,0	5,6	4,2	6,0	7,0	4,0
r_2 , Ом	12,5	4,55	10,0	8,0	7,0	6,0	5,0	4,6	7,2	4,0
x_{C3} , Ом	16,7	6,25	12,0	11,0	10,0	9,0	8,0	7,0	10,0	5,0

2. РАСЧЕТ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СИМВОЛИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Символический метод основан на использовании комплексных чисел. Сущность метода заключается в представлении вращающихся векторов синусоидальных величин комплексными числами. В результате все геометрические операции над векторами оказывается возможным заменить алгебраическими операциями над комплексными числами. Это позволяет использовать для расчета цепей синусоидального тока методы расчета цепей постоянного тока.

Всякий вектор можно аналитически выразить комплексным числом, если изобразить его на комплексной плоскости.

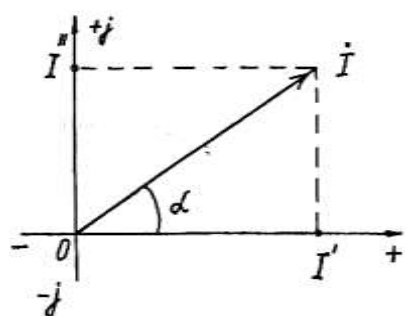


Рис. 2.1

На рисунке 2.1 на комплексной плоскости изображен вектор тока; соответствующее ему комплексное число в алгебраической форме записывается следующим образом:

$$\dot{I} = I' + jI'',$$

где I' и I'' – проекции вектора $\dot{I}$ на действительную и мнимую оси прямоугольной системы координат; $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Длина вектора $\dot{I}$, изображающего комплексное число, называется *модулем комплексного числа*:

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

Угол α называется *аргументом комплексного числа*. Он определяет положение вектора относительно вещественной оси. Из рисунка 2.1 следует:

$$I' = I \cos \alpha; \quad I'' = I \sin \alpha.$$

Используя эти выражения, от алгебраической можно перейти к тригонометрической форме записи комплексного числа:

$$\dot{I} = I(\cos \alpha + j \sin \alpha).$$

Используя формулы Эйлера, можно перейти от тригонометрической к показательной форме записи комплексного числа: $\dot{I} = I e^{j\alpha}$.

Векторы, изображающие синусоидальные функции одной частоты, вращаются с одинаковой угловой скоростью, поэтому угол между соответствующим вектором и положительной полуосью действительных величин является функцией времени $\alpha = \omega t + \psi$. Поскольку векторы одной частоты вращаются с одинаковой угловой скоростью, углы между ними сохраняются неизменными в любой момент времени. Поэтому обычно векторную диаграмму на комплексной плоскости рассматривают как неподвижную для момента времени $t = 0$. При этом условии комплексные числа в показательной форме, соответствующие векторам тока, напряжения и ЭДС, записываются в виде $\dot{I} = I e^{j\psi_i}$; $\dot{U} = U e^{j\psi_u}$; $\dot{E} = E e^{j\psi_e}$. Их модулями являются действующие значения величин, а аргументами – начальные фазы. Для краткости комплексные числа, соответствующие электротехническим величинам, называют *комплексами этих величин*.

Два комплексных числа, отличающиеся только знаком при мнимой части называются *сопряженными*. Если исходное комплексное число обозначается буквой с точкой наверху, то соответствующее ему сопряженное комплексное число обозначается той же буквой со звездочкой наверху.

Произведение сопряженных комплексных чисел равно квадрату их модуля, то есть вещественному числу $\dot{I} \cdot \dot{I}^* = (I' + jI'')(I' - jI'') = I'^2 + I''^2 = I^2$ или $I e^{j\alpha} \cdot I e^{-j\alpha} = I^2$.

Комплексным сопротивлением цепи переменного тока называется отношение комплекса напряжения $\dot{U}$ к комплексу тока $\dot{I}$:

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U e^{j\psi_U}}{I e^{j\psi_I}} = \frac{U}{I} e^{j(\psi_U - \psi_I)} = z e^{j\varphi} = z(\cos \varphi + j \sin \varphi) = r + jx,$$

где ψ_U и ψ_I – начальные фазы синусоид соответственно напряжения и тока; $\varphi = \psi_U - \psi_I$ – угол сдвига по фазе между синусоидами напряжения и тока.

При записи сопротивления в комплексной форме вещественная часть комплексного сопротивления равна активному сопротивлению, а мнимая часть – реактивному. При индуктивном характере сопротивления мнимая часть положительна, а при емкостном – отрицательна.

Комплексной проводимостью электрической цепи называется отношение комплекса тока $\dot{I}$ к комплексу напряжения $\dot{U}$.

$$\underline{Y} = \frac{\dot{I}}{\dot{U}} = \frac{I e^{j\psi_I}}{U e^{j\psi_U}} = \frac{I}{U} e^{-j(\psi_I - \psi_U)} = \frac{I}{U} e^{-j\varphi} = y(\cos \varphi - j \sin \varphi) = g - jb,$$

где g – активная, b – реактивная, $y = \sqrt{g^2 + b^2}$ – полная проводимости.

Необходимо обратить внимание на тот факт, что при эквивалентном переходе от комплексных сопротивлений к комплексной проводимости необходимо у реактивной оставляющей менять знак на противоположный.

Закон Ома в символической форме для цепи переменного тока:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \dot{U} \underline{Y}.$$

Первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма комплексных токов в узле электрической цепи равна нулю:

$$\sum_{k=1}^{k=n} \dot{I}_k = 0.$$

Второй закон Кирхгофа: во всяком замкнутом контуре алгебраическая сумма комплексных электродвижущих сил равна алгебраической сумме комплексных падений напряжения в ветвях, образующих этот контур:

$$\sum_{k=1}^{k=n} \dot{E}_k = \sum_{k=1}^{k=n} \dot{I}_k \underline{Z}_k.$$

Комплексная мощность цепи переменного тока определяется как произведение комплекса напряжения $\dot{U}$ на сопряженный комплекс тока $\dot{I}^*$:

$$\dot{S} = \dot{U} \dot{I}^* = U e^{j\psi_U} I e^{-j\psi_I} = UI e^{j(\psi_U - \psi_I)} = UI e^{j\varphi} = UI \cos \varphi + j UI \sin \varphi = P + jQ,$$

где $\dot{S}$ – комплекс мощности, ВА; P – активная мощность, Вт; Q – реактивная мощность, вар.

Таким образом, действительная (вещественная) часть комплекса мощности представляет собой активную мощность, а мнимая часть (без j) – реактивную мощность. Модуль комплекса мощности равен полной мощности.

При решении задач символическим методом рекомендуется вектор напряжения, приложенного к цепи, совмещать с положительным направлением вещественной оси ($\dot{U} = U e^{j0} = U$) для упрощения расчета и построения векторной диаграммы на комплексной плоскости.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №1. ЗАДАЧИ К РАЗДЕЛУ 2 «РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СИМВОЛИЧЕСКИМ МЕТОДОМ»

Задача 2.1

В цепь переменного тока частотой 50 Гц (см. рис. 2.2, табл. 2.1) включена катушка, обладающая активным сопротивлением r и индуктивным сопротивлением x_L . К цепи приложено напряжение $u = U_m \sin \omega t$.

Определить показания измерительных приборов, включенных в

цепь, а также реактивную и полную мощность цепи. Построить векторную диаграмму на комплексной плоскости.

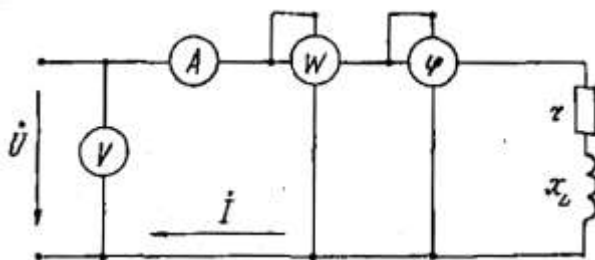


Рис. 2.2

Таблица 2.1

Величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
r , Ом	3	4	5	3,6	6,34	6	9	8	10	8,3
x_L , Ом	4	3	3,32	6	4,9	6,7	8,34	6	6,55	10
U_m , В	282	141	282	141	282	141	282	141	282	141

Задача 2.2

В цепь переменного тока (см. рис. 2.3, табл. 2.2) последовательно включены резистор с активным сопротивлением r и конденсатор емкостью C . К цепи подведено переменное напряжение частотой 50Гц.

Определить показания измерительных приборов, включенных в цепь, реактивную и полную мощность цепи, построить векторную диаграмму на комплексной плоскости.

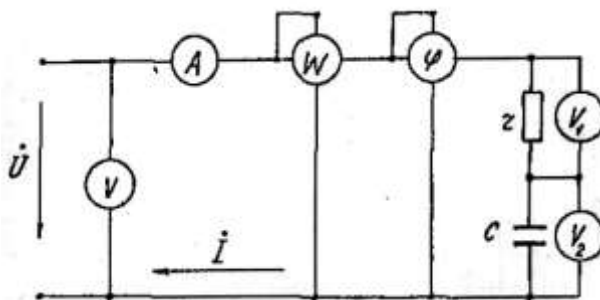


Рис. 2.3

Таблица 2.2

Величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
U_m , В	141	282	141	282	141	282	141	282	141	282
r , Ом	25	30	40	50	60	70	80	90	100	120
C , мкФ	50	60	70	80	90	100	40	110	120	150

Задача 2.3

В сеть с напряжением U включены последовательно два приемника (см. рис. 2.4, табл. 2.3), имеющие активные сопротивления r_1 и r_2 и реактивные x_L и x_C .

Определить показания приборов, включенных в схему, активную и реактивную мощность каждого приемника и всей цепи и коэффициент мощности $\cos\varphi$ всей цепи. Построить векторную диаграмму на комплексной плоскости.

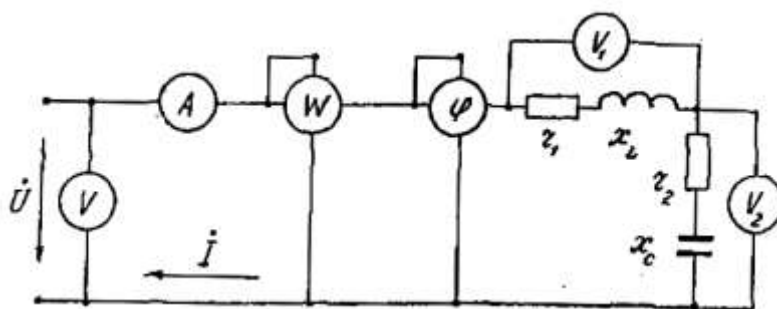


Рис. 2.4

Таблица 2.3

Величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$U, В$	50	100	150	200	75	50	75	100	150	200
$r_1, Ом$	10	15	20	20	12	8	6	12	15	16
$x_L, Ом$	8	6	10	15	12	12	10	14	8	14
$r_2, Ом$	5	10	8	10	6	4	4	8	10	12
$x_C, Ом$	4	8	14	8	15	15	8	10	10	10

Задача 2.4

Цепь, состоящая из двух параллельных ветвей (см. рис. 2.5, табл. 2.4) имеет сопротивления r_1, x_L, r_2, x_C .

Определить показания измерительных приборов, включенных в цепь, активную и реактивную мощность параллельных ветвей и всей цепи, если напряжение, приложенное к цепи, равно U . Построить векторную диаграмму на комплексной плоскости.

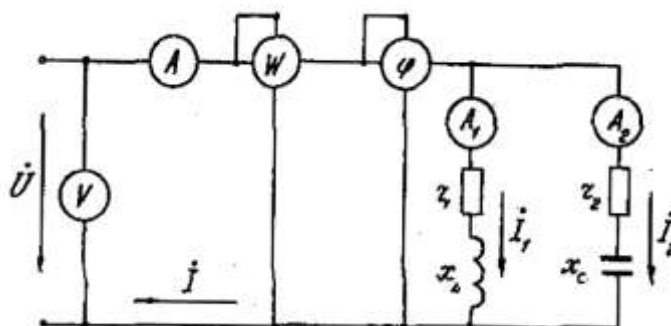


Рис. 2.5

Таблица 2.4

Величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$U, В$	24	36	50	60	80	100	24	36	50	60
$r_1, Ом$	4	6	8	10	12	15	6	8	10	12
$x_L, Ом$	6	8	4	9	7	13	3	10	6	4
$r_2, Ом$	5	3	6	8	8	7	4	6	5	7
$x_C, Ом$	8	6	7	8	10	9	8	7	8	6

3. РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СИМВОЛИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

На рисунке 3.1 показана цепь трехфазного тока, соединенная по схеме «звезда с нейтральным проводом». Соединение фаз генератора и приемника звездой предполагает объединение концов фаз генератора и приемника в нейтральные точки N и n и соединение их нейтральным проводом $N-n$. Начала одноименных фаз генератора и приемника соединены тремя линейными проводами $A-a$, $B-b$, $C-c$. На данном рисунке указаны концы фаз приемника x, y, z , а концы фаз генератора X, Y, Z не обозначены.

Фазным напряжением называется напряжение между началом и концом одной и той же фазы, а *линейным* – напряжение между началами двух разных фаз. Очевидно, линейные провода имеют потенциалы начал фаз, а нейтральный провод имеет потенциал всех концов фаз. Поэтому фазное напряжение можно также определить как разность потенциалов между линейным проводом и нейтральным проводом, а линейное – как напряжение между двумя линейными проводами.

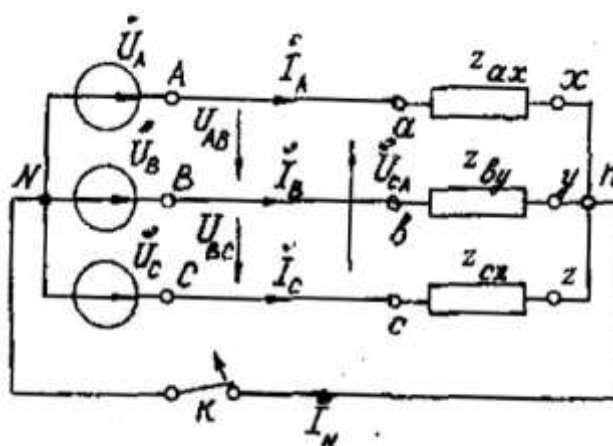


Рис. 3.1

Генератор трехфазного тока с некоторым допущением можно принять источником бесконечной мощности, т.е. системы фазных ($\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$) и линейных ($\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$) напряжений являются симметричными и могут быть представлены векторной диаграммой в виде симметричной звезды векторов. Если пренебречь сопротивлениями нейтраль-

ного (N–n) и линейных (A–a, B–b, C–c) проводов, то электрические потенциалы выходных зажимов генератора A, B, C и N передаются на соответствующие входные зажимы приемника: a, b, c и n, в результате чего системы линейных и фазных напряжений приемника будут такими же симметричными, как и у генератора (см. рис. 3.1).

При расчете трехфазной цепи символическим методом необходимо записать систему фазных напряжений генератора в виде комплексных чисел.

Для упрощения расчетов рекомендуется один из векторов звезды фазных напряжений совместить с положительной полуосью действительных (вещественных) величин. На рисунке 3.2 по оси вещественных величин направлен вектор $\dot{U}_A$ фазного напряжения фазы A.

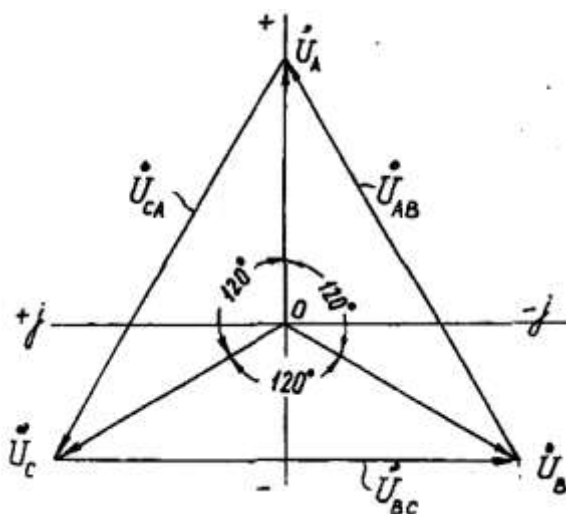


Рис. 3.2

Воспользовавшись оператором поворота вектора $e^{j\alpha}$ (показательная форма записи комплексного числа) и формулами Эйлера для перехода к алгебраической форме записи, получим следующие выражения комплексов фазных напряжений генератора:

$$\dot{U}_A = U_\phi e^{j0} = U_\phi;$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_A e^{-j120} = U_\phi (-0,5 - j0,865);$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_A e^{j120} = U_\phi (-0,5 + j0,865).$$

Комплексы линейных напряжений генератора согласно второму закону Кирхгофа равны разности комплексов соответствующих фазных напряжений:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = U_\phi (1,5 + j0,865);$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C = -j1,73U_\phi;$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A = U_\phi (-1,5 + j0,865).$$

На рисунке 3.3 показана схема трехпроводной трехфазной цепи, в которой генератор соединен звездой, а приемник – треугольником. Принцип соединения в треугольник заключается в следующем: конец предыду-

щей фазы соединяется с началом следующей, в результате чего получается замкнутый контур из трех фаз, а фазы оказываются включенными между линейными проводами. Таким образом, при соединении треугольником фазные напряжения равны линейным, а комплексы линейных токов равны алгебраической разности комплексов соответствующих фазных токов (согласно первому закону Кирхгофа).

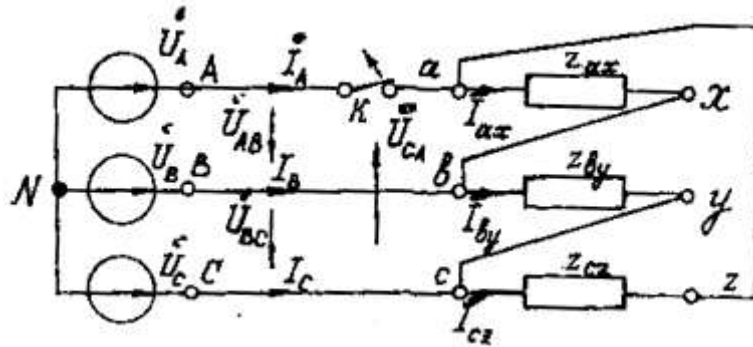


Рис. 3.3.

Как следует из вышесказанного и рисунка 3.3, соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами в треугольнике имеют вид:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ax}; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{by}; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_{cz}.$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ax} - \dot{I}_{cz}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{by} - \dot{I}_{ax}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{cz} - \dot{I}_{by}.$$

ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ № 2

Задана трехфазная цепь (см. рис.3.1.), соединенная по схеме «звезда с нейтральным проводом». Генератор трехфазного тока является источником бесконечной мощности, т.е. системы фазных и линейных напряжений на его зажимах всегда остаются симметричными и неизменными по величине при любых токовых нагрузках в трехфазной цепи.

Приемник является несимметричным, поскольку комплексы сопротивлений его фаз а-х, б-у и с-з не равны друг другу. В каждой фазе имеется полный набор сопротивлений и проводимостей в соответствии со схемами, приведенными на рисунке 3.4а, б, в.

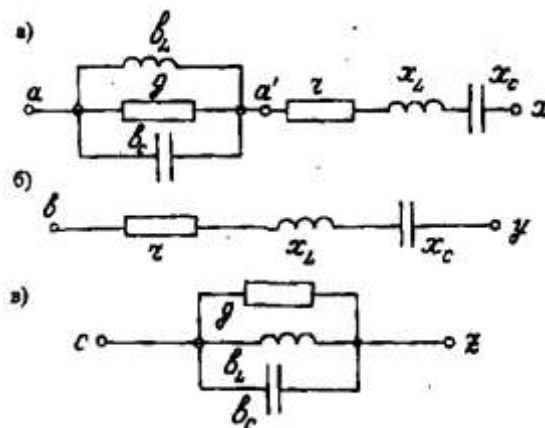


Рис. 3.4.

Численные значения всех элементов в фазах приемника, а также величина фазного напряжения генератора выбираются студентами из таблицы 3.1 по двум последним цифрам учебного шифра.

Таблица 3.1

№ пп	Фазное напря- жение генера- тора	Параметры фазы а–х						Параметры фазы b–y			Параметры фазы с–z		
		g	b _L	b _C	r	x _L	x _C	r	x _L	x _C	g	b _L	b _C
		Ом ⁻¹	Ом ⁻¹	Ом ⁻¹	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом ⁻¹	Ом ⁻¹	Ом ⁻¹
1	73	0,2	0,2	0,25	4,0	6,0	2,0	10,	15,0	10,0	0,25	0,05	0,04
2	127	0,1	0,1	0,05	8,0	12,0	4,0	20,0	30,0	20,0	0,025	0,05	0,02
3	220	0,05	0,05	0,1	30,0	50,0	20,0	30,0	50,0	20,0	0,02	0,02	0,025
4	73	0,2	0,25	0,2	4,0	2,0	6,0	15,0	10,0	15,0	0,05	0,04	0,05
5	127	0,1	0,05	0,1	8,0	4,0	12,0	30,0	20,0	30,0	0,025	0,025	0,05
6	220	0,05	0,1	0,05	15,0	10,0	25,0	30,0	20,0	50,0	0,02	0,025	0,02
7	380	0,05	0,04	0,05	50,0	50,0	10,0	100,0	100,0	50,0	0,01	0,0125	0,01
8	73	0,2	0,25	0,2	2,0	10,0	2,0	15,0	10,0	25,0	0,04	0,05	0,04
9	127	0,05	0,1	0,05	4,0	20,0	4,0	30,0	20,0	50,0	0,05	0,025	0,04
10	220	0,1	0,05	0,04	10,0	40,0	10,0	50,0	30,0	50,0	0,025	0,02	0,025
11	380	0,05	0,04	0,04	5,0	10,0	50,0	200,0	100,0	200,0	0,01	0,01	0,0125
12	73	0,2	0,25	0,2	8,0	2,0	10,0	25,0	25,0	10,0	0,04	0,04	0,05
13	127	0,05	0,05	0,1	16,0	4,0	20,0	25,0	50,0	25,0	0,02	0,025	0,05
14	220	0,1	0,04	0,05	30,0	10,0	40,0	50,0	50,0	40,0	0,025	0,025	0,02
15	380	0,025	0,05	0,04	8,0	50,0	100,0	200,0	200,0	100,0	0,0125	0,01	0,0125
16	73	0,25	0,25	0,2	10,0	2,0	10,0	10,0	25,0	20,0	0,025	0,04	0,025
17	127	0,04	0,05	0,04	20,0	4,0	20,0	40,0	50,0	20,0	0,025	0,02	6,05
18	220	0,04	0,05	0,1	40,0	10,0	40,0	60,0	100,0	40,0	0,0125	0,02	0,025
19	380	0,025	0,04	0,05	80,0	100,0	50,0	200,0	200,0	50,0	0,0125	0,0125	0,01
20	73	0,25	0,25	0,5	10,0	5,0	10,0	20,0	30,0	10,0	0,025	0,025	0,04
21	127	0,05	0,1	0,05	4,0	20,0	4,0	30,0	20,0	50,0	0,05	0,025	0,04
22	220	0,1	0,05	0,04	10,0	40,0	10,0	50,0	30,0	50,0	0,025	0,02	0,025
23	380	0,05	0,05	0,04	5,0	10,0	50,0	200,0	100,0	200,0	0,01	0,01	0,0125
24	73	0,2	0,25	0,02	8,0	2,0	10,0	25,0	25,0	10,0	0,04	0,04	0,05
25	127	0,05	0,05	0,1	16,0	4,0	20,0	25,0	50,0	25,0	0,02	0,025	0,05

Требуется:

1. Изобразить схемы фаз приемника согласно рисунку 3.4а, б, в.
2. Выписать из таблицы 3.1 численные данные сопротивлений и проводимостей в соответствии с заданным вариантом.
3. Записать в комплексной форме сопротивления фаз приемника, преобразовав разветвленные участки эквивалентными неразветвленными. Представить эти сопротивления в алгебраической и показательной формах:

$$\underline{Z}_a = r_a + jx_a = z_a e^{j\varphi_a}; \quad \underline{Z}_b = r_b + jx_b = z_b e^{j\varphi_b}; \quad \underline{Z}_c = r_c + jx_c = z_c e^{j\varphi_c},$$

где $\varphi_a = \arctg \frac{x_a}{r_a}$; $\varphi_b = \arctg \frac{x_b}{r_b}$; $\varphi_c = \arctg \frac{x_c}{r_c}$ и $z_a = \sqrt{r_a^2 + x_a^2}$;

$z_b = \sqrt{r_b^2 + x_b^2}$; $z_c = \sqrt{r_c^2 + x_c^2}$ – соответственно аргументы и модули комплексных сопротивлений фаз приемника.

4. Составить и изобразить расчетную схему цепи, включив в нейтральный и линейные провода амперметры (см. рис. 3.5). На схеме показать все величины в комплексной форме с учетом того, что концы фаз приемника x, y, z объединены в нейтральную точку n и на схеме не показаны.

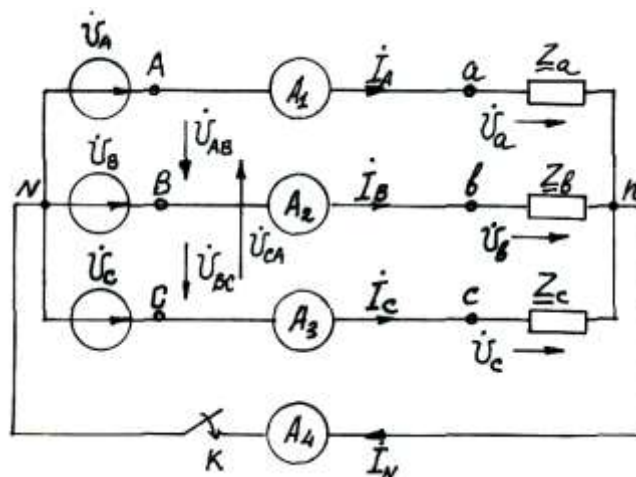


Рис. 3.5

5. Рассчитать нормальный режим работы цепи (ключ К на рис. 3.5 замкнут). Определить показания амперметров и рассчитать мощности фаз приемника: активные, реактивные и полные. Построить топографическую векторную диаграмму токов и напряжений на комплексной плоскости с соблюдением масштабов, показом углов сдвига φ_a , φ_b , φ_c и графического построения вектора $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$.

6. Рассчитать режим работы при обрыве нейтрального провода (ключ К на рис. 3.5 разомкнут). Определить показания амперметров и рассчитать активные, реактивные и полные мощности приемников. Построить топографическую векторную диаграмму, сохранив масштабы, выбранные в предыдущем пункте. (Этот пункт выполняют студенты только специальности УПП).

Методические указания

Комплексные сопротивления фаз приемника при полном наборе параметров (см. рис. 3.4а, б, в).

Фаза а-х:

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_{ax} = \frac{1}{\underline{Y}_{aa'}} + \underline{Z}_{a'x} = r_{ax} + jx_{ax} = z_{ax} e^{j\varphi_{ax}} = z_a e^{j\varphi_a},$$

где

$$\underline{Y}_{aa'} = g - jb_L + jb_C; \quad \underline{Z}_{a'x} = r + jx_L - jx_C,$$

$$\varphi_a = \varphi_{ax} = \arctg \frac{x_{ax}}{r_{ax}}; \quad z_a = z_{ax} = \sqrt{r_{ax}^2 + x_{ax}^2}.$$

Фаза $b-y$

$$\underline{Z}_b = \underline{Z}_{by} = r + jx_L - jx_C = r_{by} - jx_{by} = z_{by} e^{j\varphi_{by}} = z_b e^{j\varphi_b},$$

где

$$\varphi_b = \varphi_{by} = \arctg \frac{x_{by}}{r_{by}}; \quad z_b = z_{by} = \sqrt{r_{by}^2 + x_{by}^2}.$$

Фаза $c-z$

$$\underline{Z}_c = \underline{Z}_{cz} = \frac{1}{\underline{Y}_{cz}} = r_{cz} + jx_{cz} = z_{cz} e^{j\varphi_{cz}} = z_c e^{j\varphi_c},$$

где

$$\underline{Y}_{cz} = g - jb_L + jb_C; \quad \varphi_c = \varphi_{cz} = \arctg \frac{x_{cz}}{r_{cz}}; \quad z_c = z_{cz} = \sqrt{r_{cz}^2 + x_{cz}^2}.$$

Схема «звезда с нейтральным проводом». При наличии нейтрального провода фазные напряжения приемника равны одноименным фазным напряжениям генератора, комплексные выражения которых были приведены выше.

В соответствии с законом Ома фазные (линейные) токи:

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

В соответствии с первым законом Кирхгофа ток в нейтральном проводе:

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

Представив все токи в алгебраической и показательной формах записи, можно построить векторную диаграмму токов на комплексной плоскости и определить показания амперметров.

Векторная диаграмма токов при соблюдении масштаба строится наложением на диаграмму напряжений генератора (см. рис. 3.2). Все векторы токов строятся из начала координат O по действительным и мнимым составляющим алгебраической формы записи комплекса каждого тока. В начале координат расположена точка N , соответствующая потенциалу этой точки. На диаграмме следует графическим построением показать выполнимость первого закона Кирхгофа, произведя сложение векторов фазных токов по правилу многоугольника с использованием параллельного переноса векторов. Примерный вид такой топографической диаграммы приведен на рисунке 3.6.

Из показательной формы записи комплексов токов можно получить информацию о показаниях амперметров: это – модули соответствующих комплексов, поскольку расчет велся для действующих значений напряжений и токов.

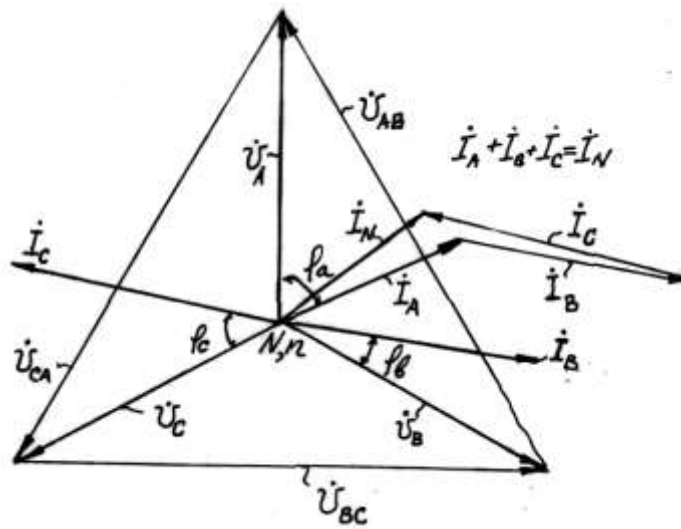


Рис. 3.6

Комплексные мощности фаз приемника:

$$\dot{S}_A = \dot{U}_A \dot{I}_A^* = P_A + jQ_A = S_A e^{j\varphi_a};$$

$$\dot{S}_B = \dot{U}_B \dot{I}_B^* = P_B + jQ_B = S_B e^{j\varphi_b};$$

$$\dot{S}_C = \dot{U}_C \dot{I}_C^* = P_C + jQ_C = S_C e^{j\varphi_c},$$

где $\dot{I}_A^*, \dot{I}_B^*, \dot{I}_C^*$ – сопряженные комплексы токов; P_A, P_B, P_C – активные мощности; Q_A, Q_B, Q_C – реактивные мощности; $S_A = \sqrt{P_A^2 + Q_A^2}$, $S_B = \sqrt{P_B^2 + Q_B^2}$, $S_C = \sqrt{P_C^2 + Q_C^2}$ – полные (кажущиеся) мощности фаз приемника.

Схема «звезда без нейтрального провода». При разомкнутом нейтральном проводе (ключ К в схеме на рис. 3.5 разомкнут) искажается система фазных напряжений на приемнике.

Напряжение смещения нейтрали

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_a + \dot{U}_B \underline{Y}_b + \dot{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c},$$

где $\underline{Y}_a = \frac{1}{\underline{Z}_a}$; $\underline{Y}_b = \frac{1}{\underline{Z}_b}$; $\underline{Y}_c = \frac{1}{\underline{Z}_c}$ – комплексные проводимости фаз приемника.

Фазные напряжения приемника

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_N; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_N; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_N.$$

Фазные (линейные) токи

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

В качестве проверки правильности расчетов необходимо убедиться в выполнении первого закона Кирхгофа $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$.

Показания амперметров и комплексные мощности фаз приемников определяются и рассчитываются таким же образом, как в схеме «звезда с нейтральным проводом».

Рекомендуется следующий порядок построения векторной диаграммы. Сначала строится векторная диаграмма напряжений генератора (см. рис. 3.2) с началом координат комплексной плоскости в точке N. Затем строится в том же масштабе вектор $\dot{U}_N$. Конец этого вектора определяет положение точки n. Соединив точку n с вершинами треугольника линейных напряжений, получим векторы фазных напряжений – несимметричную трехлучевую звезду векторов фазных напряжений приемника $\dot{U}_a$, $\dot{U}_b$, $\dot{U}_c$ (см. рис. 3.7).

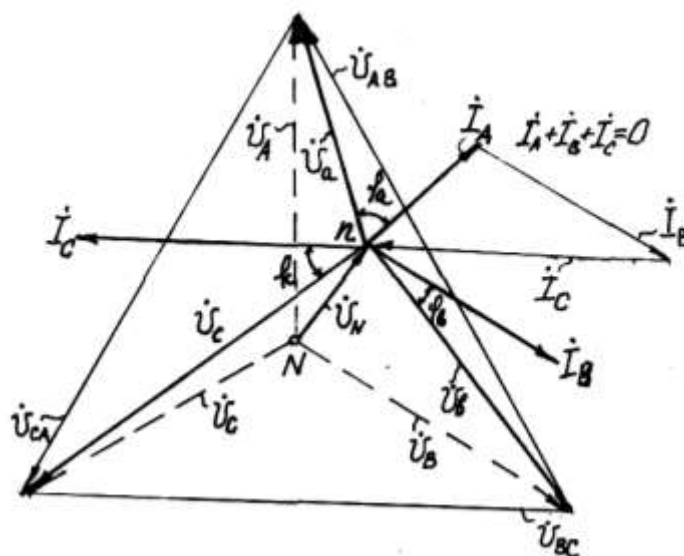


Рис. 3.7

Перенеся начало координат из точки N в точку n, построим векторы тока $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_C$ по координатам алгебраической формы записи. Для контроля правильности полученных результатов необходимо графическим сложением векторов убедиться в справедливости равенства $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ и одинаковости углов φ_a , φ_b , φ_c на обеих диаграммах (см. рис. 3.6 и рис. 3.7).

КУРСОВАЯ РАБОТА «ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКИ»

Целью курсовой работы «Электроснабжение строительной площадки», выполняемой студентами специальности СЖД и МиТ, является:

- закрепление теоретического материала по разделам однофазного и трехфазного переменного тока;
- уяснение посредством графоаналитического метода влияния потерь напряжения в линии электропередач (ЛЭП) на работу потребителей электрической энергии (асинхронных двигателей, ламп накаливания и др.);
- получение навыков в выборе сечения проводов, подводящих

электроэнергию к строительной площадке по условиям нагрева и отклонений напряжения.

Перед выполнением курсовой работы необходимо предварительно проработать соответствующую литературу [4] и материал данных методических указаний.

Студент выполняет курсовую работу самостоятельно в соответствии с исходными данными, приведенными в задании.

4. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Материал этой темы рекомендуется изучать в основном по [4], а по отдельным вопросам достаточно пользоваться настоящими методическими указаниями. При изучении темы следует обратить внимание на вклад различных типов электростанций в общий объем вырабатываемой ими электроэнергии, как в нашей стране, так и в других промышленно развитых странах. Студент должен уметь давать оценку перспектив развития того или иного типа электростанций; знать также их КПД и степень их воздействия на окружающую среду.

Устройство, схемы электрических соединений понижающих подстанций с высшим напряжением до 10кВ и их оборудование изложены в [4].

В систему электроснабжения объектов строительства (ОС) входят источники электроэнергии, электрические сети и потребители электроэнергии.

Если ОС находится недалеко от трансформаторной подстанции, то он электроэнергию получает от нее.

Трансформаторные подстанции (ТП) предназначены для преобразования и распределения электроэнергии переменного тока. На ТП устанавливаются один или несколько трансформаторов, распределительные шины (РШ), устройства защиты и сигнализации. Как правило, используются трехфазные двухобмоточные трансформаторы, у которых обмотка высшего напряжения $U_{\text{вн}}$, имеет напряжение 6 или 10кВ. Обмотка низшего напряжения, как правило, соединяется по схеме звезда с нейтральным проводом напряжением 400/230В.

Если централизованное электроснабжение ОС отсутствует, то используются временные – стационарные или передвижные электростанции.

Стационарные электростанции выполняются с расположением в зданиях или в виде типа комплектных трансформаторных подстанций (КТП), передвижные размещаются на транспортных объектах (железнодорожных платформах, автомобильных прицепах).

Основой временных электростанций является генераторный агрегат с трехфазным синхронным генератором и первичным двигателем внутреннего сгорания (ДВС).

Электрические сети предназначены для передачи электроэнергии от источника (генератора) потребителям и выполняются с помощью кабелей

или воздушных линий. По уровню напряжения электрические сети делятся на высоковольтные (ВЭС): $U_c > 1000\text{В}$ и низковольтные (НЭС): $U_c < 1000\text{В}$.

По конструктивному исполнению сети могут быть воздушными и кабельными. Воздушные сети крепятся на специальных сооружениях (как правило, на деревянных или металлических опорах, кабельные – прокладываются в траншеях).

Потребителями электроэнергии являются различные электро-механизмы (насосы, вентиляторы, компрессоры и др.) и технологические процессы. Электроэнергия используется также для освещения строительных площадок и временных поселков. Основной род тока, используемый для этих целей, – переменный.

Студенты неэлектротехнических специальностей материал этой темы должны изучать в описательном аспекте: знать устройство и назначение основных аппаратов высокого и низкого напряжений, уметь объяснять схемы и компоновочно-конструктивные решения трансформаторных подстанций.

Устройство и расчет электрических сетей – один из наиболее значимых в практическом отношении вопросов для инженера-неэлектрика.

4.1. Расчет электрической сети

Рассчитать электрическую линию – значит, определить сечение провода, которое удовлетворяло бы известным требованиям и обеспечивало бы нормальную работу электроприемников, питаемых этой линией. Требование, которому должно удовлетворять выбранное сечение, состоит в том, чтобы температура провода линии не превышала допустимого значения, обеспечивающего длительную «жизнь» изоляции провода.

Нормальная работа электроприемника, которую обеспечивает сечение проводов линии, определяется отклонением напряжения на конце этой линии от номинального напряжения электроприемника. О том, какое значение имеет уровень напряжения на электроприемнике, можно судить по следующим данным:

- 1) пусковой момент и перегрузочная способность асинхронного двигателя пропорциональны квадрату напряжения;
- 2) световой поток ламп накаливания пропорционален квадрату напряжения;
- 3) превышение напряжения на лампе накаливания сверх номинального на 1% сокращает срок ее службы на 14%.

Эти факты и определяют расчет проводов электрических линий, которые рассчитывают по двум условиям – нагреву и отклонению напряжения.

4.2. Расчет проводов по условиям нагрева

Электрический ток, протекающий по проводникам электрических линий, выделяет в них теплоту. Выделенная теплота нагревает проводник, но одновременно происходит и его охлаждение путем отвода теплоты в окружающую среду. Через некоторое время, если значение протекающего в про-

воднике тока не изменяется, температура проводника достигает установившегося значения, которое в последующем остается неизменным.

Время достижения установившейся температуры для различных проводов, проложенных в различных условиях, колеблется в больших пределах. Так, например, при прокладке трех проводов марки АПРТО (алюминиевый провод с резиновой изоляцией) в одной трубе установившаяся температура при протекании расчетного тока будет достигнута: для проводов сечением 6мм^2 через 12-16 мин., сечением 95мм^2 – через 82-109 мин.

Допустимую температуру для проводов и кабелей определяют из соображений безопасности, надежности и экономичности. На эту величину влияют, прежде всего, характер изоляционного материала и его тепловая прочность. В зависимости от вида изоляции ПУЭ (Правила устройств электроустановок) устанавливают следующие наибольшие допустимые температуры (при температуре окружающей среды $+25^\circ\text{C}$):

- 1) для голых проводов и шин $+70^\circ\text{C}$;
- 2) для изолированных проводов и кабелей с резиновой или пластмассовой изоляцией $+65^\circ\text{C}$;
- 3) для кабелей с бумажной изоляцией на напряжение до 3000В $+80^\circ\text{C}$.

Таким образом, первопричиной нагрева провода является электрический ток. Поэтому целесообразно создать аналитическую зависимость, учитывающую все факторы, определяющие нагрев и охлаждение провода и допустимый по условиям нагрева ток для этого сечения. Однако такая аналитическая зависимость получается сложной и, следовательно, неудобной для инженерных расчетов.

Значения длительно допустимых токовых нагрузок на провода и кабели с разным материалом токоведущих жил, различной изоляцией, различными условиями прокладки определены централизованно на основании расчетов и экспериментов. Они сведены в таблицы, опубликованные в ПУЭ, и являются официальными нормативными материалами, обязательными на всей территории РФ.

Следует помнить, что многочисленные электротехнические справочники, содержащие таблицы длительно допустимых токовых нагрузок на провода и кабели, являются лишь копиями таблиц из ПУЭ.

Выбор сечения проводов по условиям нагрева с помощью таблиц заключается в сравнении длительно допустимого тока для данного сечения провода, взятого из таблиц, с расчетным значением тока. При этом должно соблюдаться условие $I_{\text{доп}} \geq I_{\text{расч}}$, где $I_{\text{доп}}$ – длительно допустимый ток по условиям нагрева; $I_{\text{расч}}$ – расчетное значение тока.

4.3. Расчет проводов по условиям отклонения напряжения

Система электроснабжения состоит из ряда устройств, которые в простейшем случае могут быть представлены в виде последовательного соединения элементов: генератора электростанции, повышающего трансформатора, линии электропередачи, понижающего трансформатора, на-

ружной линии низкого напряжения, внутренних магистральной и групповой линий и, наконец, потребителя. Это, безусловно, упрощенная модель системы электроснабжения. В действительности число элементов системы значительно больше, больше также ступеней напряжения и соединены они не только последовательно.

Современные электросистемы включают в себя десятки электростанций, сотни подстанций и многие сотни километров электрических линий различных напряжений. Принятая нами упрощенная модель поможет объяснить сущность расчета сети на отклонение напряжения.

Все элементы системы электроснабжения обладают электрическим сопротивлением (активным и реактивным). Следовательно, вырабатываемая генератором электроэнергия, передаваемая через все элементы системы электроснабжения, теряет в них определенную часть напряжения. Для компенсации потерь напряжения в элементах системы электроснабжения используют целый ряд средств. Самым простым из них является повышенный уровень номинальных напряжений генераторов и трансформаторов по сравнению с номинальным напряжением U_H приемников электроэнергии. Например, для низковольтных электроприемников номинальным является напряжение 380 и 220В, а для этой ступени напряжения понижающих трансформаторов соответственно – 400 и 230В. Повышение напряжения на вторичных зажимах трансформатора позволяет иметь запас, который можно потерять в сети. Кроме того, в системах электроснабжения применяется регулирование напряжения на электростанциях и крупных подстанциях. При изменении нагрузки изменяется величина тока и, следовательно, потери напряжения $\Delta U_{\text{потр}}$ у потребителя.

В общем случае, если в системе отсутствует автоматическое регулирование напряжения, напряжение у потребителя при изменении нагрузки в широком диапазоне может быть определено по формуле $U_{\text{потр}} = U_H \pm \Delta U_{\text{потр}}$, т.е. при изменении нагрузки происходит колебание напряжения у потребителя, и напряжение может быть не только меньше, но и больше номинального значения.

Мощность нагрузки потребителей электроэнергии изменяется в широком диапазоне как по дням и часам суток, так и по временам года. Зависимость мощности нагрузки от времени называется графиком нагрузок. Графики нагрузок промышленных предприятий резко отличаются от графиков нагрузок общественно-коммунальных потребителей (городов и поселков), а электроснабжение всех потребителей осуществляется от общей энергосистемы. Поэтому централизованное автоматическое регулирование напряжения на электростанциях и крупных подстанциях для промышленных предприятий, как правило, не совпадает с интересами общественно-бытовых потребителей, например, когда последним необходимо повысить напряжение для компенсации его потерь в часы максимальной нагрузки (вечернее время суток): для промышленных предприятий такое повышение может быть вредным и наоборот.

Как следует из изложенного, расчет сети на колебание напряжения для определения минимального и максимального напряжений у потребителя возможно выполнить, если известны необходимые параметры схемы, а также режим электропотребления.

Такие расчеты выполняют при проектировании электросистем и городских сетей. Для электрической сети внутри зданий делают упрощенные расчеты. При этом напряжение на шинах высокого напряжения понижающих трансформаторных подстанций 400/230В принимают неизменным при любой нагрузке. Расчет проводят для режима номинальных нагрузок.

Допустимые отклонения напряжения в процентах от номинального напряжения сети составляют:

- 1) на зажимах приборов рабочего освещения в производственных и общественных помещениях 2,5%;
- 2) на зажимах электродвигателей и аппаратов для их пуска и управления 5%;
- 3) для основной массы электроприемников электрической энергии (бытовые электроприемники, осветительные установки жилых помещений и т.п.) 5%.

4.4. Оформление курсовой работы

Курсовая работа состоит из расчетно-пояснительной записки и графической части.

4.4.1. Пояснительная записка

Объем записки 10-12 с.

Записка пишется от руки на стандартном листе формата А4 или набирается на компьютере.

Все страницы работы должны иметь сквозную нумерацию.

Первым листом пояснительной записки является титульный лист (см. Приложение 1), который не нумеруется. На листе, следующем за титульным, приводятся исходные данные варианта курсовой работы (см. табл. 4.3, 4.4).

Пояснительная записка должна включать следующие вопросы:

- определение мощности потребителей строительной площадки по каждой линии отдельно;
- выбор сечения проводов по каждой питающей линии по допустимой плотности тока и потерям (отклонениям) напряжения в линии.

В конце записки приводится список использованной литературы с точным библиографическим описанием источников.

4.4.2. Графическая часть

Эта часть должна содержать однолинейную схему электроснабжения объекта строительства (ОС) от силового трансформатора до строительной площадки с четырьмя питающими линиями (фидерами).

4.4.3. Выбор сечения и расчет проводов и кабелей

Сечение провода s по условиям нагрева выбирается по специальным таблицам, в которых указывается допустимый ток $I_{\text{доп}}$, таким образом, чтобы выполнялось условие:

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{н}},$$

где $I_{\text{н}}$ – номинальный расчетный ток, А, определяемый по формуле

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_{2\text{н}} \cdot \cos \varphi_{2\text{н}}},$$

где $P_{\text{н}}$ – номинальная активная мощность, поступающая к потребителю, кВт; $U_{2\text{н}}$ – номинальное линейное напряжение у потребителя, В; $\cos \varphi_{2\text{н}}$ – номинальный коэффициент мощности потребителя.

Пример 1. Выбрать по условиям нагрева сечение алюминиевых проводов марки АПРТО для питания осветительного трехфазного щита с номинальной мощностью нагрузки $P_{\text{н}} = 33$ кВт. Напряжение сети $U_{\text{н}} = 380/220$ В. Проводка выполняется в стальной трубе. Принять коэффициент мощности лампы накаливания $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,91$.

Решение.

1. Определяем ток нагрузки

$$I_{\text{расч}} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3} U_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}}} = \frac{33}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,91} = 55 \text{ А}.$$

2. По таблице длительно допустимых токовых нагрузок (см. Приложение 3) на провода и кабели с резиновой и полихлорвиниловой изоляцией с алюминиевыми жилами находим ближайший больший допустимый ток $I_{\text{доп}} = 60$ А для сечения $S = 10 \text{ мм}^2$.

Принимаем сечение проводов $S = 10 \text{ мм}^2$, т.к. условие соблюдено.

Пример 2. Выбрать по условиям нагрева сечение медных проводов марки ПР-500 для питания асинхронного короткозамкнутого электродвигателя со следующими паспортными данными: номинальная мощность $P_{\text{н}} = 28$ кВт; номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,89$; КПД при номинальной нагрузке $\eta_{\text{н}} = 0,91$; номинальное напряжение сети $U_{\text{н}} = 380/220$ В.

Решение.

1. Определяем ток нагрузки, который следует принять равным номинальному току электродвигателя:

$$I_{\text{расч}} = I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3} U_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}} \eta_{\text{н}}} = \frac{28}{1,73 \cdot 0,38 \cdot 0,89 \cdot 0,91} = 52,6 \text{ А}.$$

2. По справочным данным находим $I_{\text{доп}} = 60$ А для сечения проводов $S = 10 \text{ мм}^2$. Принимаем к прокладке провода сечением 10 мм^2 , т.к. $I_{\text{доп}} \geq I_{\text{расч}}$.

Выбранный провод необходимо проверить на допустимую потерю напряжения в линии:

$$\varepsilon = \frac{\Delta U_{\text{л}}}{U_{2\text{н}}} \cdot 100\%,$$

где $\Delta U_{\text{л}}$ – потеря линейного напряжения.

Для НЭС – $\varepsilon \leq 5\%$; для ВЭС $\varepsilon \leq 10\%$.

Потерю линейного напряжения можно найти по формуле, вытекающей из векторной диаграммы напряжений линии электропередач.

На рисунке 4.1 приведена схема одной фазы, на которой L – длина линии, км; $R = r_0 L$ и $X = x_0 L$ – активное и индуктивное сопротивления провода (r_0 и x_0 – их удельные значения). Величина r_0 зависит от сечения провода и определяется по таблицам (см. Приложения 2, 3); величина x_0 от сечения провода не зависит и для низковольтных воздушных электрических сетей принимается равной 0,4 Ом/км, для кабелей 0,08 Ом/км.

На рисунке 4.2 приведена векторная диаграмма, соответствующая расчетной схеме (см. рис. 4.1).

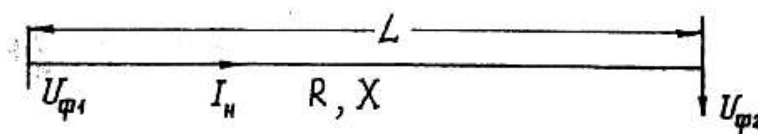


Рис. 4.1.

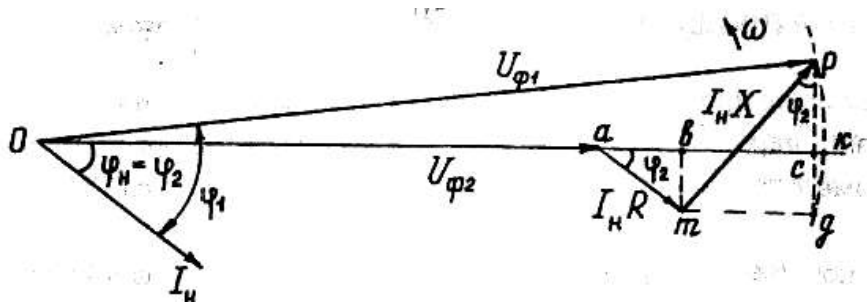


Рис. 4.2

Отрезком СК на векторной диаграмме (см. рис.4.2) обычно пренебрегают и потерю фазного напряжения определяют, как

$$\Delta U_{\text{ф}} = U_{\varphi 1} - U_{\varphi 2} = \text{Ос} - \text{Оа} = ab + mg,$$

где $U_{\varphi 1}$ и $U_{\varphi 2}$ – фазные напряжения соответственно в начале и конце линии.

В прямоугольных треугольниках – Δabm и Δmpg :

$$ab = I_H R \cos \varphi_2; \quad mg = I_H X \sin \varphi_2,$$

тогда:

$$\Delta U_{\text{ф}} = I_H (R \cos \varphi_2 + X \sin \varphi_2).$$

Умножив левую и правую части равенств на $\sqrt{3}$, находят потерю линейного напряжения:

$$\Delta U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot I_H (R \cos \varphi_2 + X \sin \varphi_2).$$

Если получается, что $\varepsilon > 5\%$, то из таблиц (см. Приложения 2, 3) выбирают ближайший провод большего сечения.

В случае, когда к электрической сети подключено несколько потребителей, для расчета проводов применяется метод, основанный на представлении токов в виде активной и реактивной составляющих.

Схема замещения для одной фазы такой системы при симметричной нагрузке приведена на рисунке 4.3. Определяя для каждой из параллельных ветвей активные и реактивные токи, находят активный (I_a) и реактивный (I_p) токи для неразветвленной части цепи и номинальный расчетный ток в линии $I_H = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$, при этом $\cos \varphi_2 = I_a/I_H$ и $\sin \varphi_2 = I_p/I_H$.

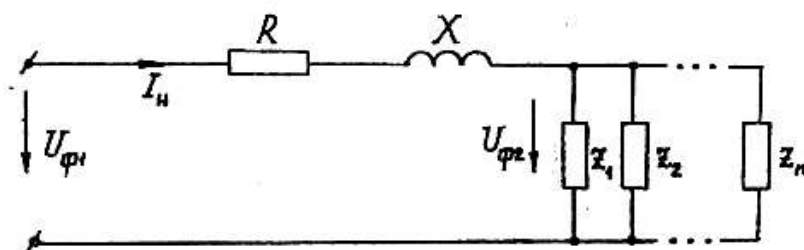


Рис. 4.3

4.4.4. Задание на курсовую работу. Порядок выполнения работы

На строительной площадке размещено электрооборудование, перечень которого приведен в таблице 4.4.

Все токоприемники площадки подразделены на силовые, технологические, внутреннее и наружное освещение.

Питание потребителей строительной площадки выполняется от трансформаторной подстанции ТП 10/0,4 кВ (см. рис. 4.4.). Вторичная обмотка трансформатора подстанции соединена по схеме «звезда с нейтральным проводом». Для упрощения рисунка схема питания четырех групп потребителей, на которые разделены электроприемники строительной площадки, представлена в однолинейном исполнении. Одна линия предполагает наличие трех линейных проводов А–а, В–в, С–с и нейтрального провода.

На приведенной схеме показаны:

- ТП 10/0,4 кВ – трансформаторная подстанция с первичным напряжением понижающего трансформатора 10кВ и вторичным напряжением 0,4кВ;
- РШ – распределительные шины вторичного напряжения трансформатора;
- L1, L2, L3, L4 – линии электропередач.

Первая линия (L1 = 250м) выполнена кабелем и питает семь силовых электроприемников (экскаватор, башенный кран и другие механизмы с асинхронным электроприводом с усредненным $\cos \varphi_{2H} = 0,7$).

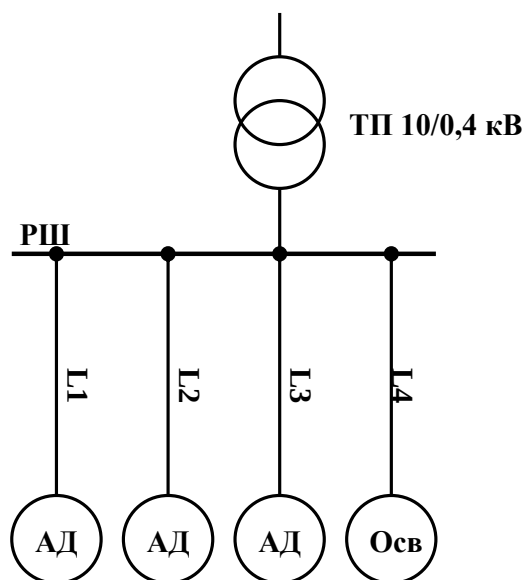


Рис. 4.4

Вторая линия ($L2 = 150\text{м}$) так же выполнена кабелем и питает десять силовых приемников (бетононасос, растворонасос и другие механизмы). Мощность электропотребления исполнительных механизмов студент берет из столбца 4 таблицы 4.4 и записывается в столбец 7.

Третья линия ($L3 = 200\text{м}$) питает трансформаторный подогрев бетона и выполнена четырехпроводной воздушной линией с алюминиевыми проводами, закрепленными на деревянных опорах.

Четвертая линия ($L4 = 250\text{м}$) обеспечивает электроэнергией внутреннее и наружное освещение строительной площадки, суммарную мощность которого студент рассчитывает для своего варианта (данные для расчета мощности берутся из таблицы 4.3). Эта ЛЭП так же выполнена четырехпроводной воздушной линией с алюминиевыми проводами.

Для специальности *СЖД* силовые линии выполняются кабелем с алюминиевыми жилами. Протяженность кабельной линии 250м.

Для специальности *МиТ* силовые линии выполняются кабелем с медными жилами. Протяженность кабельной линии 150м.

Мощность силового электрооборудования, получающего питание по кабельным линиям, берется студентом из столбца 4 таблицы 4.4 и записывается в седьмой столбец.

Варианты заданий для определения мощности потребляемой электрооборудованием строительной площадки от воздушных линий электропитания (третья и четвертая линии) представлены в таблице 4.3.

Номер варианта определяется по последней цифре шифра студента.

Мощность, передаваемая силовым исполнительным механизмам строительной площадки по линиям $L1$ и $L2$ (см. рис.4.4), определяется следующим выражением:

$$\sum P = P_1 K_{c_1} + P_2 K_{c_2} + \dots + P_n K_{c_n} \quad (\text{кВт}),$$

где $P_1, P_2 \dots P_n$ — мощности асинхронных двигателей исполнительных механизмов; $K_{c_1}, K_{c_2} \dots K_{c_n}$ — коэффициенты спроса на данные механизмы в течение смены (столбец 5 таблицы 4.4).

Мощность потребителей трансформаторного прогрева бетона передается по воздушной ЛЭП с алюминиевыми проводами ($L3$).

Таблица 4.3

Варианты задания

Освещение	Варианты		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Технологическое	Трансформаторный электропрогрев бетона	м ³	3	2,5	2,5	3	3	2,5	2	2	1,5	1,5
Внутреннее	Контора, диспетчерская, быт. комнаты	м ²	10	15	15	20	20	25	25	30	30	35
	Душевая и уборная	м ²	20	25	25	30	30	35	35	40	40	40
	Склады	м ²	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
	Навес	м ²	150	150	150	150	200	200	200	200	200	200
	Мастерские	м ²	16	20	20	25	25	30	30	35	30	40
Наружное	Территория строительства	на 100 м ²	100 0	120 0	150 0	180 0	200 0	220 0	250 0	280 0	300 0	320 0
	Открытые складские площадки	на 100 м ²	100	120	150	180	200	220	250	280	300	320
	Основные дороги и проезды	км	0,3	0,4	0,4	0,6	0,6	0,8	0,8	1,0	1	1,2
	Площадки земляных, бетонных и каменных работ	на м ²	100	120	150	180	200	220	250	280	300	320
Наружное	Площадка электросварочных работ	на м ²	15,0	18,0	20,0	22,0	25,0	28,0	30,0	32,0	35,0	36,0
	Площадка монтажных работ	на м ²	10,0	12,0	15,0	18,0	20,0	22,0	25,0	28,0	30,0	32,0

Согласно данным своего варианта, взятым из таблицы 4.3, определяется необходимый расход мощности на прогрев бетона:

$$\sum P_{уд} = (P_{уд} \cdot n) K_c \text{ (кВт)},$$

где $P_{уд}$ – удельный расход мощности на нагрев 1 м³ бетона; n – количество кубометров, соответствующее варианту задания, м³; K_c – коэффициент спроса.

Внутреннее и наружное освещение получают питание от общей воздушной линии L4, выполненной алюминиевыми проводами. Необходимая мощность для этих потребителей электроэнергии определяется по формуле:

$$\sum P_{осв} = P_{уд1} S_1 K_{c1} + P_{уд2} S_2 K_{c2} + \dots + P_{удn} S_n K_{cn},$$

где $P_{уд1}, P_{уд2} \dots P_{удn}$ – удельный расход мощности для освещения какого-то объекта (берется из таблицы 4.4); $S_1, S_2 \dots S_n$ – площадь объектов, м² (берется из таблицы 4.3 для своего варианта); K_c – коэффициент спроса в течение рабочей смены.

Таблица 4.4

**Усредненные нормы потребности электроэнергии, коэффициенты
спроса K_c и мощности для строительных площадок**

Токо- прием- ники	Наименование потребителей	Единица измере- ния	Мощность двигателя или мощность расхо- да на ед. технологич. процесса, кВт	K_c	$\cos\varphi_2$ н	По- треб. акт.мо- щность Р
1	2	3	4	5	6	7
Сило- вые	Экскаватор	шт.	80	0,5	0,7	
	Башенные краны грузоподъемностью до 10т	шт.	40	0,5	0,7	
	Башенные краны грузоподъ- емностью от 20 до 75т	шт.	100	0,5	0,7	
	Краны самоходные	шт.	40	0,4	0,7	
	Шахтоподъемники	шт.	30	0,3	0,7	
	Подъемники мачтовые	шт.	10	0,3	0,7	
	Транспортеры ленточные	шт.	7	0,5	0,7	
Сило- вые	Бетононасосы	шт.	25	0,5	0,5	
	Растворонасос	шт.	4	0,5	0,5	
	Вибропогружатели свайные	шт.	50	0,2	0,5	
	Иглофильтровые установки	шт.	10	0,2	0,5	
	Электросварочные аппараты	шт.	15	0,5	0,5	
	Электротрамбовки	шт.	1, 5	0,1	0,5	
	Электровибраторы	шт.	1	0,1	0,5	
	Растворобетоносмесители	шт.	10	0,5	0,5	
	Краскопульты	шт.	0,5	0,1	0,5	
	Передвижная малярная станция	шт.	10	0,5	0,5	
Техно- логиче- ские	Трансформаторный подогрев бетона	м ³	60	0,9	0,8	
Внут- реннее осве- щение	Контора, диспетчерская, бытовые комнаты	м ²	0,015	0,8	1	
	Душевая и уборная	м ²	0,08	0,8	1	
	Склады	м ²	0,015	0,35	1	
	Навес	м ²	0,003	0,35	1	
	Мастерские	м ²	0,018	0,8	1	
Наруж- ное осве- щение	Территория строительства	100 м ²	0,015	1	1	
	Открытые складские площадки	100 м ²	0,05	1	1	
	Основные дороги и проезды	км	5,0	1	1	
	Второстепенные дороги и проезды	км	2,5	1	1	
	Площадки земляных бетон- ных и каменных работ	м ²	0,08	1	1	
	Площадка электросвароч- ных работ	м ²	0,5	1	1	
	Площадка монтажных работ	м ²	0,3	1	1	

Дополнительно к полученной мощности ($\Sigma P_{\text{осв}}$) необходимо прибавить мощность светильников, установленных вдоль основных дорог и проездов. Для упрощения задачи считать всю мощность, необходимую для освещения дорог, сосредоточенной в конце линии L4:

$$P_{\text{осв.дор.}} = P_{\text{уд}} \cdot l,$$

где $P_{\text{уд}}$ – удельный расход мощности для освещения 1 км дороги, кВт/км (см. табл.4.4); l – длина дороги, км (берется из таблицы 4.3 для своего варианта).

После расчета мощности, передаваемой по каждой линии (L1, L2, L3, L4), определить токи в них.

Причем обе силовые линии выполняются кабелем с медными или алюминиевыми жилами.

Для специальности СЖД линия выполняется кабелем с алюминиевыми жилами длиной 250 м. Для специальности МИТ кабелем с медными жилами длиной 150 м.

Остальные две линии смонтированы в виде воздушных четырехпроводных линий с алюминиевыми проводами длиной $L1 = 250$ м и соответственно $L2 = 150$ м.

Для упрощения расчета допускаем, что нагрузка по всем фазам А, В, С распределена равномерно во всех четырех ЛЭП (*симметричная нагрузка*). Вследствие этого расчет производится для одной фазы:

1. Изобразить схему замещения на одну фазу (см. рис. 4.1) и рассчитать номинальный ток в ней.

$$I_H = \frac{P_H \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_{2H} \cos \varphi_{2H}},$$

где P_H – номинальная активная мощность, поступающая к потребителю, кВт; U_{2H} – номинальное линейное напряжение у потребителя, 380 В; $\cos \varphi_{2H}$ – номинальный коэффициент мощности потребителя.

2. Затем согласно Приложениям 2, 3 выбрать сечение провода, необходимое для прохождения данного тока по нагреву для каждой ЛЭП при условии $I_{\text{доп}} \geq I_H$.

3. Проверить выбранное сечение проводов четырех линий на потерю напряжения согласно методике, изложенной в подразделе 4.4.3:

$$\varepsilon = \frac{\Delta U_{\text{л}}}{U_{2H}} \cdot 100\%,$$

где $\Delta U_{\text{л}}$ – потеря линейного напряжения.

4. Построить векторную диаграмму распределения напряжений для линии L1 согласно методике, изложенной в подразделе 4.4.3 (см. рис. 4.2).

5. Сформулировать выводы, содержащие сведения о выбранном проводе (кабеле) линии электроснабжения или воздушной линии и оценить влияние снижения напряжения питающей сети на характеристики электродвигателя и ламп накаливания.

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
(ПГУПС-ЛИИЖТ)

Кафедра «Электротехника»

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К КУРСОВОЙ РАБОТЕ
«РАСЧЕТ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
СТРОИТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКИ»

ИСПОЛНИТЕЛЬ:

СТУДЕНТ _____ И.И. ИВАНОВ
(шифр) (подпись)

РУКОВОДИТЕЛЬ РАБОТЫ _____ П.П. ПЕТРОВ
(подпись)

Оценка работы

Должность, уч. звание

Дата

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2004

Таблица П2

Алюминиевые провода марок А и АКП

Марка и номинальное сечение, мм ²	Активное сопротивление r_0 , Ом/км	Допустимый длительный ток, А
A16	1,84	105
A25	1,16	136
A35	0,85	170
A50	0,59	215
A70	0,42	265
A95	0,31	320
A120	0,25	375
A150	0,2	440
A185	0,16	500
A240	0,12	590
A300	0,1	680
A400	0,07	815

**Длительно допустимые токи, А для кабелей с медными
или алюминиевыми жилами**

Сечение токопроводящей жила (мм ²)	Четырехжильные до 1 кВ (А)	Активные сопротивления R ₀ медных алюминиевых проводов при температуре 20°C (Ом/км)
6	—	3/4,315
10	85/65	1,8/2,95
16	115/90	1,125/1,842
25	150/115	0,72/1,18
35	175/135	0,514/0,843
50	215/165	0,36/0,59
70	265/200	0,257/0,4215
95	310/240	0,1795/0,32
120	350/270	0,15/0,2455
150	395/305	0,12/0,1965
185	450/345	0,0973/0,1593

Перечень вопросов по курсу «Электротехника и электроника» для специальностей ПГС, ВиВ, СЖД, Мит, ЗОС, УПП заочного факультета

1. Значение электротехники. Преимущества электрической энергии. Развитие электротехники в России. Применение электрической энергии на ж.д. транспорте.
2. Электрическая цепь постоянного тока. Закон Ома для всей цепи и для участка цепи.
3. Последовательная, параллельная и смешанная цепи постоянного тока. Законы Кирхгофа.
4. Однофазный переменный ток. Получение. Графическое изображение. Основные величины, характеризующие переменный ток.
5. Измерение переменного тока. Действующее (эффективное) значение.
6. Изображение синусоидальных функций вращающимися векторами. Понятие о векторной диаграмме.
7. Цепь переменного тока с активным сопротивлением. Кривые мгновенных значений тока, напряжения, мощности. Векторная диаграмма.
8. Цепь переменного тока с емкостью. Кривые мгновенных значений тока, напряжения, мощности. Векторная диаграмма.
9. Цепь переменного тока с индуктивностью. Кривые мгновенных значений тока, напряжения, мощности. Векторная диаграмма.
10. Последовательная цепь переменного тока с активным, индуктивным и емкостным сопротивлением. Резонанс напряжений.
11. Параллельная цепь переменного тока с активным, индуктивным и емкостным сопротивлением. Резонанс токов.
12. Мощность цепи переменного тока. Треугольник мощностей.
13. Техничко-экономическое значение коэффициента мощности. Способы его улучшения.
14. Получение трехфазного переменного тока. Графическое изображение симметричной трехфазной системы.
15. Соединение приемников звездой. Соотношения между линейными и фазными токами, линейными и фазными напряжениями. Значение нейтрального провода. Векторная диаграмма.

- 16.Соединение приемников треугольником. Соотношение между линейными и фазными токами, линейными и фазными напряжениями. Векторная диаграмма.
- 17.Мощность трехфазной цепи.
- 18.Трансформатор. Принцип действия и устройство.
- 19.Холостой ход трансформатора. Коэффициент трансформации.
- 20.Работа трансформатора под нагрузкой.
- 21.Рабочие характеристики трансформатора. Потери в трансформаторе, КПД. Опыт короткого замыкания.
- 22.Трансформирование трехфазного переменного тока. Автотрансформаторы. Сварочные трансформаторы.
- 23.Измерительные трансформаторы.
- 24.Асинхронный двигатель. Принцип действия и устройство. Вращающееся магнитное поле трехфазного тока.
- 25.Вращающий момент асинхронного двигателя. Зависимость момента от скольжения. Критическое скольжение.
- 26.Рабочие характеристики асинхронного двигателя. Потери в двигателе.
- 27.Способы пуска асинхронных двигателей. Регулирование частоты вращения. Изменение направления вращения.
- 28.Машина постоянного тока. Устройство. Назначение основных частей. Принцип действия в режимах двигателя и генератора.
- 29.Реакция якоря машина постоянного тока. Назначение дополнительных полюсов.
- 30.Принцип действия и устройство генератора постоянного тока. Схема возбуждения. Уравнение электрического равновесия.
- 31.Процесс самовозбуждения генератора постоянного тока. Условия самовозбуждения. Характеристика холостого хода.
- 32.Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением. Схема включения. Внешняя и регулировочная характеристики.
- 33.Генератор характеристики тока со смешанным возбуждением. Схема включения. Внешняя и регулировочная характеристики.
- 34.Двигатель постоянного тока. Принцип действия и устройство. Основные уравнения двигателя.
- 35.Саморегулирование двигателя постоянного тока при изменении нагрузки.
- 36.Пуск двигателя постоянного тока. Регулирование частоты вращения. Изменение направления вращения.

37. Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением. Схема включения. Основные характеристики.
38. Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением. Схема включения. Рабочие характеристики двигателя.
39. Принцип действия и устройство синхронного генератора.
40. Реакция якоря синхронного генератора при различных видах нагрузки.
41. Характеристики синхронного генератора холостого хода: внешняя, регулировочная.
42. Электроприводы. Режим работы электродвигателей.
43. Основные уравнения движения.
44. Аппаратура управления. Устройства и принцип работы нереверсивного и реверсивного магнитного пускателя.
45. Полупроводниковые диоды. Принцип действия. Вольт-амперная характеристика. Классификация. Область применения.
46. Полупроводниковый стабилитрон. Принцип действия. Вольт-амперная характеристика. Область применения.
47. Биполярный транзистор. Принцип действия. Область применения.
48. Три схемы включения биполярного транзистора. Статические вольт-амперные характеристики в схеме ОЭ. Основные параметры.
49. Тиристоры. Принцип действия и устройство. Область применения.
50. Вольт-амперная характеристика динистора. Основные параметры.
51. Вольт-амперная характеристика тринистора. Основные параметры.

Библиографический список

1. *Касаткин А.С., Немцов М.В.* Электротехника. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. *Методика решения типовых задач по расчету цепей* постоянного и однофазного переменного тока /Под ред. А.И. Хожайнова. – СПб.: ПГУПС, 1998.
3. *Методика решения типовых задач по расчету цепей* трехфазного тока /Под ред. А.И. Хожайнова. – СПб.: ПГУПС, 1998.
4. *Тарасов А.Н., Соловьянчик А.Р.* Энергетические установки на транспортном строительстве. – М.: Транспорт, 1988.
5. *Смирнов А.Д.* Справочная книжка энергетика. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
6. *Справочник энергетика строительной организации.* Т.1. Электроснабжение строительства. – М.: Стройиздат, 1991.

Содержание

Введение	1
1. Расчет цепей однофазного переменного тока параметрическим методом	2
1.1. Цепь с последовательным соединением приемников	2
1.2. Цепь с параллельным соединением ветвей	4
1.3. Цепь со смешанным соединением приемников	6
1.4. Построение графиков (волновых диаграмм) мгновенных значений напряжения, тока и мощности	10
Контрольная работа №1. Задачи к разделу 1 «Расчет цепей однофазного переменного тока параметрическим методом»	11
2. Расчет цепи однофазного переменного тока символическим методом	14
Контрольная работа №1. Задачи к разделу 2 «Расчет цепей однофазного переменного тока символическим методом»	16
3. Расчет трехфазных цепей переменного тока символическим методом	19
Задание на контрольную работу № 2	21
Курсовая работа «Электроснабжение строительной площадки»	26
4. Основы электроснабжения	27
4.1. Расчет электрической сети	28
4.2. Расчет проводов по условиям нагрева	28
4.3. Расчет проводов по условиям отклонения напряжения	29
4.4. Оформление курсовой работы	31
4.4.1. Пояснительная записка	31
4.4.2. Графическая часть	31
4.4.3. Выбор сечения и расчет проводов и кабелей	32
4.4.4. Задание на курсовую работу. Порядок выполнения работы	34
Приложения	39
Библиографический список	45