

Г.Н. Акимова

Электротехника, электроника и микропроцессорная техника

**Методические рекомендации по выполнению
письменных работ**



**Нижний Новгород
2021**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
Филiaal Самарского государственного университета путей сообщения
в г. Нижнем Новгороде

Г.Н. Акимова

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПИСЬМЕННЫХ РАБОТ
ПО ДИСЦИПЛИНАМ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА,
ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА**

Нижний Новгород, 2021

УДК 621.31+621.38
ББК 31.2+31.85+32.844.1
А 39

Автор: Акимова Г.Н.

Методические рекомендации по выполнению письменных работ по дисциплинам Электротехника, Электроника и микропроцессорная техника учеб. пособие / Акимова Г.Н.; Филиал Самарского государственного университета путей сообщения в г. Нижнем Новгороде. – Нижний Новгород, 2021. – 66 с.

ISBN 978-5-6045908-3-6

Методическое пособие составлено в соответствии с учебными планами. Оно окажет помощь студентам заочной формы обучения при выполнении домашних контрольных работ по дисциплинам: Электротехника и электроника, Электротехника, Электроника и микропроцессорная техника.

Пояснительная записка.

Задания на домашние контрольные работы по дисциплине «Электротехника» разработаны в соответствии с обязательным минимумом содержания Рабочей программы. Домашняя контрольная работа выполняется студентом после изучения материала каждого задания.

Контрольная работа выполняется в тонкой тетради в клетку в соответствии с заданием. Вариант соответствует двум последним цифрам шифра, присвоенного студенту.

1. Каждое задание переписывается полностью. Затем необходимо записать краткое условие задачи.

2. Схемы выполняются карандашом, аккуратно, с применением чертёжных принадлежностей.

3. Элементы схем надо чертить с соблюдением ГОСТов.

4. Решение каждой задачи необходимо пояснять.

5. Вычисления производить с необходимой точностью до двух знаков после запятой.

6. Графическую часть надо выполнять на миллиметровой бумаге, с указанием масштабов.

7. Ответы на вопросы должны быть полными (с приведением необходимых рисунков и схем).

8. При выполнении работы студент не должен пользоваться красными чернилами или пастой.

9. Буквенные обозначения единиц измерения ставить только возле результата вычисления в скобках. В промежуточных расчётах единицы измерения указывать не надо.

10. В конце работы необходимо привести список литературы (автор, полное название учебника, издательство, год издания), указать дату выполнения работы и поставить подпись.

11. Если контрольная работа получила оценку «незачёт», то в этой же тетради после рецензии преподавателя необходимо выполнить работу над

ошибками по замечаниям и повторно сдать работу на проверку. В выполненной работе после того, как её проверил преподаватель, исправлять ничего нельзя! Работа над ошибками выполняется в тетради **после рецензии преподавателя**. Записывается «Работа над ошибками», далее указывается номер задания к которому выполняется работа над ошибками.

12. Если контрольная работа получила оценку «зачёт», то в этой же тетради после рецензии преподавателя необходимо выполнить работу над ошибками по замечаниям, повторно сдать работу на проверку не надо. В выполненной работе после того, как её проверил преподаватель, исправлять ничего нельзя! Работа над ошибками выполняется в тетради **после рецензии преподавателя**. Записывается «Работа над ошибками», далее указывается номер задания, к которому выполняется работа над ошибками.

РАЗДЕЛ 1

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Основным методом изучения предмета является самостоятельная работа с учебниками и другими источниками информации. Большое значение имеют групповые и индивидуальные консультации преподавателя, на которых можно выяснить все непонятные вопросы. Хорошо понятый материал, если даже он забудется, впоследствии быстро вспоминается.

Курс электротехники и электроники требует знаний основ математики и физики.

Домашние контрольные работы выполняются после изучения материала программы, соответствующего каждому заданию.

Тема 1.1

Для решения задачи по данной теме необходимо изучить главы «Электрическое поле», «Электрическое поле и конденсаторы».

Электрическое поле. Электрическое поле и конденсаторы.

Электрическое поле – это одна из двух сторон электромагнитного поля, характеризующаяся воздействием на электрически заряженную частицу с

силой, пропорциональной заряду частицы и не зависящей от её скорости.

Векторную величину, характеризующую электрическое поле и определяющую силу, действующую на заряженную частицу со стороны электромагнитного поля, называют напряжённостью электрического поля в данной точке:

$$E = F/Q \quad (1.1)$$

Напряжённость электрического поля точечного заряда:

$$E = \frac{Q}{4\pi r^2 \varepsilon_a}, \quad (1.2)$$

где r – расстояние между зарядом и точкой, в которой определяется напряжённость электрического поля, м;

ε_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, характеризующая диэлектрические свойства диэлектрика, Ф/м.

Сила взаимодействия двух точечных пробных зарядов выражаемая в Ньютонах (Н), определяется по закону Кулона:

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi r^2 \varepsilon_a}, \quad (1.3)$$

где Q_1 и Q_2 – электрические заряды, Кл;

r – расстояние между зарядами, м.

ε_a – Абсолютная диэлектрическая проницаемость среды (Ф/м)

ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума (диэлектрическая постоянная):

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ (Ф/м)}, \quad \varepsilon = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_0}, \quad (1.4)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость вещества. Эта величина показывает, во сколько раз абсолютная диэлектрическая проницаемость вещества, ε_a больше диэлектрической постоянной (справочная величина).

Электрическое напряжение и потенциал.

При перемещении заряда Q в равномерном поле на расстояние l по направлению сил поля совершается работа:

$$A = Fl = Eql. \quad (1.5)$$

При этом между крайними точками перемещения заряда существует напряжение U – величина, характеризующаяся работой, которая производится при перемещении единицы положительного заряда между двумя точками поля:

$$U = A/Q \quad \text{или} \quad U = El. \quad (1.6)$$

Напряжение между данной точкой электрического поля и другой произвольно выбранной точкой поля, потенциал которой условно принят равным нулю, называют потенциалом φ данной точки поля. В электротехнике нулевым потенциалом принято считать потенциал земли.

Напряжение между двумя точками электрического поля, имеющими потенциалы φ_1 и φ_2 :

$$U = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (1.7)$$

Потенциал, как и напряжение, измеряется в вольтах.

В веществе, помещаемом в электрическое поле, под действием сил электрического поля возникает направленное движение носителей зарядов (электронов, ионов) – электрический ток. Это свойство называют электропроводностью вещества. Степень электропроводности вещества оценивают удельной электрической проводимостью материала.

Все вещества подразделяют на проводники, полупроводники и диэлектрики.

Электрическая ёмкость конденсатора.

Электрический конденсатор – это система из двух проводников (обкладок, пластин), разделённых диэлектриком.

Электрический заряд Q каждой из обкладок пропорционален напряжению U между ними:

$$Q = CU \quad (1.8)$$

Величину C , равную отношению заряда одной из обкладок конденсатора к напряжению между ними, называют электрической ёмкостью конденсатора и выражают в фарадах (Ф).

Ёмкость плоского конденсатора:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon S / d = \varepsilon_a S / d, \quad (1.9)$$

где S – площадь каждой обкладки, пластины, м^2 ;

d – расстояние между обкладками, м .

Напряжённость электрического поля плоского конденсатора:

$$E = U/d, \quad (1.10)$$

где U – напряжение, приложенное к зажимам конденсатора, В .

Конденсаторы могут быть соединены последовательно, параллельно и смешанно.

Последовательное соединение. При таком соединении на обкладках всех конденсаторов будут одинаковые по величине заряды, т.е.:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots = Q_n = Q. \quad (1.11)$$

Напряжения на конденсаторах будут различны, так как они зависят от их ёмкостей:

$$U_1 = Q_1/C_1, \quad U_2 = Q_2/C_2, \quad \dots \quad U_n = \frac{Q_n}{C_n}. \quad (1.12)$$

Общее напряжение:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n. \quad (1.13)$$

Общая, или эквивалентная, ёмкость:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (1.14)$$

Параллельное соединение. При параллельном соединении напряжение на всех конденсаторах одинаково.

Заряды на обкладках отдельных конденсаторов при различной ёмкости:

$$Q_1 = UC_1, \quad Q_2 = UC_2, \quad \dots \quad Q_n = UC_n \quad (1.15)$$

Заряд, полученный всеми параллельно соединёнными конденсаторами:

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n. \quad (1.16)$$

Общая, или эквивалентная, ёмкость:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n. \quad (1.17)$$

Энергия электрического поля (Дж):

$$W = CU^2/2. \quad (1.18)$$

Методику и последовательность действий при решении задачи по теме «Электрическая ёмкость и конденсаторы» рассмотрим на конкретном примере.

Пример 1.1.

На рисунке 1.1 представлена схема соединения конденсаторов, где $C_1 = C_3 = 1$ мкФ, $C_2 = 2$ мкФ. Приложенное напряжение 50В.

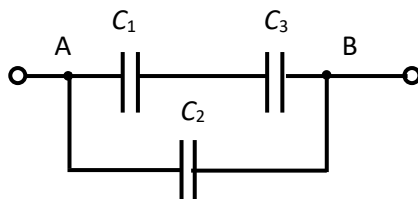


Рис. 1.1

Определить эквивалентную ёмкость и энергию заряженной батареи.

Делаем краткую запись условия задачи.

Дано: $C_1 = C_3 = 1$ мкФ, $C_2 = 2$ мкФ, $U = 50$ В.

Определить: $C_{\text{эКВ}}, W$

Решение.

1. Данная цепь (рис. 1.1) содержит две ветви. К узлам А и В подключены ветвь с конденсаторами C_1 и C_3 и ветвь с конденсатором C_2 . Конденсаторы C_1 и C_3 соединены последовательно, поэтому их эквивалентная ёмкость $C_{1,3}$ определим по следующей формуле:

$$C_{1,3} = \frac{C_1 C_3}{C_1} + C_3$$

$$C_{1,3} = 1 * 2 / (1 + 1) = 1 / 2 = 0,5 \text{ (мкФ)}.$$

Получается эквивалентная схема (рис. 1.2)

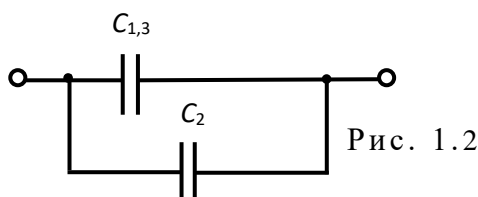


Рис. 1.2

2. Из схемы видно, что $C_{1,3}$ и C_2 соединены параллельно, поэтому эквивалентная ёмкость определяется по следующей формуле:

$$C = C_{1,3} + C_2$$

$$C = 0,5 + 2 = 2,5 (\text{мкФ}).$$

3. Определяем энергию заряженной батареи.

$$W = CU^2/2$$

$$W = 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 50^2 = 6250 \cdot 10^{-6} = 6,25 \cdot 10^{-3} (\text{Дж}) = 6,25 (\text{мДж}).$$


Тема 1.2

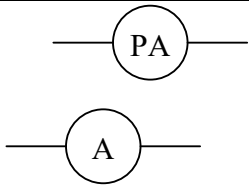
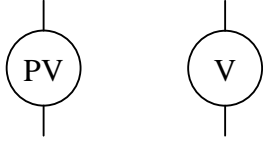
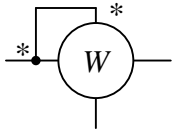
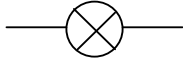
Для решения задачи по данной теме необходимо изучить главы «Простые электрические цепи постоянного тока»

Электрические цепи постоянного тока

Изображение электрических цепей и их элементов. В схемах реальных электрических устройств (электровозов, тепловозов и др.) отдельные элементы имеют свои условные обозначения. Некоторые из них приведены в табл. 1.

Табл. 1

Предохранитель плавкий	
Резистор (сопротивление постоянное)	
Реостат (сопротивление переменное), потенциометр	
Резистор нелинейный	
Элемент гальванический (химический)	
Батарея из гальванических (химических) элементов	
Конденсатор нерегулируемый (постоянной ёмкости)	
Конденсатор регулируемый (переменной ёмкости)	
Конденсатор электролитический	
Катушка индуктивности	
Дроссель (катушка индуктивности с ферромагнитным сердечником)	

Амперметр	
Вольтметр	
Ваттметр	
Лампа накаливания	

Электрический ток – это направленное движение носителей зарядов. Сила тока определяется количеством электричества (зарядом), проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = Q/t. \quad (1.22)$$

Единицей силы тока является ампер (А): $1 \text{ А} = 1 \text{ Кл} / 1 \text{ с}$

$$J = I/S, \quad (1.23)$$

Единицей плотности тока является (А/мм²):

где I – ток в проводнике, А;

S – площадь поперечного сечения, мм².

Электрическое сопротивление проводника:

Сопротивление проводника:

$$R = \rho l/S, \quad (1.24)$$

где ρ - удельное сопротивление, Ом·мм²/м, (справочная величина);

l – длина проводника, м;

S – площадь поперечного сечения, мм².

Сопротивление проводника зависит от температуры:

$$R_2 = R_1((1 + \alpha(t_2^0 - t_1^0)), \quad (1.25)$$

где R_1 – сопротивление проводника при температуре t_1^0 ;

R_2 – сопротивление проводника при температуре t_2^0 ;

α – температурный коэффициент сопротивления, он зависит от материала проводника.

С увеличением температуры сопротивление проводника возрастает.

Закон Ома для участка цепи: ток, проходящий по участку цепи, прямо пропорционален напряжению U , приложенному к этому участку, и обратно пропорционален его сопротивлению R , т.е.:

$$I = U/R, \quad (1.26)$$

где U – в вольтах (В);

R – в Омах (Ом).

Закон Ома для полной цепи:

$$I = \frac{E}{R+r}, \quad (1.27)$$

где E – электродвижущая сила источника электрической энергии, В;

R – сопротивление внешней цепи, Ом;

r – внутренне сопротивление источника, Ом.

Закон Джоуля – Ленца. Количество теплоты (Дж), выделенное при прохождении постоянного тока в проводнике:

$$Q = I^2 R t, \quad (1.28)$$

или

$$Q = 0,24 I^2 R t, \quad (1.29)$$

здесь Q выражено в калориях.

Методику и последовательность действий при решении задачи по теме «Электрическое сопротивление» рассмотрим на конкретном примере

Пример 1.2.

Определить длину медного провода диаметром 0,3 мм, сопротивление которого 82 Ом.

Решение

Краткая запись условия:

Дано: $R = 82$ Ом, $d = 0,3$ мм

Определить: l

Площадь поперечного сечения проводника

$$S = \pi \cdot d^2 / 4 = 3,14 \cdot 0,3^2 / 4 = 0,07 \text{ мм}^2$$

по табл. 2 (см. ниже) удельное сопротивление медного провода $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$,

$$\text{отсюда } l = SR / \rho = SR; \quad l = 0,07 \cdot 82 / 0,0175 = 328 \text{ м.}$$

Таб. 2

Материал	Удельное электрическое сопротивление Ом·мм ² /м	Среднее значение температурного коэффициента сопротивления от 0 до 100°С, град ⁻¹
Серебро	0,016	0,004
Медь	0,0175	0,004
Алюминий	0,029	0,004
Сталь	0,13 – 0,25	0,006
Манганин	0,42	0,000006
Константан	0,4 – 0,5	0,000005
Нихром	1,1	0,00015
Хромаль	1,3	0,00004
Фехраль	1,4	0,00028

Последовательное, параллельное и смешанное соединение резисторов. Эквивалентное сопротивление ряда последовательно соединённых резисторов равно сумме их сопротивлений:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (1.33)$$

Параллельным называют такое соединение резисторов, при котором между двумя узлами электрической цепи присоединено несколько резисторов.

Эквивалентное сопротивление ряда параллельно соединённых резисторов:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (1.34)$$

При параллельном соединении n ветвей с равными сопротивлениями в каждой ветви, т.е. $R = R_1 = R_2 = \dots = R_n$

$$R = R_n/n.$$

При параллельном соединении двух резисторов R_1 и R_2 их эквивалентное сопротивление:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (1.35)$$

Смешанное соединение резисторов – это последовательно-параллельное соединение резисторов или участков цепи.

Первый закон Кирхгофа. Сумма токов, направленных к узлу, равна сумме токов, направленных от узла, или алгебраическая сумма токов в узле равна нулю:

$$I_1 + I_3 + \dots + I_n = I_2 + I_4 + \dots + I_k, \quad (1.36)$$

где I_1, I_3, \dots, I_n – токи, направленные к узлу;

I_2, I_4, \dots, I_k – токи, направленные от узла, или

$$\sum I = 0.$$

Со знаком "+" записывают токи, направленные к узлу, со знаком "-", направленные от узла (рис. 1.3).

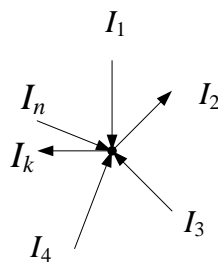


Рис. 1.3

Методику и последовательность действий при решении задачи рассмотрим на конкретном примере.

Пример 1.3

Определить эквивалентное сопротивление цепи, схема которой представлена на рис. 1.4, если заданы значения сопротивлений резисторов:

$R_1 = 8 \text{ Ом}$, $R_2 = 4 \text{ Ом}$, $R_3 = 2 \text{ Ом}$, $R_4 = 4 \text{ Ом}$, $R_5 = 4 \text{ Ом}$. Напряжение источника $U = 16 \text{ В}$. Вычислить ток, проходящий через каждый из резисторов и мощность, потребляемую данной цепью.

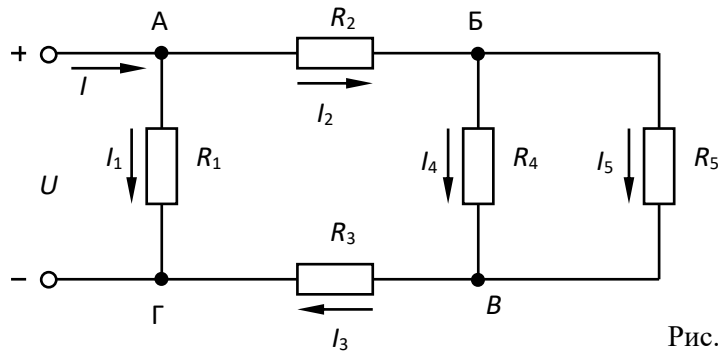


Рис. 1.4

Решение.

Краткая запись условия:

Дано: $R_1 = 8 \text{ Ом}$, $R_2 = 4 \text{ Ом}$, $R_3 = 2 \text{ Ом}$, $R_4 = 4 \text{ Ом}$, $R_5 = 4 \text{ Ом}$, $U = 16 \text{ В}$.

Определить: $R_{\text{экв}}$, I , I_1 , I_2 , I_3 , I_4 , I_5 , P .

Решение.

1. Обозначим на схеме направление токов на каждом из участков. Узлы цепи обозначим буквами А, Б, В, Г.

Для определения эквивалентного сопротивления будем последовательно упрощать схему (решать методом сворачивания).

2. Резисторы R_4 и R_5 соединены параллельно. Найдём общее сопротивление этого участка

$$R_{4,5} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} = 4 \cdot 4 / (4 + 4) = 2 \text{ Ом} \quad (1.37)$$

Получаем эквивалентную схему (рис. 1.5)

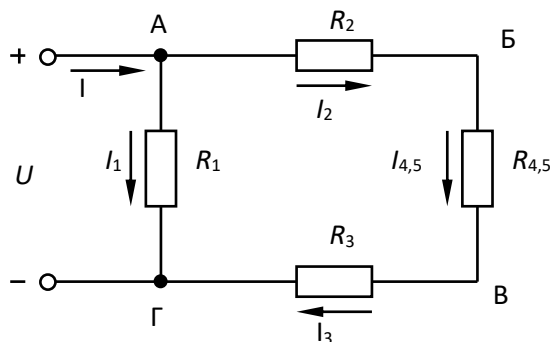


Рис. 1.5

3. На участке А, Б, В, Г резисторы $R_2, R_3, R_{4,5}$ соединены последовательно. Определим общее сопротивление этого участка

$$R_{2,3,4,5} = R_2 + R_3 + R_{4,5} = 4 + 2 + 2 = 8 \text{ Ом} \quad (1.38)$$

Составляем эквивалентную схему (рис. 1.6).

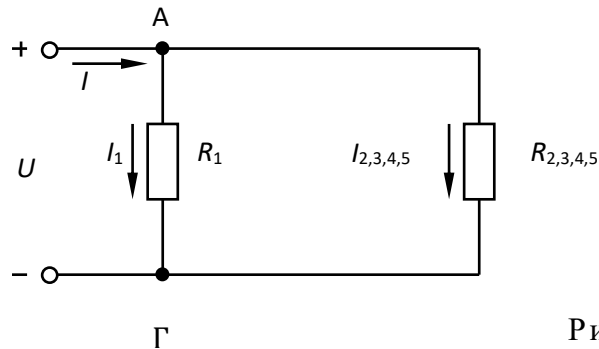


Рис. 1.5

4. На участке АГ (рис. 1.5) сопротивления R_1 и $R_{2,3,4,5}$ соединены параллельно. Определяем эквивалентное сопротивление этого участка и всей цепи

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_1 R_{2,3,4,5}}{R_1 + R_{2,3,4,5}} = \frac{8 \cdot 8}{8 + 8} = 4 \text{ Ом} \quad (1.39)$$

5. Определяем силу тока на неразветвлённом участке цепи

$$I = \frac{U}{R_{\text{экв}}} = 16/4 = 4 \text{ А.} \quad (1.40)$$

6. Участок АГ является разветвлённым (рис. 1.5) и содержит две ветви: с сопротивлением R_1 и с сопротивлением $R_{2,3,4,5}$. Напряжение на каждой из ветвей равно общему напряжению, поэтому можно определить силу тока в каждой из ветвей.

Сила тока первой ветви

$$I_{2,3,4,5} = \frac{U}{R_{2,3,4,5}} = 16/8 = 2 \text{ А.} \quad (1.41)$$

Сила тока второй ветви

$$I_{2,3,4,5} = \frac{U}{R_{2,3,4,5}} = 16/8 = 2 \text{ А.} \quad (1.42)$$

7. Рассмотрим схему (рис. 1.4). Ток $I_{2,3,4,5}$ протекает через сопротивления R_2 и R_3 , поэтому ток $I_{2,3,4,5}$ равен току, протекающему через сопротивление R_2 , равен току, протекающему через сопротивление $R_{4,5}$ и равен току, протекающему через сопротивление R_3

$$I_{2,3,4,5} = I_2 = I_{4,5} = I_3 = 2 \text{ (А).}$$

8. Для того, чтобы определить токи, протекающие через сопротивления R_4 и R_5 , необходимо определить напряжение на участке БВ (рис.1.5).

$$U_{БВ} = I_{4,5}R_{4,5} = 2 \cdot 2 = 4. \quad (1.43)$$

9. Сопротивления R_4 и R_5 соединены параллельно, поэтому напряжение на каждом из них равно напряжению $U_{БВ}$. Определяем силу тока в каждой из ветвей:

$$I_4 = \frac{U_{БВ}}{R_4} = 4/4 = 1 \text{ А}, \quad (1.44)$$

$$I_5 = \frac{U_{БВ}}{R_4} = 4/4 = 1 \text{ А}, \quad (1.45)$$

10. Определяем мощность, потребляемую всей цепью

$$P = UI = 4 \cdot 16 = 64 \text{ Вт}. \quad (1.46)$$

12. Выполним проверку, применив I закон Кирхгофа. Рассмотрим узел А (рис. 1.4):

$$I = I_1 + I_2 = 2 + 2 = 4 \text{ А}. \quad (1.47)$$

Рассмотрим узел Б (рис.1.4):

$$I_2 = I_4 + I_5 = 1 + 1 = 2 \text{ (А)} \quad (1.48)$$

Способы соединения химических источников энергии в батарее

Для решения задачи необходимо изучить материал по теме "Химические источники тока". Химические источники соединяются в батарею. Соединение элементов может быть последовательным, параллельным или смешанным. Соединение в батарею допускается только для однородных элементов, имеющих одинаковые ЭДС, внутреннее сопротивление и емкость.

Последовательное соединение элементов в батарее.

Если номинальное напряжение источника энергии больше напряжения одного элемента, а его ток не превышает допустимого разрядного тока одного элемента, то применяют последовательное соединение элементов (Рис. 1.7). При этом положительный полюс первого элемента соединяют с отрицательным полюсом второго, положительный полюс второго с отрицатель-

ным третьего и т. д. Отрицательный полюс первого и положительный полюс последнего элемента являются полюсами созданной таким образом батареи. ЭДС всех элементов при последовательном соединении направлены в одну сторону.

При последовательном соединении элементов ток батареи равен току элемента $I_6 = I_3$; ЭДС батареи E_6 равно: $E_6 = nE_3$.

Напряжение батареи: $U_6 = nU_3$

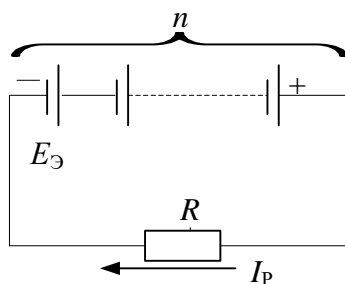


Рис. 1.7

Параллельное соединение элементов в батарее.

В тех случаях, когда номинальное напряжение приёмника энергии равно напряжению одного элемента, а его ток больше допустимого разрядного тока одного элемента, применяют параллельное соединение элементов (1.8). при этом положительные полюсы отдельных элементов соединяют в один узел, а отрицательные – в другой. К узловым точкам подключают приёмник с сопротивлением R .

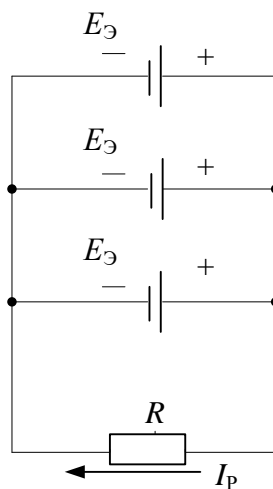


Рис. 1.8

При параллельном соединении элементов ток батареи: $I_6 = mI_3$, ЭДС батареи равно ЭДС элемента $E_6 = E_3$; напряжение батареи равно напряжению элемента $U_6 = U_3$.

Смешанное соединение элементов в батарее.

Смешанное соединение элементов (рис. 1.9) применяется при увеличении напряжения и ёмкости батареи. ЭДС, внутреннее сопротивление и ток батареи в этом случае определяются так: $E_6 = nE_3$; $r_{вн} = nr_3/m$; $I_6 = mI_3$,

где n – число элементов одной ветви батареи, соединённых последовательно;

m – число ветвей батареи.

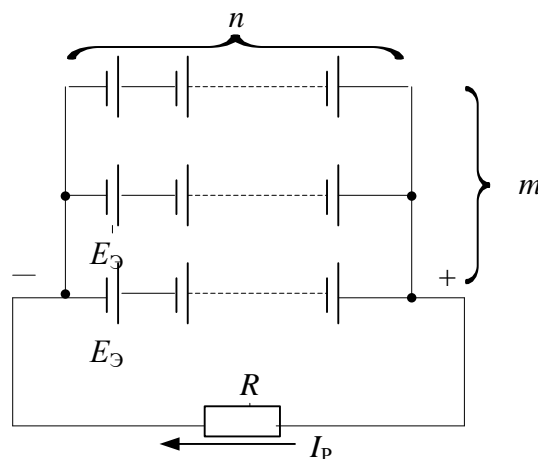


Рис. 1.9

Пример 1.4

Имеются кислотные аккумуляторные элементы с ЭДС $E_3 = 2\text{В}$ и ёмкостью $Q_3 = 22\text{ Ач}$ при 10-часовом разряде.

Рассчитать аккумуляторную батарею для питания приемника, который требует ЭДС $E_6 = 36\text{ В}$ и ток $I = 4,6\text{ А}$.

Решение.

Краткая запись условия:

Дано: $E_3 = 2\text{В}$; $Q_3 = 22\text{ Ач}$; $t = 10\text{ ч}$; $E_6 = 36\text{ В}$; $I = 4,6\text{ А}$.

Определить: n ; m ; I_3 .

Начертить схему (См. рис. 1.8).

1. Количество последовательно соединённых элементов:

$$n = \frac{E_3}{E_6} = \frac{36}{2} = 18 \quad (1.50)$$

2. Разрядный ток одного элемента:

$$I_3 = Q_3/t = 22/10 = 2,2 \text{ А} \quad (1.51)$$

3. Количество параллельных групп:

$$m = \frac{I_6}{I_3} = \frac{4,6}{2,2} \approx 2 \quad (1.52)$$

Тема 1.3

Электромагнетизм

Для решения задачи по данной теме необходимо изучить главы «Магнитное поле».

Электромагнитная сила.

На проводник с током длиной l , находящийся в магнитном поле, перпендикулярно направлению поля действует сила F (закон Ампера), выражаемая в ньютонах (Н):

$$F = I \cdot B \cdot l. \quad (1.53)$$

Если проводник с током расположен под углом α к вектору магнитной индукции B , то:

$$F = I \cdot B \cdot l \cdot \sin \alpha. \quad (1.54)$$

Величины, характеризующие магнитное поле.

1. B – магнитная индукция. По закону Ампера, установленному опытным путём, известно, что на проводник с током действует электромагнитная

$$\text{сила } B = F / I l. \quad (1.55)$$

Отсюда следует, что магнитная индукция есть величина численно равна силе, которая действует на проводник длиной 1 метр с током 1 А, помещённый в однородное магнитное поле перпендикулярно его направлению (рис. 1.10).

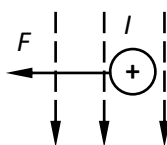


Рис. 1.10

Размерность магнитной индукции $[B] = \text{Вб/м}^2$

Магнитная индукция – величина векторная. Направление вектора индукции в каждой точке совпадает с направлением поля.

2. Φ – Магнитный поток – произведение магнитной индукции однородного поля и величины площадки, перпендикулярной вектору этой индукции, называется магнитным потоком.

$$\Phi = B S. \quad (1.56)$$

Размерность магнитного потока

$$[\Phi] = B S = (\text{Вб/м}^2) \cdot \text{м}^2 = \text{Вб}$$

Перпендикулярно вектору магнитной индукции B однородного поля расположена площадка S (рис. 1.11).

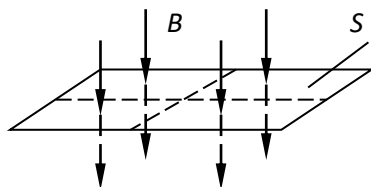


Рис. 1.11

3. Абсолютная и относительная проницаемость.

Интенсивность магнитного поля зависит от среды (вещества), в которой оно возникает. Магнитные свойства веществ характеризуются абсолютной магнитной проницаемостью. Абсолютная магнитная проницаемость пустоты (вакуума) называется магнитной постоянной:

$$\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}.$$

Отношение абсолютной магнитной проницаемости данного вещества μ_a к магнитной постоянной μ_0 называется относительной магнитной проницаемостью μ .

$$\mu = \mu_a / \mu_0 \quad (1.57)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость, показывающая, во сколько раз абсолютная магнитная проницаемость данного материала больше магнитной постоянной.

Абсолютная магнитная проницаемость вещества:

$$\mu_a = \mu_0 \cdot \mu, \quad (1.58)$$

4. Напряжённость магнитного поля.

В проводнике с током и в пространстве вокруг него возникает магнитное поле. За направление магнитного поля в заданной точке принимается такое, которое укажет северный конец магнитной стрелки, помещённой в эту точку. Направление магнитных линий вокруг прямолинейного проводника с током определяется по правилу буравчика.

Напряжённость магнитного поля – вектор, направление которого совпадает с направлением поля в данной точке.

$$H = \frac{B}{\mu_a} = \frac{B}{\mu \cdot \mu_0}. \quad (1.59)$$

Размерность напряжённости магнитного поля

$$[H] = \text{А/м}$$

Взаимодействие проводников с током.

Сила взаимодействия проводников, по которым проходят токи I_1 и I_2 :

$$F = \mu_a \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot l, \quad (1.60)$$

где μ_a – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м;

l – длина проводника, м; a – расстояние между ними, м;

F – сила взаимодействия, Н.

Магнитная индукция во всех точках, расположенных на расстоянии a от оси провода:

$$B = \mu_a \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot a}. \quad (1.61)$$

Методику и последовательность действий при решении задачи рассмотрим на конкретном примере.

Пример 1.5

По прямолинейному проводу воздушной линии проходит ток 500 А. Определить напряжённость магнитного поля H и магнитную индукцию B в

точке М, расположенной от проводника на расстоянии $X = 0,5$ м. Начертить проводник. Задавшись направлением тока в проводнике, показать направление векторов напряжённости и магнитной индукции поля в точке М.

Решение.

Краткая запись условия:

Дано: $I = 500$ А, $a = 0,5$ м, $\mu = 1$.

Определить: B, H

1. Начертим схему (рис. 1.12).

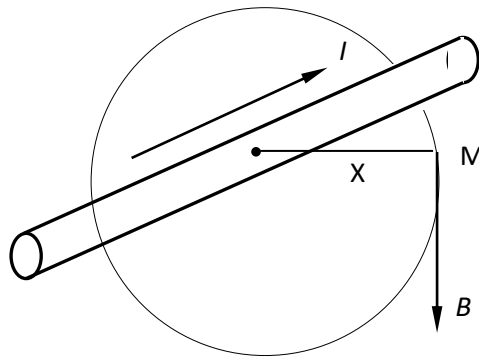


Рис. 1.12

Зададимся направлением тока в проводе. Применяя правило буравчика, определяем направление магнитной силовой линии, проходящей через заданную точку М. Векторы напряжённости поля H и магнитной индукции B в точке м направлены по касательной к магнитной силовой линии в данной точке.

2. Напряжённость H в данной точке симметричного магнитного поля, создаваемого током, проходящим по прямолинейному проводнику, определяется по формуле:

$$H = I / 2 a \quad (1.62)$$

$$H = 500 / 3,14 \cdot 0,5 = 159 \text{ (А/м)}$$

3. Магнитная индукция в точке М:

$$B = \mu_0 \cdot \mu \cdot H \quad (1.63)$$

$$B = 1 \cdot 4 \pi \cdot 10^{-7} \cdot 159 = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ (Тл)},$$

где $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная

μ – относительная магнитная проницаемость среды, в которой нахо-

дится провод (для воздуха $\mu = 1$).

Пример 1.6

Кольцевая катушка намотана на каркасе из магнитного материала. Внутренний радиус катушки $R_1 = 1,5$ см, а внешний радиус $R_2 = 2,5$ см. напряжённость магнитного поля по средней магнитной линии катушки $H = 3600$ А/м, ток в катушке $I = 10$ А.

Определить число витков катушки ω и магнитную индукцию B по средней линии катушки.

Решение.

Краткая запись условия:

Дано: $R_1 = 1,5$ см, $R_2 = 2,5$ см, $H = 3600$ А/м, $I = 10$ А, $\mu = 1$.

Определить: ω , B .

1. Делаем рисунок, поясняющий условие задачи (рис. 1.13).

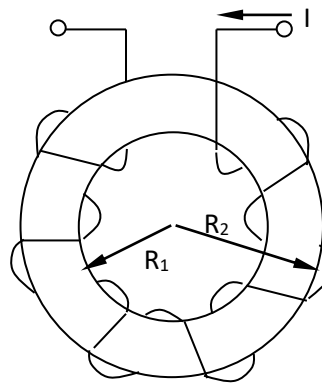


Рис. 1.13

2. Индукция магнитного поля по средней линии катушки:

$$B = \mu_0 \cdot \mu \cdot H \quad (1.64)$$

$$B = 1 \cdot 4 \pi \cdot 10^{-7} \cdot 3600 = 4,52 \cdot 10^{-3} \text{ (Тл)},$$

где $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м) – магнитная постоянная

$\mu = 1$ относительная магнитная проницаемость немагнитного материала сердечника катушки.

3. Число витков ω найдём по средней магнитной линии

$$H = I \cdot \omega / 2\pi \cdot R_{\text{CP}}, \quad (1.65)$$

$$\text{где } R_{\text{CP}} = (R_1 + R_2) / 2 \quad (1.61)$$

$$R_{\text{CP}} = (1,5 + 2,5) / 2 = 2 \text{ (см)} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ (м)},$$

$$\omega = 2\pi \cdot R_{\text{CP}} \cdot H / I \quad (1.66)$$

$$\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 3600 / 10 = 45 \text{ (витков)}.$$

Пример 1.7

По двум параллельным шинам длиной 20 м протекает ток 1000 А. На каком расстоянии друг от друга нужно разместить шины, чтобы действующая на них сила не превышала 10 Н? Провода находятся в воздухе.

Решение.

Краткая запись условия:

Дано: $l = 20$ м, $I = 1000$ А, $\mu = 1$, $F = 10$ Н.

Определить: a .

1. Сила воздействия на каждый из проводников с током:

$$F = \mu_a \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot l \quad (1.67)$$

$$\text{отсюда } a = \mu_a \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l / F \quad (1.68)$$

где $\mu_a = \mu \mu_0$, так как провода находятся в воздухе, то принимаем

$$\mu = 1, \text{ т. е. } \mu_a = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$$

$$a = 4 \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000 \cdot 1000 \cdot 20 / 2 \pi = 0,4$$

Тема 1.4

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Переменный электрический ток (э.д.с., напряжение) – это ток (э.д.с., напряжение), изменяющийся с течением времени. Значение этой величины в рассматриваемый момент времени называется мгновенным значением тока (э.д.с., напряжения).

По оси абсцисс отложено время t , а по оси ординат – ток i . Значение тока, э.д.с., напряжения в любой данный момент времени называют *мгновенными значениями* и обозначают строчными буквами i , u , e . Наибольшие мгновенные значения изменяющихся величин – *амплитудными значениями* и обозначают прописными буквами с индексом m : I_m , U_m , E_m .

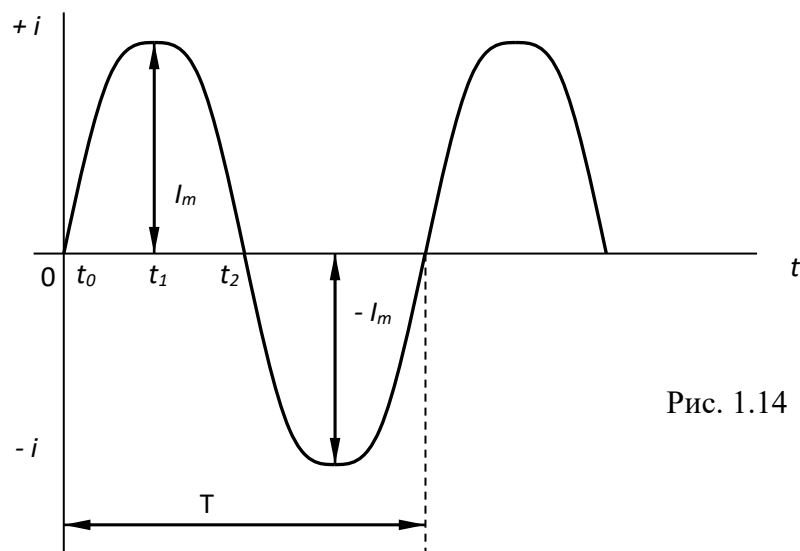


Рис. 1.14

Время T , в течение которого переменный ток совершает полный цикл своих изменений, называется периодом переменного тока, а число периодов в секунду – его *циклической частотой*:

$$f = 1 / T \quad (1.69)$$

Единицей частоты в СИ служит герц (Гц). Частота равна 1 Гц, если полный цикл изменения тока совершается за 1 с. В нашей стране и в Европе промышленной частотой является 50 Гц.

Угловая частота (угловая скорость) измеряется в радианах в секунду (рад/с) и связана с циклической частотой:

$$\omega = 2\pi f \quad (1.70)$$

Цепь переменного тока с активным сопротивлением.

Если цепь переменного тока обладает только активным сопротивлением (цепь с резистором) и к её зажимам приложено синусоидально изменяющееся напряжение

$$u = U_m \sin \omega t, \quad (1.71)$$

то по закону Ома мгновенное значение тока в цепи

$$i = u/R = (U_m / R) \sin \omega t, \quad (1.72)$$

где U_m – амплитудное значение напряжения (В),

$I_m = U_m / R$ – амплитудное значение тока (А).

Действующее значение тока

$$I = U / R \quad (1.73)$$

Средняя за период мощность или активная мощность цепи, выражаемая в ваттах (Вт),

$$P = UI = I^2/R = U^2/R \quad (1.74)$$

Напряжение и ток находятся в одной фазе ($\varphi = 0^\circ$). Векторная диаграмма тока и напряжения представлена на рис. 1.15

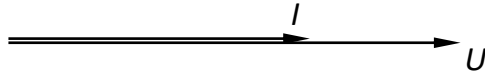


Рис. 1.15

Цепь переменного тока с индуктивностью.

Если электрическая цепь обладает только индуктивностью L (активное сопротивление катушки равно 0) и по ней проходит синусоидальный ток, то на индуктивности напряжение по фазе опережает ток на угол $\varphi = \pi/2$. Векторная диаграмма такой цепи представлена на рис. 1.16.

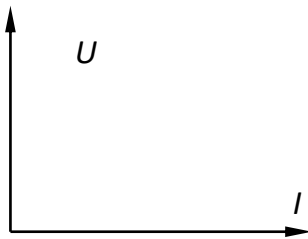


Рис. 1.16

Сопротивление катушки является индуктивным (один из видов реактивного сопротивления), зависит от частоты и определяется по формуле

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \quad (1.75)$$

Действующее значение тока

$$I = U/X_L = U/\omega L = U/2\pi fL \quad (1.76)$$

Цепь с индуктивностью обладает только реактивной мощностью, максимальное значение которой выражается в вольт-амперах (вар) и определяется по формуле

$$Q = UI = I^2 X_L \quad (1.77)$$

Неразветвлённая цепь переменного тока с активным сопротивлением и индуктивностью.

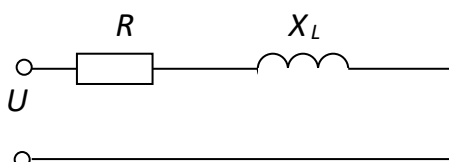


Рис. 1.17

Полное сопротивление цепи (Ом) определяется по формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (1.78)$$

где R – активное сопротивление цепи

X_L – реактивное сопротивление цепи

Ток в цепи определяется по закону Ома ($I = U/Z$).

Полное сопротивление Z графически изображают гипотенузой прямоугольного треугольника сопротивлений (рис. 1.18), катетами этого треугольника являются активное R и индуктивное X_L (реактивное) сопротивления.

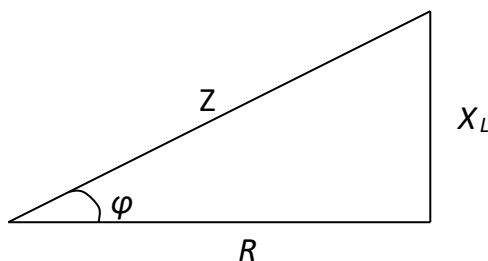


Рис. 1.18

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности. В зависимости от его значения при неизменном токе и входном напряжении активная мощность может изменяться то нуля (при $\varphi = \pi / 2$) до максимального значения (при $\varphi = 0$).

Коэффициент мощности определяется

$$\cos \varphi = R/Z \quad (1.79)$$

Активная мощность цепи определяется

$$P = UI \cos \varphi = U_a I = I^2 R \quad (1.80)$$

Реактивная мощность цепи определяется

$$Q = UI \sin \varphi = U_L I = I^2 X_L \quad (1.81)$$

На каждом из элементов цепи создаётся падение напряжения, на активном сопротивлении U_a , а на индуктивном сопротивлении U_p соответственно:

$$U_a = IR \quad (1.82)$$

$$U_p = IX_L \quad (1.83)$$

Векторная диаграмма представлена на рис. 1.19

Напряжение опережает ток на угол φ

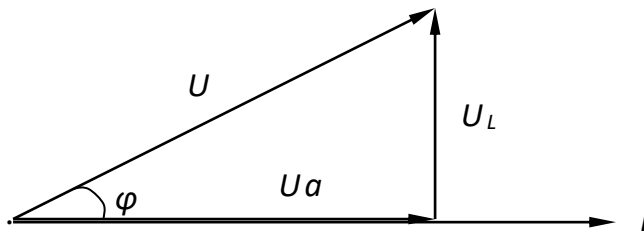


Рис. 1.19

Цепь переменного тока с ёмкостью.

Если электрическая цепь обладает только ёмкостью C (конденсатор без потерь) и по ней приложено напряжение переменного тока, то в цепи проходит ток по фазе опережающий напряжение на угол $\varphi = \pi / 2$. Векторная диаграмма такой цепи представлена на рис. 1.20.

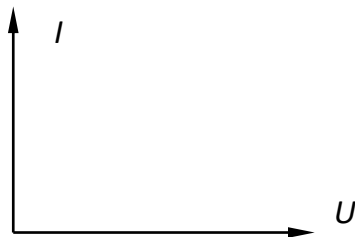


Рис. 1.20

Сопротивление конденсатора является ёмкостным (один из видов реактивного сопротивления), зависит от частоты и определяется по формуле

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = 1/2 \pi f C \quad (1.84)$$

Действующее значение тока

$$I = U/X_C = U/\omega C \quad (1.85)$$

Цепь с ёмкостью обладает только реактивной мощностью, максимальное значение которой выражается в вольт-амперах (вар) и определяется по формуле

$$Q = UI = I^2 X_C \quad (1.86)$$

Неразветвлённая цепь переменного тока с активным сопротивлением и ёмкостью.

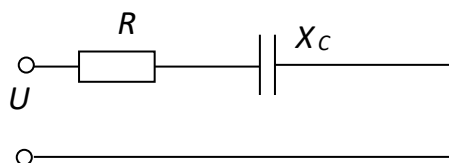


Рис. 1.21

Полное сопротивление цепи (Ом) определяется по формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \quad (1.87)$$

где R – активное сопротивление цепи

X_C – реактивное сопротивление цепи

Ток в цепи определяется по закону Ома ($I = U/Z$).

Треугольник сопротивлений представлен на рис. 1.22.

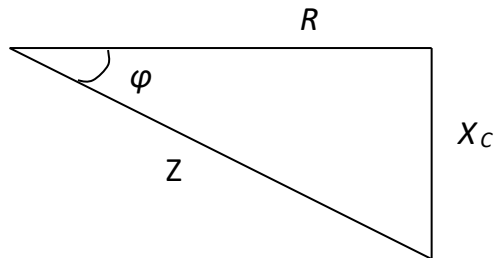


Рис. 1.22

Активная мощность цепи определяется

$$P = UI \cos \varphi = U_a I = I^2 R \quad (1.88)$$

Реактивная мощность цепи определяется

$$Q = UI \sin \varphi = U_C I = I^2 X_C \quad (1.89)$$

На каждом из элементов цепи создаётся падение напряжения, на активном сопротивлении U_a , а на ёмкостном сопротивлении U_P соответственно:

$$U_a = IR \quad (1.90)$$

$$U_P = IX_C \quad (1.91)$$

Векторная диаграмма представлена на рис. 1.23.

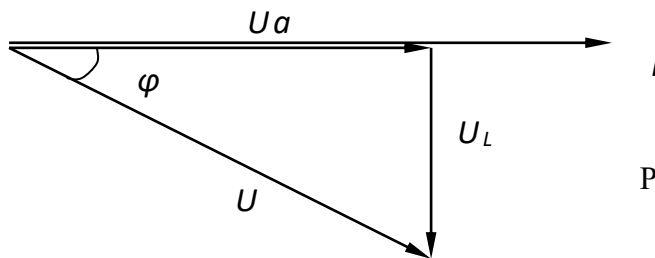


Рис. 1.23

Ток опережает напряжение (напряжение отстает от тока) на угол φ .

Неразветвлённая цепь переменного тока с активным сопротивлением, индуктивностью и ёмкостью.

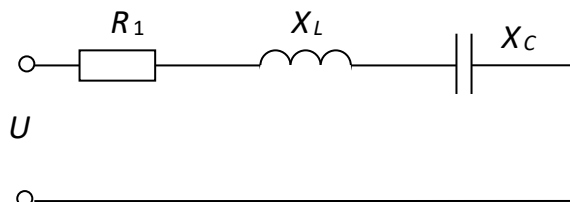


Рис. 1.24

В данной цепи два вида реактивного сопротивления: индуктивное и ёмкостное, поэтому реактивное сопротивление цепи определяется следующим образом

$$X = X_L - X_C \quad (1.92)$$

Полное сопротивление цепи (Ом) определяется по формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \quad (1.93)$$

где R – активное сопротивление цепи

X – реактивное сопротивление цепи

Ток в цепи определяется по закону Ома ($I = U/Z$).

Если $X_L - X_C < 0$, характер цепи активно-ёмкостный. Треугольник сопротивлений на рис. 1.25.

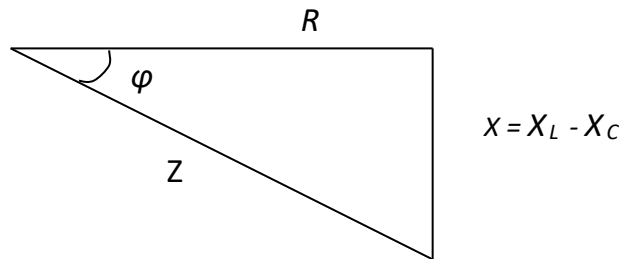


Рис. 1.25

Если $X_L - X_C > 0$, характер цепи активно-индуктивный. Треугольник сопротивлений на рис. 1.26.

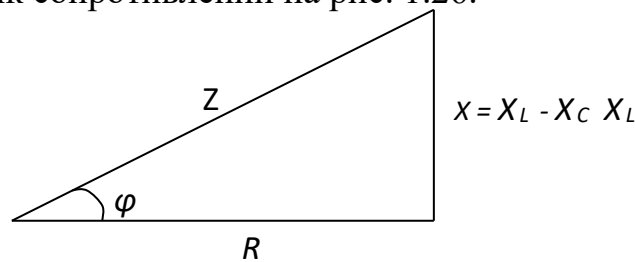


Рис. 1.26

Активная мощность цепи определяется

$$P = UI \cos \varphi = U_a I = I^2 R \quad (1.94)$$

Реактивная мощность цепи определяется

$$Q = UI \sin \varphi = U_L I = I^2 X_L - X_C \quad (1.95)$$

На каждом из элементов цепи создаётся падение напряжения, на активном сопротивлении U_a , на индуктивном U_L , на ёмкостном сопротивлении U_C соответственно:

$$U_a = IR \quad (1.96)$$

$$U_C = IX_C \quad (1.97)$$

$$U_L = IX_L \quad (1.98)$$

Реактивное напряжение

$$U_P = U_L - U_C = I(X_L - X_C) \quad (1.99)$$

Векторная диаграмма для случая $(X_L - X_C) < 0$ представлена на рис.

1.27.

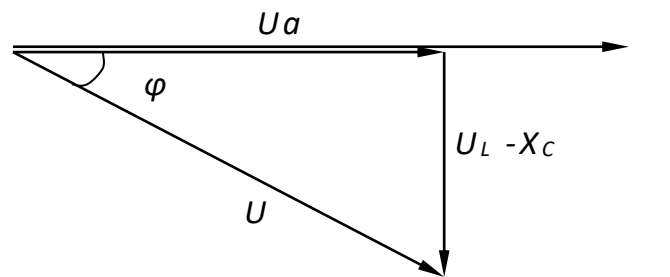


Рис. 1.27

Ток опережает напряжение (напряжение отстает от тока) на угол φ .

Векторная диаграмма для случая $(X_L - X_C) > 0$ представлена на рис.

1.28.

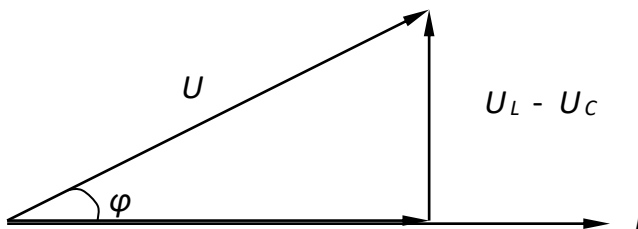


Рис. 1.28

Ток отстает от напряжения (напряжение опережает ток) на угол φ .

Разветвлённые цепи переменного тока

На рис. 1.29 представлена разветвлённая цепь, состоящая из двух ветвей.

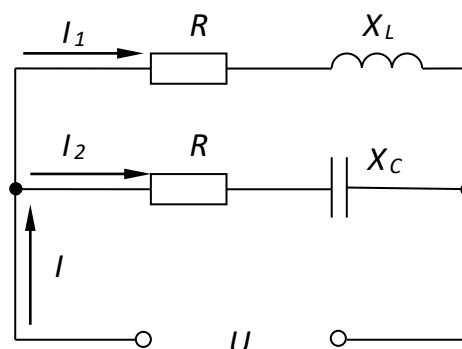


Рис. 1.29

Две ветви включены параллельно, поэтому напряжение на каждой из них равно общему напряжению.

$$U = U_1 = U_2 \quad (1.100)$$

Токи в каждой из ветвей определяются по закону Ома.

$$I_1 = U_1/Z_1, \quad I_2 = U_2/Z_2 \quad (1.101)$$

Так как в каждой из ветвей есть активное и реактивное сопротивление, то эти токи могут быть представлены двумя составляющими – активной I_a , и реактивной I_p .

Активная составляющая тока совпадает по фазе с приложенным напряжением

$$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1 = I_1 R_1/Z_1 \quad (1.102)$$

$$I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2 = I_2 R_2/Z_2$$

Реактивная составляющая тока

$$I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1 = I_1 X_1/Z_1 \quad (1.103)$$

$$I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2 = I_2 X_2/Z_2$$

Реактивная составляющая тока сдвинута относительно приложенного напряжения на угол $\varphi = \pm \pi/2$, в зависимости от вида реактивного сопротивления.

Активная мощность каждой из ветвей определяется

$$P_1 = UI_{a1}, \quad P_2 = UI_{a2} \quad (1.104)$$

Реактивная мощность каждой из ветвей

$$Q_1 = UI_{p1}, \quad Q_2 = UI_{p2} \quad (1.105)$$

Векторная диаграмма представлена на рис. 1.30.

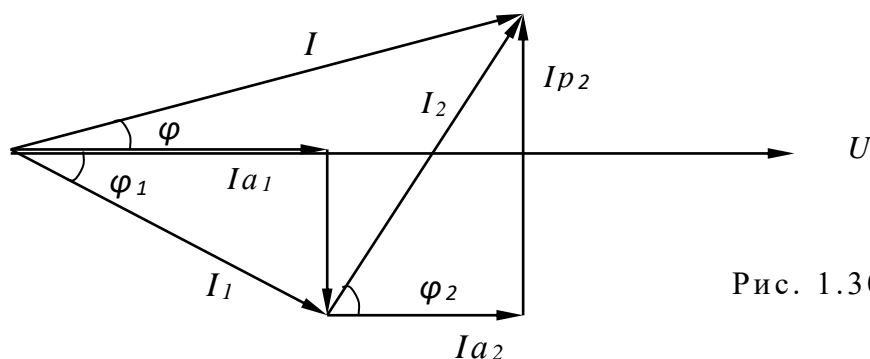


Рис. 1.30

На этой векторной диаграмме фактически представлены векторные диаграммы двух параллельных ветвей. В первой ветви последовательно соединены резистор R и катушка индуктивности L . Ток активного элемента совпадает с напряжением, а в катушке отстаёт на угол $\varphi = \pi/2$. Ток первой ветви равен геометрической сумме этих токов.

Во второй ветви последовательно соединены резистор R и конденсатор C . Ток активного элемента совпадает с напряжением, а в конденсаторе опережает напряжение на угол $\varphi = \pi/2$. Ток второй ветви равен геометрической сумме этих токов.

Ток I на неразветвлённом участке цепи равен геометрической сумме токов I_1 и I_2 .

Угол сдвига фазы между напряжением U и током I для данной схемы определяется

$$\cos \varphi = I_a / I. \quad (1.106)$$

Активный ток всей цепи находится как сумма активных составляющих отдельных ветвей

$$I = I_{a1} + I_{a2} \quad (1.107)$$

Реактивный ток всей цепи находится как сумма реактивных составляющих отдельных ветвей

$$I = I_{p1} + I_{p2} \quad (1.108)$$

Характер реактивных сопротивлений в ветвях различный, поэтому при определении тока I надо учитывать направление векторов реактивных токов. Ток I определяется по формуле

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{(I_{a1} + I_{a2})^2 + (I_{p1} - I_{p2})^2} \quad (1.109)$$

Пример 1.8

Катушка с активным сопротивлением $R_1 = 4$ Ом и реактивным сопротивлением $X_L = 12$ Ом включена последовательно с резистором, сопротивление которого $R_2 = 2$ Ом и с конденсатором, сопротивление которого $X_C = 4$ Ом. К цепи приложено напряжение с действующим значением 100 В. Опре-

делить: полное сопротивление цепи, силу тока, коэффициент мощности, активную, реактивную и полную мощность цепи, падение напряжения на каждом элементе схемы. Начертить в масштабе векторную диаграмму тока и напряжений. Схема представлена на рис. 1.31.

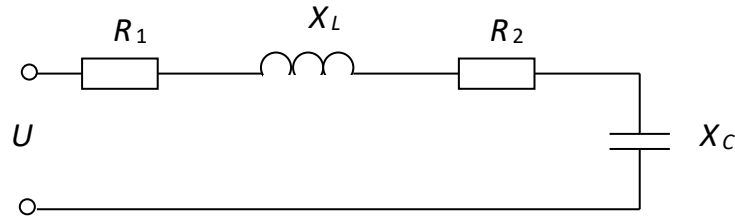


Рис. 1.31

Решение.

Краткая запись условия:

Дано: $R_1 = 4 \text{ Ом}$, $X_L = 12 \text{ Ом}$, $R_2 = 2 \text{ Ом}$, $X_C = 4 \text{ Ом}$, $U = 100 \text{ В}$.

Определить: Z , I , $\cos \varphi$, P , Q , S , U_{a1} , U_{a2} , U_L , U_C .

1. Определяем полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (1.110)$$

где R – активное сопротивление цепи. Оно равно сумме активных сопротивлений отдельных участков цепи:

$$R = R_1 + R_2 \quad (1.111)$$

$$R = 4 + 2 = 6 \text{ (Ом)},$$

X – реактивное сопротивление цепи. Оно равно сумме реактивных сопротивлений отдельных участков цепи:

$$X = X_L + X_C \quad (1.112)$$

$$X = 12 + (-4) = 8 \text{ (Ом)},$$

Полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10 \text{ (Ом)}$$

2. Определяем силу тока в цепи

$$I = U/Z \quad (1.113)$$

$$I = 100 / 10 = 10 \text{ (А)},$$

3. Определяем коэффициент мощности цепи

$$\cos \varphi = R / Z \quad (1.114)$$

$$\cos \varphi = 6/10 = 0,6$$

4. Определяем активную мощность цепи

$$P = I^2 \cdot R \quad (1.115)$$

$$P = 10^2 \cdot 6 = 600 \text{ (Вт)},$$

5. Определяем реактивную мощность цепи

$$Q = I^2 \cdot X \quad (1.116)$$

$$Q = 10^2 \cdot 8 = 800 \text{ (вар)},$$

6. Определяем полную мощность цепи

$$S = I^2 \cdot Z \quad (1.117)$$

$$S = 10^2 \cdot 10 = 1000 \text{ (ВА)}.$$

Полную мощность цепи можно определить и так:

$$S = I \cdot U \quad (1.118)$$

$$S = 10 \cdot 100 = 1000 \text{ (ВА)}.$$

8. Для построения векторной диаграммы необходимо определить падения напряжения на каждом из элементов схемы:

Определяем падение напряжения на участке R_1

$$U_{a_1} = I \cdot R_1 = 10 \cdot 4 = 40 \text{ (В)},$$

Определяем падение напряжения на участке R_2

$$U_{a_2} = I \cdot R_2 = 10 \cdot 2 = 20 \text{ (В)},$$

Определяем активное напряжение цепи

$$U_a = U_{a_1} + U_{a_2} = 40 + 20 = 60 \text{ (В)}$$

Определяем падение напряжения на участке X_L

$$U_{p_1} = U_L = I \cdot X_L = 10 \cdot 12 = 120 \text{ (В)},$$

Определяем падение напряжения на участке X_C

$$U_{p_2} = I \cdot X_C = 10 \cdot 4 = 40 \text{ (В)},$$

Построение векторной диаграммы начинаем с выбора масштаба для напряжения. Задаёмся масштабом $M_U = 10 \text{ (В/см)}$.

Построение векторной диаграммы (рис. 1.32) начинаем с построения вектора тока, так как при последовательном соединении элементов схемы ток на всех участках цепи одинаковый. Направляем вектор тока по оси X .

По вектору тока направляем вектор активного напряжения цепи, так как угол сдвига фазы между током и напряжением на активных элементах схемы равен нулю. Длина вектора активного напряжения

$$l = U_a / M_U = 40 \text{ (В)} / 10 \text{ (В/см)} = 4 \text{ (см)}.$$

Из конца вектора активного напряжения откладываем в сторону опережения вектор реактивного напряжения $U_{p1} = U_L$. Длина вектора реактивного напряжения

$$l = U_{p1} / M_U = 120 \text{ (В)} / 10 \text{ (В/см)} = 12 \text{ (см)}.$$

Из конца вектора реактивного напряжения U_{p1} откладываем в сторону запаздывания вектор реактивного напряжения $U_{p2} = U_C$. Длина вектора реактивного напряжения

$$l = U_{p2} / M_U = 40 \text{ (В)} / 10 \text{ (В/см)} = 4 \text{ (см)}.$$

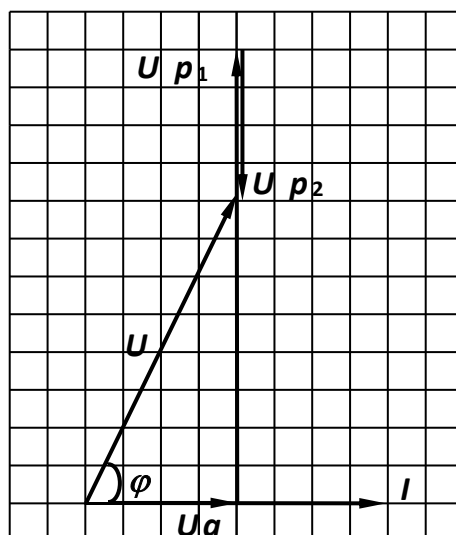


Рис. 1.32

Соединяем начало первого вектора U_a с концом последнего вектора U_{p2} и получаем геометрическую сумму векторов U_a , U_{p1} , U_{p2} . Она равна напряжению, приложенному к цепи.

Из векторной диаграммы видно, что характер цепи активно-индуктивный и напряжение опережает ток на угол φ .

Пример 1.9

Катушка с активным сопротивлением $R = 8 \text{ Ом}$ и индуктивным сопротивлением $X_L = 6 \text{ Ом}$ включена параллельно с конденсатором, сопротивление которого $X_C = 20 \text{ Ом}$ (Рис. 1.33). К цепи приложено напряжение с действующим

щим значением 60 В. Определить: силу тока в каждой из ветвей и на неразветвлённом участке цепи, активную, реактивную мощность ветвей и всей цепи, полную мощность цепи, коэффициент мощности. Начертить в масштабе векторную диаграмму токов и напряжения. Схема представлена на рис.

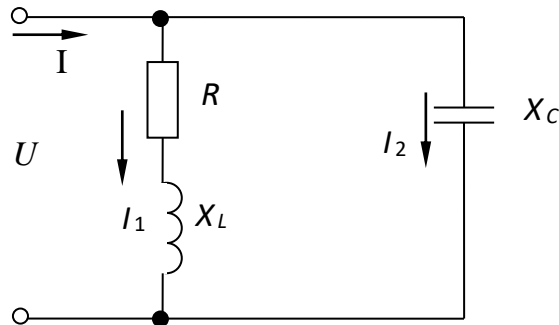


Рис. 1.33

Решение.

1. Краткая запись условия задачи.

Дано: $R = 8 \text{ Ом}$, $X_L = 6 \text{ Ом}$, $X_C = 20 \text{ Ом}$, $U = 60 \text{ В}$.

Определить: I_1 , I_2 , $\cos \varphi_1$, $\cos \varphi_2$, $\cos \varphi$, P , Q , S .

2. Определяем полное сопротивление каждой из ветвей (см. формулы 1.87 и 1.78):

$$Z_1 = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = \sqrt{64 + 36} = 10(\text{Ом});$$

$$Z_2 = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{0 + 20^2} = 20(\text{Ом}).$$

Так как во второй ветви отсутствует активное сопротивление (включён один конденсатор), то $Z_2 = X_C = 20 \text{ (Ом)}$

3. Определяем ток в каждой из ветвей (по закону Ома)

Ток первой ветви $I_1 = U / Z_1 = 60 / 10 = 6 \text{ (А)}$

Ток второй ветви $I_2 = U / Z_2 = 60 / 20 = 3 \text{ (А)}$

4. Определяем угол сдвига фазы между током и напряжением в каждой из ветвей (см. формулу 1.75):

$$\cos \varphi_1 = R_1 / Z_1 = 8 / 10 = 0,8; \quad \varphi_1 = 36^\circ 50'$$

$$\cos \varphi_2 = R_2 / Z_2 = 0 / 10 = 0; \quad \varphi_2 = 90^\circ$$

5. Определяем активные составляющие токов ветвей:

$$I_{a1} = I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 6 \cdot 0,8 = 4,8 \text{ (А)}$$

$$I_{a2} = I_2 \cdot \cos \varphi_2 = 3 \cdot 0 = 0$$

$$I_{P1} = I_1 \cdot \sin \varphi_1 = 6 \cdot 0,6 = 3,6 \text{ (A)}$$

$$I_{P2} = I_1 \cdot \sin \varphi_2 = 3 \cdot 1 = 3 \text{ (A)}$$

6. Определяем ток на неразветвлённом участке цепи $I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$

$$I = \sqrt{(4,8 + 0)^2 + (3,6 - 3)^2} = 4,83 \text{ (A)}$$

7. Определяем коэффициент мощности всей цепи

$$\cos \varphi = (I_{a1} + I_{a2}) / I = (4,8 + 0) / 4,83 = 0,992$$

8. Определяем активную мощность отдельных ветвей и всей цепи:

$$P_1 = I_1^2 \cdot R_1 = 6^2 \cdot 8 = 288 \text{ (Вт)}$$

$$P_2 = I_2^2 \cdot R_2 = 3^2 \cdot 0 = 0$$

$$P = P_1 + P_2 = 288 + 0 = 288 \text{ (Вт)}$$

8. Определяем реактивную мощность отдельных ветвей и всей цепи:

$$Q_1 = I_1^2 \cdot X_1 = I_1^2 \cdot X_L = 6^2 \cdot 6 = 216 \text{ (вар)}$$

$$Q_2 = I_2^2 \cdot X_2 = I_2^2 \cdot X_C = 3^2 \cdot (-20) = -180 \text{ (вар)}$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = 216 - 180 = 36 \text{ (вар)}$$

Реактивная мощность ветви с конденсатором отрицательная.

9. Полная мощность цепи

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{288^2 + 36^2} = 296 \text{ (ВА)}$$

Ток на неразветвлённом участке цепи можно определить и без разложения токов ветвей на активные и реактивные составляющие

$$I = S / U = 296 / 60 = 4,83 \text{ (A)}$$

10. Построение векторной диаграммы (рис. 1.34) начинаем с построения вектора напряжения, так как при параллельном соединении элементов схемы напряжение на ветвях цепи одинаковый. Направляем вектор напряжения по оси X .

Задаёмся масштабом $M_I = 1 \text{ (A/см)}$.

По вектору напряжения направляем вектор активного тока первой ветви I_1 , так как угол сдвига фазы между током и напряжением на активных элементах схемы равен нулю. Длина вектора тока I_{a1}

$$l = I_{a1} / M_I = 4,8 \text{ (A)} / 1 \text{ (A/см)} = 4,8 \text{ (см)}.$$

Из конца вектора активного тока откладываем в сторону отставания вектор реактивного тока I_{p1} . Длина вектора реактивного тока

$$l = I_{p1} / M_I = 3,6 \text{ (A)} / 1 \text{ (A/см)} = 3,6 \text{ (см)}.$$

Соединяем вектор токов I_{a1} и I_{p1} и получаем вектор тока первой ветви I_1 .

Из конца вектора тока I_1 надо откладывать вектор тока I_{a1} , но во второй ветви отсутствует активный элемент, поэтому откладываем в сторону опережения вектор реактивного тока I_{p2} . Этот ток будет равен току I_2 . Длина вектора реактивного тока

$$l = I_{p2} / M_I = 3 \text{ (A)} / 1 \text{ (A/см)} = 3 \text{ (см)}.$$

Соединяем начало первого вектора I_{a1} с концом последнего вектора I_{p2} и получаем геометрическую сумму векторов токов. Она равна току на неразветвлённом участке цепи, приложенному к цепи.

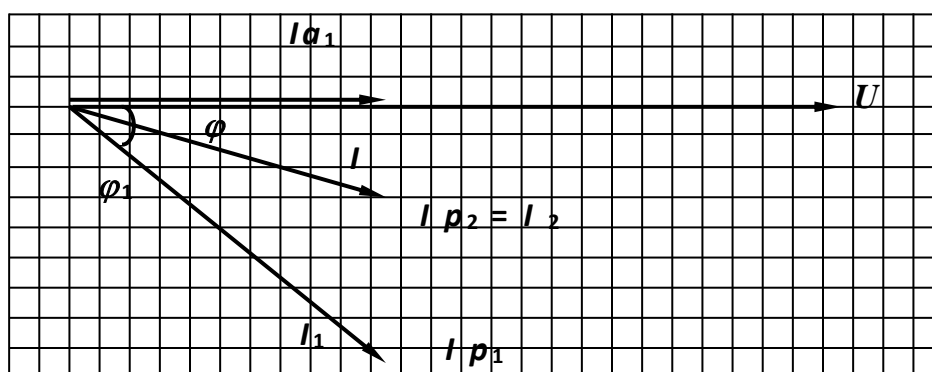


Рис. 1.34

Тема 1.5

Трёхфазные цепи

Трёхфазная система электрических токов (э.д.с., напряжений) – это совокупность трёх синусоидальных электрических токов (э.д.с., напряжений) одной частоты, сдвинутых по фазе на 120° . При равенстве амплитуд токов (э.д.с., напряжений) во всех фазах систему называют *симметричной*.

Часть этой системы, где проходит один из трёх токов, называют *фазой трёхфазной системы*.

Если отдельные фазы генератора и приёмника соединены между собой, то такую систему называют *связанной* трёхфазной системой, в которую фазы могут быть соединены в звезду или треугольник.

Соединение обмоток генератора и приёмников энергии в звезду.

Звезда – это такое соединение, когда к началам обмоток генератора A , B , C присоединяют три линейных провода, идущих к приёмнику, а концы обмоток X , Y , Z соединены в узел, называемый *нейтральной* или *нулевой точкой*.

В четырёхпроводной системе к этой точке присоединен нейтральный (нулевой) провод, в трёхпроводной системе он отсутствует.

Напряжение между началами и концами фаз генератора (между линейными проводами и нейтральным проводом) называют *фазным напряжением*. Напряжение между любыми двумя линейными проводами называют *линейным напряжением*.

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

При соединении в звезду линейные токи являются и фазными. Поэтому принято записывать $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$

где $I_{\text{л}}$ – линейный ток, $I_{\text{ф}}$ – фазный ток.

Линейное напряжение равно разности векторов соответствующих фазных напряжений:

$$\vec{U}_{AB} = \vec{U}_A - \vec{U}_B \quad (1.119)$$

$$\vec{U}_{BC} = \vec{U}_B - \vec{U}_C \quad (1.120)$$

$$\vec{U}_{CA} = \vec{U}_C - \vec{U}_A \quad (1.121)$$

Для симметричной системы напряжений

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}}, \quad (1.122)$$

где $U_{\text{л}}$ – линейное напряжение; $U_{\text{ф}}$ – фазное напряжение.

Векторная сумма линейных напряжений всегда равна нулю.

При соединении приёмников энергии в звезду трёхфазная цепь может быть четырёхпроводной (1.35).

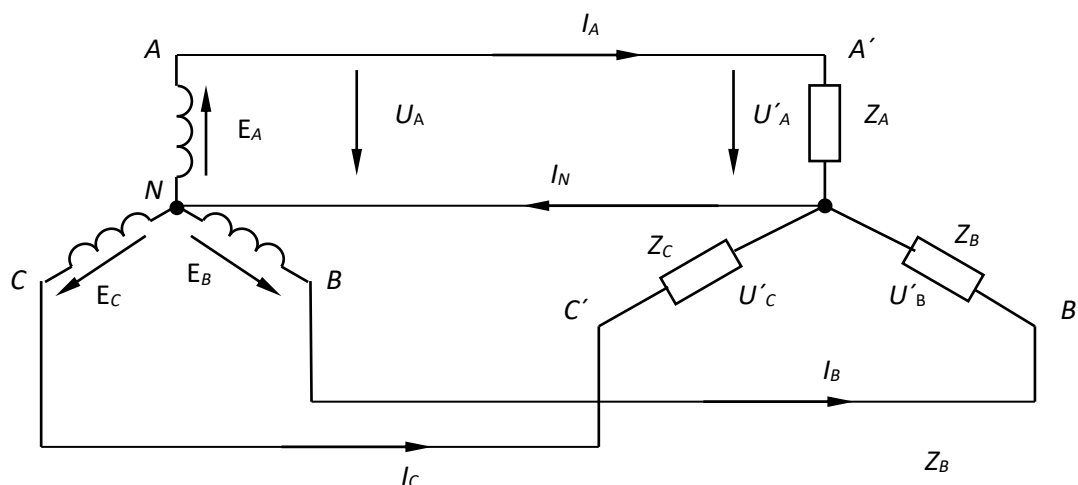


Рис. 1.35

Действующие значения токов в фазах приёмников:

$$I_{\phi} = U_{\phi} / Z_{\phi} \quad (1.123)$$

$$I_A = U_A / Z_A; \quad I_B = U_B / Z_B; \quad I_C = U_C / Z_C;$$

где U_A, U_B, U_C – действующие значения фазных напряжений,

Z_A, Z_B, Z_C – полные сопротивления фаз приёмников.

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

$$\vec{I}_N = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C, \quad (1.124)$$

где I_N – ток в нейтральном проводе.

Если нагрузка равномерная, ток в нейтральном проводе отсутствует.

В четырёхпроводной трёхфазной цепи при симметричной системе напряжений и равномерной нагрузке, т. е. равенстве полных сопротивлений фаз приёмников $Z_A = Z_B = Z_C$, ток в нейтральном проводе равен нулю.

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

$$P = P_A + P_B + P_C, \quad (1.125)$$

где P – активная мощность всей цепи;

P_A, P_B, P_C – активные мощности фаз A, B, C

Если нагрузка неравномерная, то мощность надо определять отдельно для каждой фазы:

$$P_A = U_A \cdot I_A \cdot \cos \varphi_A; \quad P_B = U_B \cdot I_B \cdot \cos \varphi_B; \quad P_C = U_C \cdot I_C \cdot \cos \varphi_C; \quad (1.126)$$

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

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C, \quad (1.127)$$

где Q – реактивная мощность всей цепи;

Q_A, Q_B, Q_C – реактивные мощности фаз A, B, C

Если нагрузка неравномерная, то мощность надо определять отдельно для каждой фазы:

$$Q_A = U_A \cdot I_A \cdot \sin \varphi_A; \quad (1.128)$$

$$Q_B = U_B \cdot I_B \cdot \sin \varphi_B;$$

$$Q_C = U_C \cdot I_C \cdot \sin \varphi_C.$$

Полная потребляемая мощность цепи при неравномерной нагрузке

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.129)$$

где P – активная мощность всей цепи;

Q – реактивная мощность всей цепи.

При симметричной системе напряжений и равномерной нагрузке активная мощность всей цепи:

$$P = 3U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \varphi_\phi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi \quad (1.130)$$

реактивная мощность всей цепи:

$$Q = 3U_\phi \cdot I_\phi \cdot \sin \varphi_\phi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi \quad (1.131)$$

полная мощность всей цепи:

$$S = 3U_\phi \cdot I_\phi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L. \quad (1.132)$$

Соединение обмоток генератора и приёмников энергии в треугольник.

Треугольник – это такое соединение, когда конец обмотки генератора одной фазы соединяют с началом обмотки другой фазы ($A-X, B-Y, C-Z$). Соединение обмоток генератора и приёмников энергии в треугольник показано

на рис. 1.36.

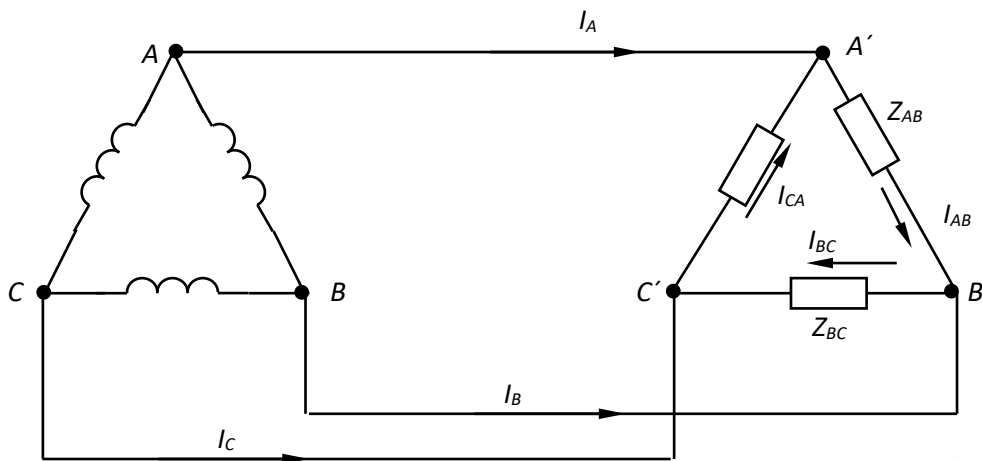


Рис. 1.36

При соединении приёмника энергии в треугольник сопротивлений Z_{AB} , Z_{BC} , Z_{CA} подключают непосредственно к линейным проводам, поэтому линейные напряжения являются одновременно и фазными для приёмников.

Положительное направление линейных и фазных токов указано на рис. 1.33

Соотношения между линейными и фазными токами можно записать, применив первый закон Кирхгофа для узлов A , B , C

$$\vec{I}_A = \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{CA}; \quad (1.133)$$

$$\vec{I}_B = \vec{I}_{BC} - \vec{I}_{AB}; \quad (1.134)$$

$$\vec{I}_C = \vec{I}_{CA} - \vec{I}_{BC}, \quad (1.135)$$

где I_A ; I_B ; I_C — линейные токи трёхфазной цепи,

I_{AB} ; I_{BC} ; I_{CA} — токи в фазах A , B , C .

Вектор любого линейного тока находится как разность векторов соответствующих фазных токов.

При симметричной системе напряжений и равномерной нагрузке, т.е. при $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA}$, следующее соотношение фазных и линейных токов:

$$I_L = \sqrt{3} I_\phi. \quad (1.136)$$

Полная, активная и реактивная мощности определяются аналогично расчёту при соединении нагрузки в звезду.

При соединении приёмников энергии звездой сеть может быть четырёхпроводной (при наличии нейтрального провода), при соединении приёмников энергии треугольником – только трёхпроводной.

Пример 1.10

Осветительные лампы трёх этажей станции соединены звездой и присоединены к трёхфазной четырёхпроводной линии с действующим значением линейного напряжения $U_{\text{Л}} = 380 \text{ В}$ и частотой $f = 50 \text{ Гц}$ (рис. 1.37). Число ламп на каждом этаже различное. В фазе A 20 ламп, в фазе B 30 ламп, в фазе C 40 ламп. Мощность каждой лампы 100 Вт.

Определить: фазные токи I_A, I_B, I_C при одновременном включении всех ламп на каждом этаже; активные мощности фаз P_A, P_B, P_C и мощность, потребляемую всеми лампами. Ответить на вопрос: чему будет равен ток в нейтральном проводе? Построить в масштабе векторную диаграмму токов и напряжений.

Решение.

Краткая запись условия:

Дано: $U_{\text{Л}} = 380 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $n_A = 20$, $n_B = 30$, $n_C = 40$,

$P_{\text{ЛАМП}} = 100 \text{ Вт}$.

Определить: $I_A, I_B, I_C, P_A, P_B, P_C, P$.

1. Чертим схему подключения нагрузки (рис. 1.36)

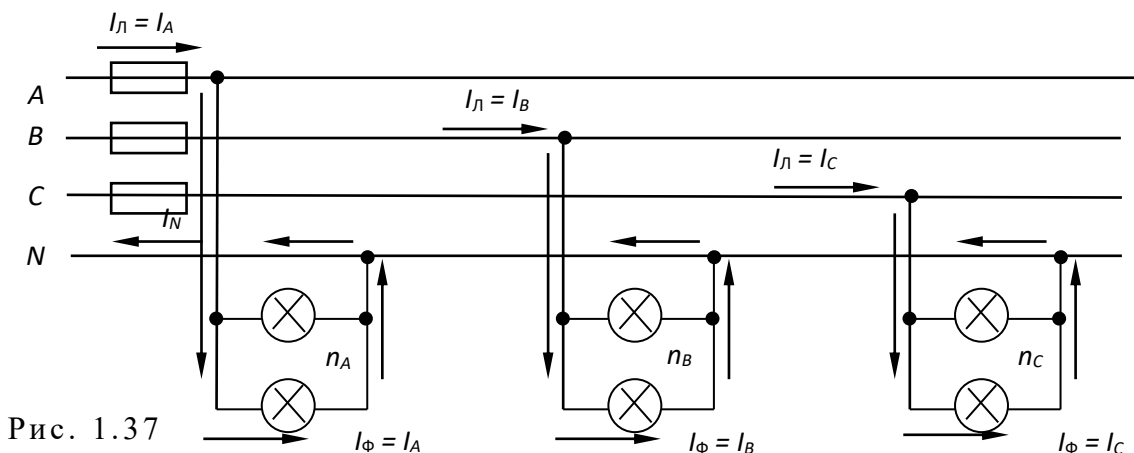


Рис. 1.37

2. Нагрузка соединена звездой, $U_{\text{Л}} = 380 \text{ В}$, поэтому $U_{\phi} = 220 \text{ В}$ ($U_{\phi} = U_{\text{Л}} / \sqrt{3}$).

3. Определяем мощность, потребляемую лампами каждой фазы:

$$P_{\Phi} = P_{\text{ЛАМП}} \cdot n_{\Phi} \quad (1.137)$$

$$P_A = 100 \cdot 20 = 2000 \text{ (Вт)}$$

$$P_B = 100 \cdot 30 = 3000 \text{ (Вт)}$$

$$P_C = 100 \cdot 40 = 4000 \text{ (Вт)}$$

Определяем мощность, потребляемую всеми лампами.

$$P = 2000 + 3000 + 4000 = 9000 \text{ (Вт)}$$

4. Определяем фазные токи (нагрузка активная, поэтому $\cos\varphi = 1$)

$$P_{\Phi} = U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} \quad (1.138)$$

отсюда $I_{\Phi} = P_{\Phi} / U_{\Phi}$

$$I_A = P_A / U_{\Phi} = 2000 / 220 = 9,09 \text{ (А)}$$

$$I_B = P_B / U_{\Phi} = 3000 / 220 = 13,63 \text{ (А)}$$

$$I_C = P_C / U_{\Phi} = 4000 / 220 = 18,18 \text{ (А)}$$

5. Нагрузка равномерная, поэтому ток в нулевом (нейтральном) проводе отсутствует ($I_N = 0$).

6. Для построения векторной диаграммы выбираем масштаб $M_I = 2 \text{ А / см}$. Длина векторов:

$$l_{I\Phi} = I_{\Phi} / M_I \quad (1.139)$$

$$l_{IA} = I_A / M_I = 9,09 / 2 = 4,95 \text{ (см)}$$

$$l_{IB} = I_B / M_I = 13,63 / 2 = 6,8 \text{ (см)}$$

$$l_{IC} = I_C / M_I = 18,18 / 2 = 9,09 \text{ (см)}$$

7. Строим звезду фазных напряжений. Углы между векторами этих напряжений 120° (рис.1.38).

8. Нагрузка активная, поэтому вектора фазных токов и напряжений будут совпадать. Из точки N по вектору соответствующего напряжения в выбранном масштабе строим вектора токов. Получилась векторная диаграмма фазных токов и напряжений.

9. Геометрически складываем фазные токи и получаем ток вектор тока в нейтральном проводе. Определяем величину этого тока: $I_N = l_I \cdot M_I$

На рис. 1.38 представлена векторная диаграмма токов и напряжений.

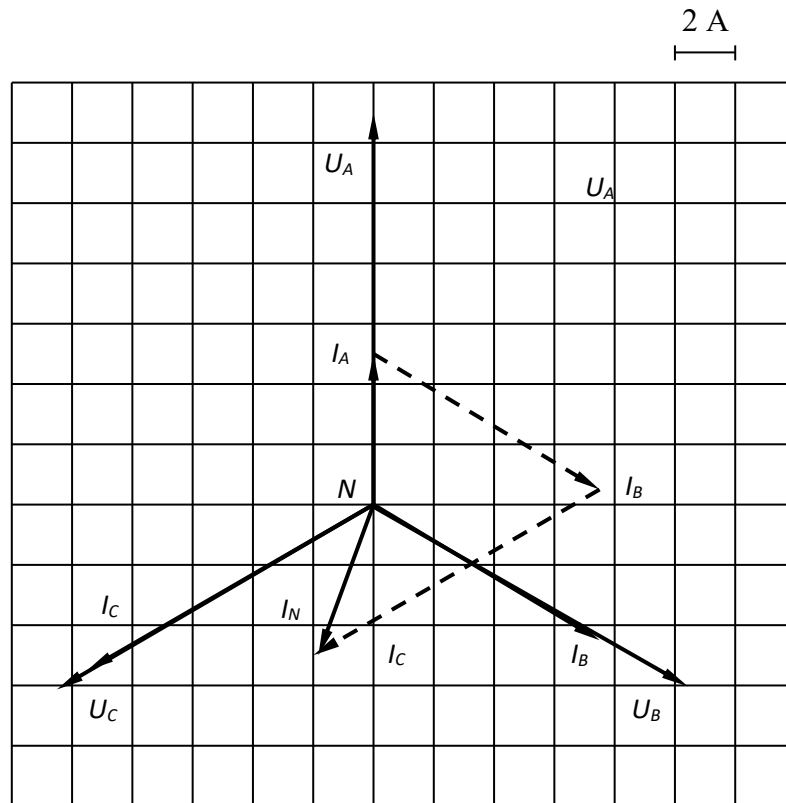


Рис. 1.38

Пример 1.11

К источнику трёхфазной сети с действующим значением линейного напряжения $U_{\text{л}} = 380$ В и частотой $f = 50$ Гц подключена равномерная нагрузка, соединённая по схеме "звезда", с полным сопротивлением в фазе $Z = 90$ Ом и индуктивностью $L = 180$ мГн. Определить активную, реактивную и полную мощности, коэффициент мощности, действующие значения фазного и линейного токов, фазного напряжения. Построить в масштабе векторную диаграмму токов и напряжений.

Решение.

1. Краткая запись условия задачи.

Дано: $U_{\text{л}} = 380$ В, $f = 50$ Гц, $Z_{\text{ф}} = 90$ Ом, $L_{\text{ф}} = 180$ мГн.

Определить: P , Q , S , $I_{\text{ф}}$, $I_{\text{л}}$, $\cos \varphi$, $U_{\text{ф}}$

1. Чертим схему подключения нагрузки (рис. 1.39)

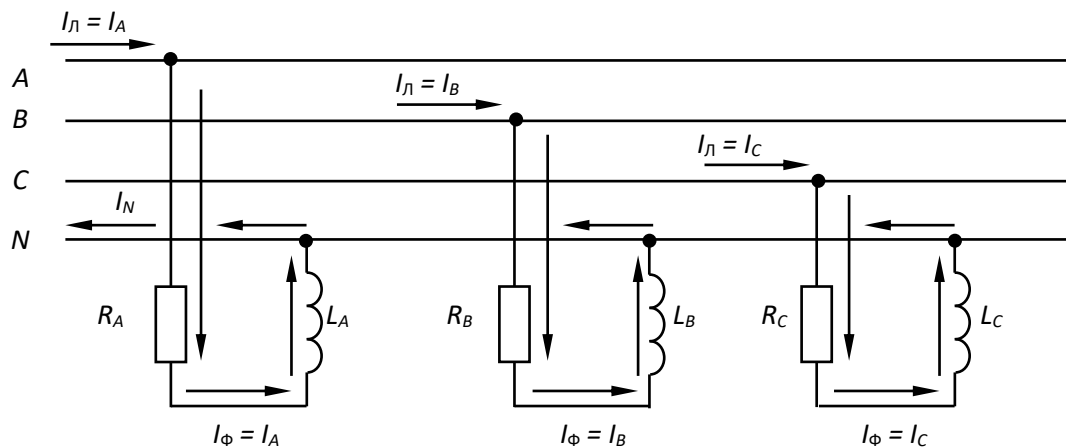


Рис. 1.39

2. Так как $U_{\text{Л}} = 380 \text{ В}$, то $U_{\Phi} = 220 \text{ В}$ ($U_{\Phi} = U_{\text{Л}} / \sqrt{3}$)

3. Нагрузка равномерная, поэтому токи фазные равны ($I_A = I_B = I_C = I_{\Phi}$). Определяем фазные токи, они равны линейным, т. к. нагрузка включена звездой

$$I_{\Phi} = U_{\Phi} / Z_{\Phi} \quad (1.140)$$

$$I_{\Phi} = I_{\text{Л}} = 220 / 90 = 2,44 \text{ (А)}$$

4. Определяем реактивное сопротивление каждой фазы

$$X_L = 2\pi fL \quad (1.141)$$

$$X_L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 180 \cdot 10^{-3} = 56,52 \text{ (Ом)}$$

5. Определяем активное сопротивление каждой фазы

$$R = \sqrt{Z^2 - X_L^2} \quad (1.142)$$

$$R = \sqrt{90^2 - 56,52^2} = 70,04 \text{ (Ом)}$$

6. Определяем коэффициент мощности $\cos \varphi = R/Z$ (1.143)

$$\cos \varphi = 70,04 / 90 = 0,778$$

7. Определяем полную мощность

$$S = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} \quad (1.144)$$

$$S = 3 \cdot 220 \cdot 2,44 = 1610,4 \text{ (ВА)}$$

8. Определяем активную мощность

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad (1.145)$$

$$P = 1610,4 \cdot 0,778 = 1252,89 \text{ (Вт)}$$

9. Определяем реактивную мощность

$$Q = S \cdot \sin \varphi \quad (1.146)$$

$$\cos \varphi = 0,778, \sin \varphi = 0,395$$

$$Q = 1610,4 \cdot 0,395 = 635,65 \text{ (вар)}$$

10. Для построения векторной диаграммы выбираем масштаб $M_I = 0,5$ А / см длина векторов:

$$l_{I\phi} = I_{\phi} / M_I \quad (1.147)$$

$$l_{IA} = l_{IB} = l_{IC} = I_A / M_I = 2,44 / 0,5 = 4,88 \text{ (см)}$$

11. Строим звезду фазных напряжений. Углы между векторами этих напряжений 120° .

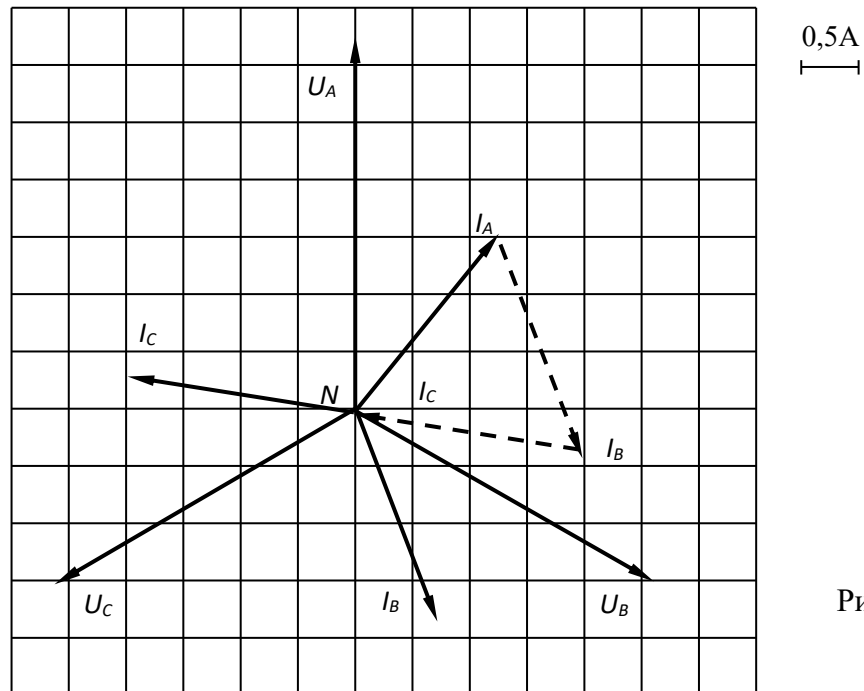


Рис. 1.40

12. Нагрузка активно-емкостная, поэтому вектора фазных токов будем вращать по часовой стрелке относительно векторов напряжений на угол $38,9^\circ$. Из точки N по вектору соответствующего напряжения в выбранном масштабе строим вектора токов. Получилась векторная диаграмма фазных токов и напряжений.

13. Геометрически складываем фазные токи и получаем ток вектор тока в нейтральном проводе.

14. Из векторной диаграммы (рис. 1.40) видно, что вектора токов I_A, I_B

и I_C составляют правильный треугольник, и конец вектора тока I_C совмещается с точкой N . Т. е., в данном случае при равномерной нагрузке ток в нейтральном проводе отсутствует ($I_N = 0$).

Пример 1.12

К источнику трёхфазной сети с действующим значением линейного напряжения $U_L = 380$ В подключен двигатель, активная мощность которого 15 кВт. Обмотки двигателя соединены по схеме "треугольник". Коэффициент мощности 0,87. Определить фазное напряжение, фазные и линейные токи, полное сопротивление цепи, реактивную и полную мощности. Построить в масштабе векторную диаграмму токов и напряжений.

Решение.

1. Краткая запись условия задачи.

Дано: $U_L = 380$ В, $\cos \varphi = 0,87$, $P = 15$ кВт

Определить: P , Q , S , I_ϕ , I_L , Z_ϕ , U_ϕ

1. Чертим схему подключения нагрузки (рис. 1.41)

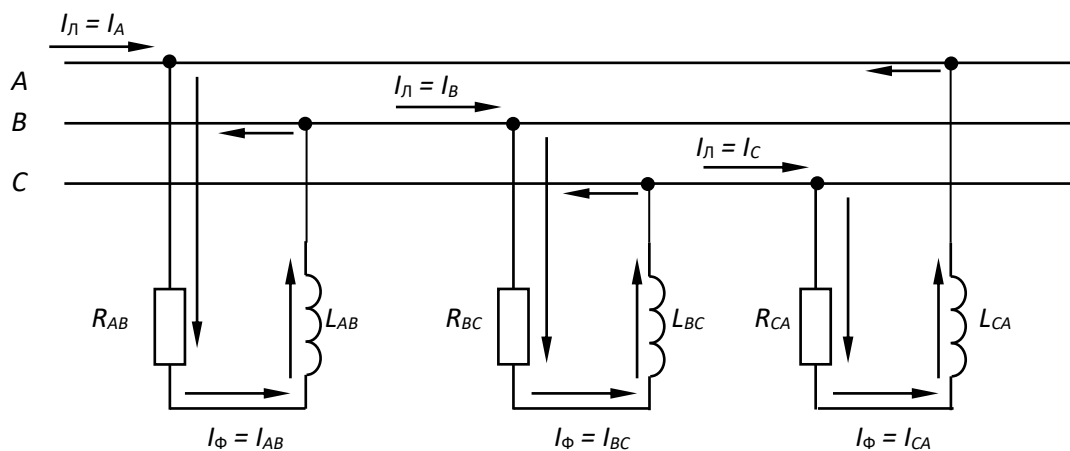


Рис. 1.41

2. Нагрузка включена треугольником, поэтому $U_\phi = U_L = 380$ В

3. Определяем фазный ток из формулы активной мощности

$$P = 3U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \varphi_\phi, \text{ отсюда}$$

$$I_\phi = P / 3U_\phi \cos \varphi_\phi \quad (1.148)$$

Нагрузкой является двигатель, т. е. нагрузка является симметричной.

Токи всех фаз равны.

$$I_\phi = I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = 15 / 3 \cdot 380 \cdot 0,87 = 0,15 \text{ (А)}$$

4. Определяем линейные токи. Согласно формуле (1.136) при равномерной нагрузке $I_L = \sqrt{3} I_\Phi$.

$$I_L = \sqrt{3} \cdot 0,15 = 0,26 \text{ (A)}.$$

5. Определяем полную мощность

$$S = 3 \cdot U_\Phi \cdot I_\Phi \quad (1.149)$$

$$S = 3 \cdot 380 \cdot 0,15 = 171 \text{ (ВА)}$$

6. Определяем реактивную мощность по формуле (1.128)

$$Q = 3U_\Phi \cdot I_\Phi \cdot \sin \varphi_\Phi = 3 \cdot 380 \cdot 0,15 \cdot 0,49 = 83,79 \text{ (вар)}$$

7. Определяем полное сопротивление каждой фазы

$$Z_\Phi = U_\Phi / I_\Phi \quad (1.150)$$

$$Z_\Phi = 380 / 0,15 = 2533,33 \text{ (Ом)}$$

8. Для построения векторной диаграммы выбираем масштаб $M_I = 0,05$ А /см длина векторов:

$$l_{I\Phi} = I_\Phi / M_I \quad (1.151)$$

$$l_{IAB} = l_{IBC} = l_{ICA} = I_{AB} / M_I = 0,15 / 0,05 = 3 \text{ (см)}$$

9. Строим треугольник напряжений.

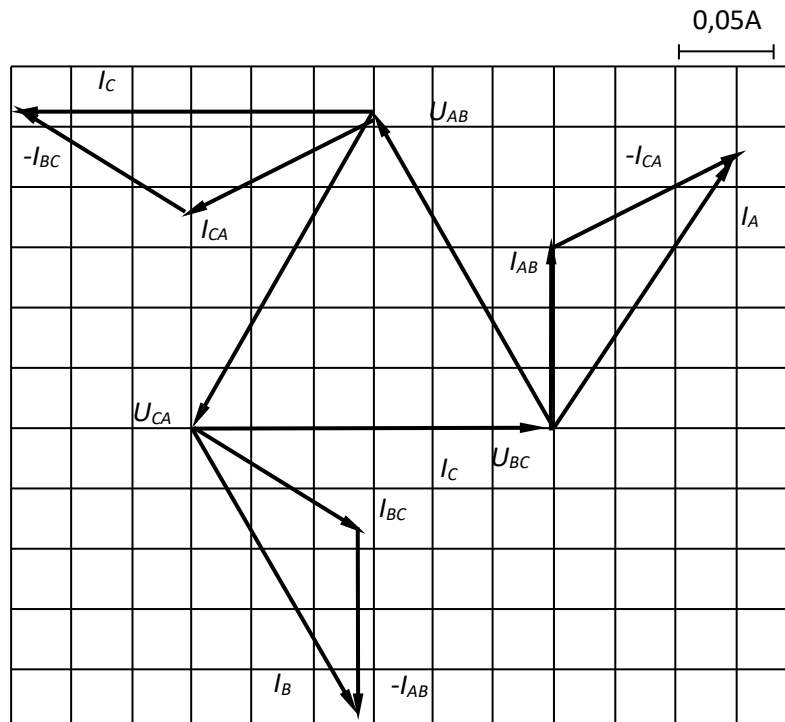


Рис. 1.42

10. Нагрузка активно-емкостная, поэтому вектора фазных токов будем

вращать по часовой стрелке относительно векторов напряжений на угол $29,5^\circ$, т. к. $\cos \varphi = 0,87$. Получилась векторная диаграмма фазных токов и напряжений.

11. Геометрически вычитаем фазные токи и получаем вектора линейных токов.

$$\vec{I}_A = \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{CA}, \quad \vec{I}_B = \vec{I}_{BC} - \vec{I}_{AB}, \quad \vec{I}_C = \vec{I}_{CA} - \vec{I}_{BC}.$$

12. Из векторной диаграммы (рис. 1.42) видно, что вектора линейных токов равны, т. е. $\vec{I}_{AB} = \vec{I}_{BC} = \vec{I}_{CA}$.

РАЗДЕЛ 2

ЭЛЕКТРОНИКА

Тема 2.1

Полупроводниковые приборы

Основные формулы и уравнения.

Полупроводниковый диод

Для изготовления полупроводниковых приборов применяются такие полупроводниковые материалы, как германий и кремний. Чаще всего используются материалы с примесной проводимостью, которая может во много раз превышать их собственную проводимость.

Полупроводниковый выпрямительный диод предназначен для преобразования переменного тока в постоянный. Он представляет собой прибор с одним p - n переходом и двумя выводами. Вывод из зоны типа p называется анодным, а вывод из зоны типа n – катодным (рис. 2.1).

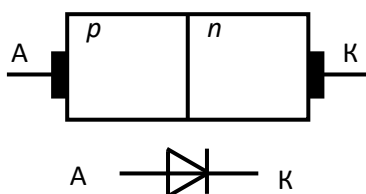


Рис. 2.1

Прямым является такое включение диода, при котором на анод подаётся плюс внешнего источника питания, а минус – на катод. При таком включении диод открыт, поэтому ток может достигать большой силы. На рис. 2.4

это ветви 1 и 2. На рис. 2.2 представлена схема прямого включения диода.

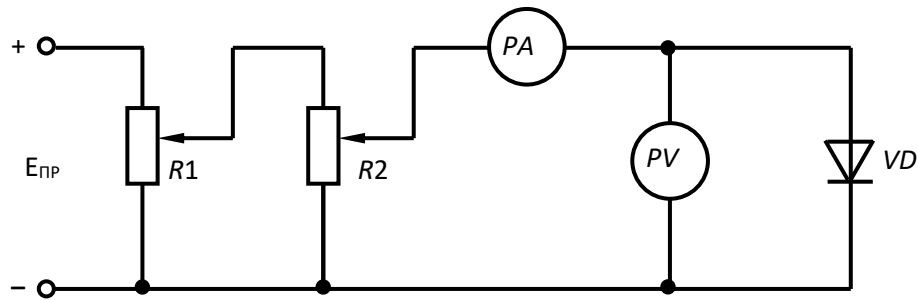


Рис. 2.2

При обратном включении – на аноде минус источника питания, а на катоде плюс. При такой полярности диод закрыт, ток практически отсутствует, то есть обратный ток очень мал, так как сопротивление во много раз возрастает.

На рис. 2.3 представлена схема обратного включения диода.

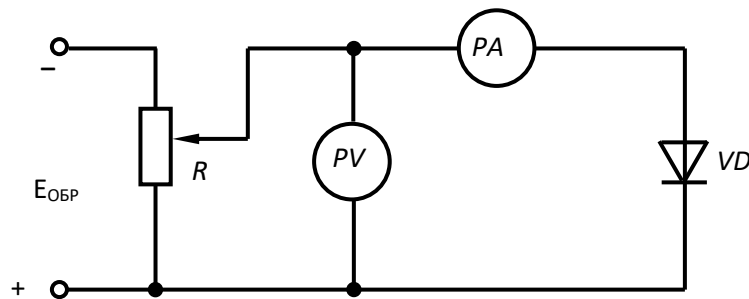


Рис. 2.3

Основной характеристикой выпрямительного диода является вольт-амперная характеристика (рис. 2.4), а на рис. 2.3 схема для снятия обратной ветви. Она представляет собой зависимость тока от приложенного внешнего напряжения.

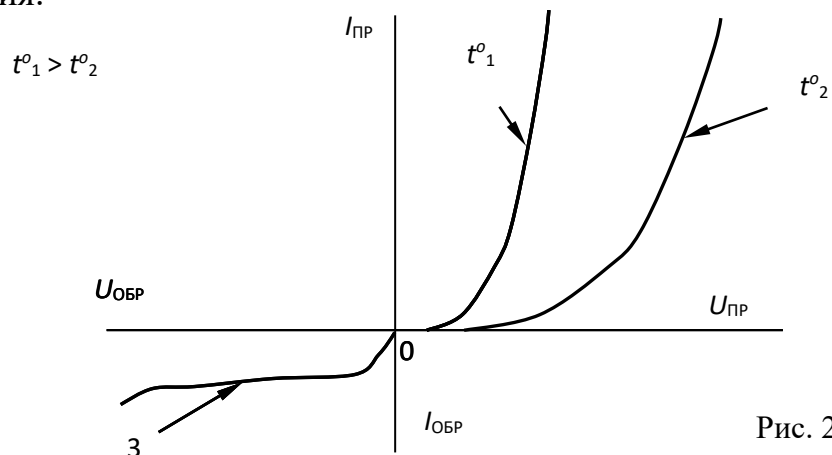


Рис. 2.4

Эта характеристика имеет две ветви: прямую, снятую при прямом

включении (кривые 1 и 2), и обратную, снятую при обратном включении (кривая 3).

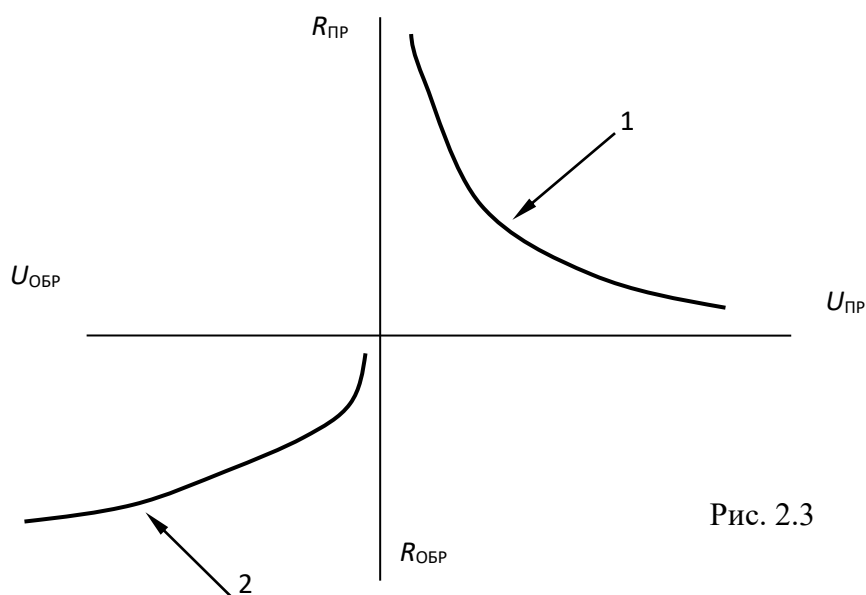
С ростом температуры сопротивление диода уменьшается, поэтому ток возрастает, что видно на рис. 2.4.

Основными параметрами диода являются сопротивление диода постоянному $R_{0ПР}$ и переменному току при прямом включении $Ri_{ПР}$, сопротивление диода постоянному $R_{0ОБР}$ и переменному $Ri_{ОБР}$ току при обратном включении и коэффициент выпрямления $K = \frac{R_{ОБР}}{R_{ПР}}$. Коэффициент выпрямления

показывает во сколько раз сопротивление диода при обратном включении больше сопротивления диода при прямом включении. Для определения коэффициента выпрямления на прямой и обратной ветвях вольт-амперной характеристики выбираются точки 1 и 2 (См. рис. 2.3). В этих точках определяются величины сопротивлений при различном включении. Затем вычисляется коэффициент.

В зависимости от способа включения диода изменяется его сопротивление. Эту зависимость можно выразить графически (рис. 2.3).

При прямом включении с ростом напряжения сопротивление диода уменьшается (кривая 1). При обратном включении с ростом напряжения сопротивление диода увеличивается (кривая 2).



Пример 2.1

По вольт-амперной характеристике диода определить коэффициент выпрямления.

Дано: вольт-амперная характеристика диода.

Определить: K

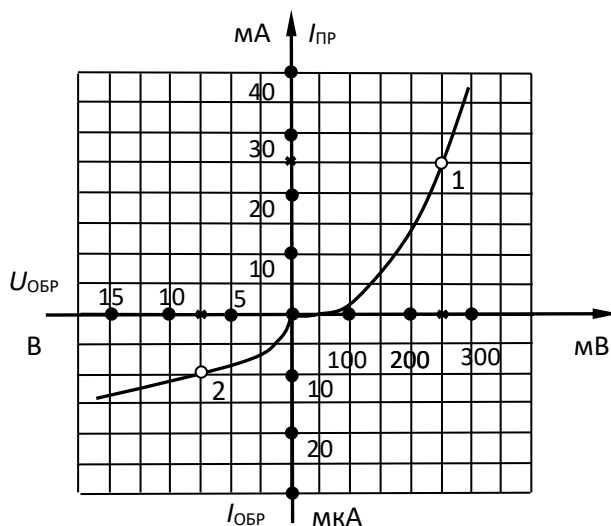


Рис. 2.5

1. Определяем в точке 1 сопротивление диода прямому току

$$R_{\text{ПР}} = U_{\text{ПР}} / I_{\text{ПР}} \quad (2.1)$$

$$R_{\text{ПР}} = 250 \text{ мВ} / 25 \text{ мА} = 10 \text{ (Ом)}$$

2. в точке 2 сопротивление диода обратному току

$$R_{\text{ОБР}} = U_{\text{ОБР}} / I_{\text{ОБР}} \quad (2.2)$$

$$R_{\text{ОБР}} = 7,5 \text{ В} / 10 \text{ мкА} = 0,75 \text{ (МОм)} = 750 \text{ (кОм)}$$

3. Определяем коэффициент выпрямления

$$K = \frac{R_{\text{ОБР}}}{R_{\text{ПР}}} \quad (2.3)$$

$$K = 750 \text{ кОм} / 10 \text{ Ом} = 750 \cdot 10^3 / 10 = 7500$$

Полупроводниковый триод (транзистор)

Полупроводниковый триод (транзистор) представляет собой прибор с двумя p-n переходами (рис. 2.6), у которого 3 вывода: ЭМИТТЕР (Э), БАЗА (Б) и КОЛЛЕКТОР (К).

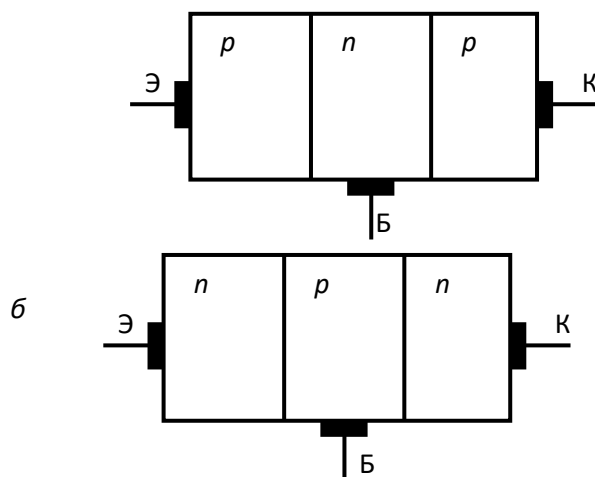


Рис. 2.6

Количество легирующих примесей во всех зонах различное. Наибольшее в зоне эмиттера, поэтому в данной зоне наибольшее количество свободных носителей зарядов. За счёт этого эмиттерный ток в транзисторе наибольший, он является основным. Для токов транзистора существует такое равенство: $I_{\text{Э}} = I_{\text{Б}} + I_{\text{К}}$.

Различают транзисторы структуры *p-n-p* (рис. 2.6 а) и *n-p-n* (рис. 2.6 б). Транзисторы обладают усилительными свойствами, поэтому они применяются в схемах усиления сигнала.

Основными характеристиками транзисторов являются входные и выходные характеристики. Входная характеристика представляет собой зависимость входного тока от входного напряжения при неизменном выходном напряжении. Выходная характеристика представляет собой зависимость выходного тока от выходного напряжения при неизменном входном напряжении или входном токе. Чаще всего характеристики снимаются при неизменном входном токе. Различают следующие схемы включения транзисторов: с общим эмиттером (ОЭ), общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК).

Наиболее часто встречается схема включения транзистора в схеме с ОЭ. Для данной схемы включения входная характеристика представляет собой зависимость входного тока $I_{\text{Б}}$ от входного напряжения при неизменном выходном напряжении $U_{\text{К}}$. Выходная характеристика представляет собой зависимость выходного тока от выходного напряжения при неизменном входном напряжении или входном токе.

На рисунке 2.7 представлены входные (рис. 2.7 а) и выходные (рис. 2.7, б) характеристики транзистора.

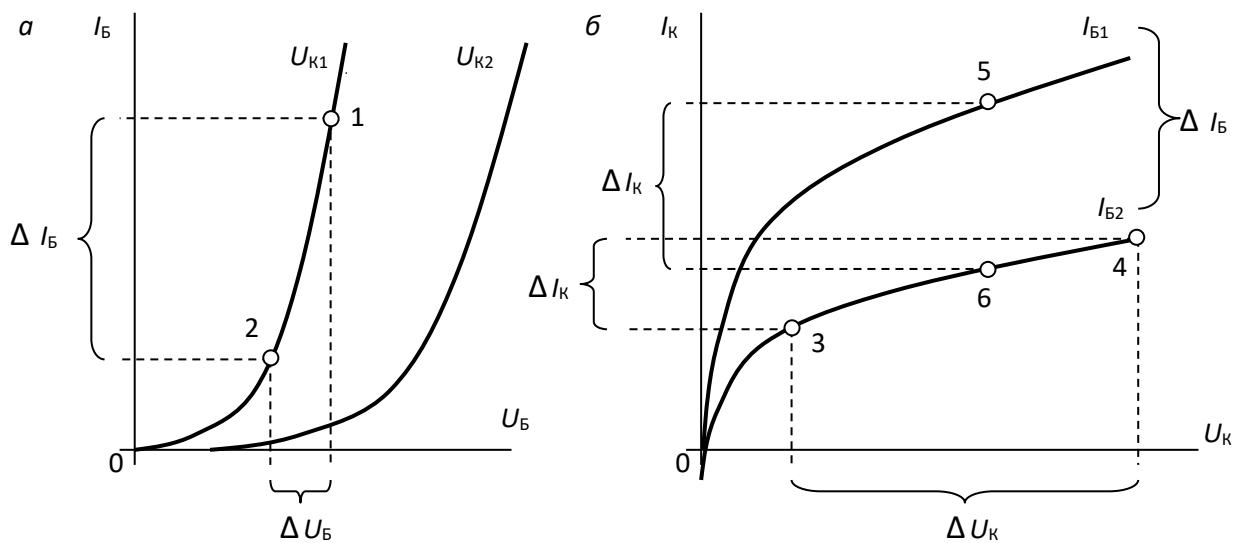


Рис. 2.7

Основными параметрами транзистора являются: входное сопротивление транзистора $R_{ВХ} = h_{11}$, выходная проводимость $g_{ВЫХ} = h_{22}$ (2.5) и коэффициент передачи тока $\beta = h_{21}$ (2.6)

Эти параметры можно определять по входным и выходным характеристикам.

Входное сопротивление транзистора h_{11} определяется по входным характеристикам. Для этого на прямолинейном участке одной из характеристик выбираются две точки (1 и 2). Затем сопротивление вычисляется по формуле:

$$h_{11} = \Delta U_B / \Delta I_B \quad (2.4)$$

Выходная проводимость h_{22} определяется по выходным характеристикам. Для этого на прямолинейном участке одной из характеристик выбираются две точки (3 и 4). Затем проводимость вычисляется по формуле:

$$h_{22} = \Delta I_K / \Delta U_K \quad (2.5)$$

Для определения коэффициента передачи тока необходимо выбрать две точки на разных выходных характеристиках (5 и 6). Эти точки должны быть выбраны при одном значении напряжения на коллекторе U_K . Координаты этих точек подставляются в формулу:

$$h_{11} = \Delta I_K / \Delta I_B \quad (2.6)$$

Схема включения транзистора для снятия входных и выходных характеристик.

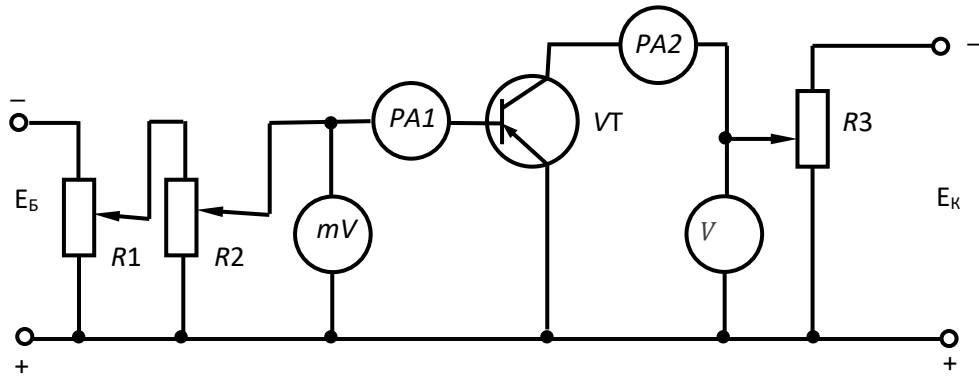


Рис. 2.8

Пример 2.2

По выходным характеристикам транзистора определить коэффициент усиления тока h_{11} .

Дано: выходные характеристики транзистора.

Определить: h_{11}

Решение:

1. Восстанавливаем перпендикуляр из любой точки на оси напряжения. И обозначаем точки его пересечения с выходными характеристиками 1 и 2.
2. Проектируем эти на ось тока и определяем приращение коллекторного тока

$$\Delta I_K = 23 - 12 = 11 \text{ (мА)}$$

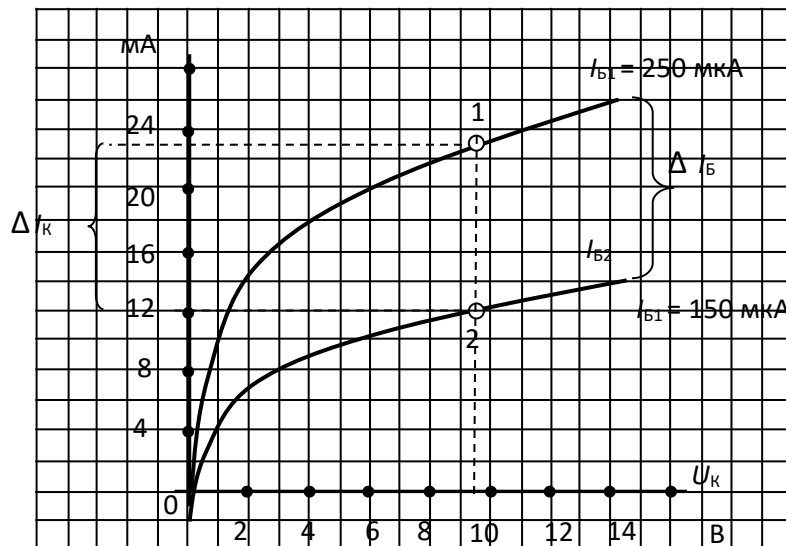


Рис. 2.9

3. Точка 1 находится на выходной характеристике, снятой при токе базы 250 мкА, а точка 2 находится на выходной характеристике, снятой при токе базы 150 мкА, поэтому приращение тока базы

$$\Delta I_B = 250 - 150 = 100 \text{ (мкА)}$$

4. Определяем коэффициент усиления тока (2.6)

$$h_{11} = \Delta I_K / \Delta U_K = 11 \text{ мА} / 100 \text{ мкА} = 11 \cdot 10^{-3} / 100 \cdot 10^{-6} = 110$$

Тема 2.4

Выпрямители переменного тока

Целый ряд потребителей требует для своей работы энергию постоянного тока. Для преобразования переменного тока в постоянный применяют выпрямители. Как правило, выпрямитель содержит: трансформатор, который предназначен для согласования входного (сетевое) и выходного (выпрямленного) напряжений выпрямителя; блок выпрямительных элементов (диодов или тиристоров), которые выполняют саму функцию выпрямления переменного тока в постоянный; сглаживающий фильтр, уменьшающий пульсацию выпрямленного тока в цепи нагрузки. В случае управляемого выпрямителя необходим ещё блок, содержащий систему управления вентилями.

По количеству фаз выпрямители делятся на однофазные и трёхфазные. По способу включения выпрямительных элементов различают схемы выпрямления с нулевой точкой и мостовые. Среди однофазных чаще используются мостовые схемы выпрямления, т.к. обратное напряжение на выпрямительном элементе в два раза меньше, чем в схеме с нулевой точкой.

Однофазная однополупериодная схема выпрямления.

Рассмотрим работу однофазной однополупериодной схемы выпрямления. На вход трансформатора подаётся переменное напряжение, т.е. во вторичной обмотке трансформатора половину периода (от 0 до π) ток протекает в условно положительном направлении (рис. 2.10).

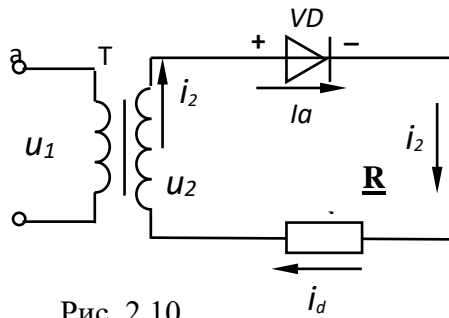


Рис. 2.10

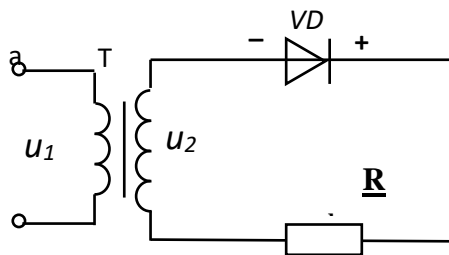


Рис. 2.11

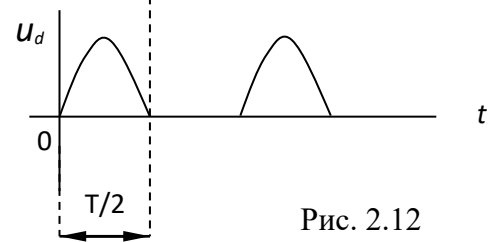
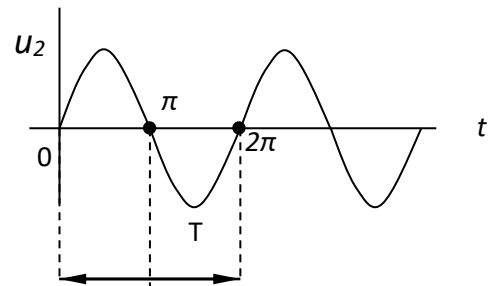


Рис. 2.12

В этот промежуток времени на аноде диода положительный потенциал, а на катоде – отрицательный. Диод открыт, через него протекает ток. Нагрузка R_d включена последовательно с диодом, поэтому в ней тот же ток

$$I_a = I_d \quad (2.7)$$

где I_a – анодный ток диода,

I_d – ток нагрузки.

Во вторую половину периода (от π до 2π) на аноде диода отрицательный потенциал, а на катоде – положительный (рис. 2.10). Диод закрыт. Ток отсутствует. В этот промежуток времени сопротивление диода большое, поэтому и падение напряжения на нём тоже большое

$$U_{обр. max} = \pi U_d \quad (2.8)$$

На рис. 2.12 представлены волновые диаграммы напряжения на вторичной обмотке трансформатора и нагрузке в течение периода.

Однофазная двухполупериодная схема выпрямления.

Рассмотрим работу однофазной двухполупериодной схемы выпрямления.

На вход трансформатора подаётся переменное напряжение, т.е. во вторичной обмотке трансформатора половину периода (от 0 до π) ток протекает в условно положительном направлении (рис. 2.13). В этот промежуток вре-

мени на аноде диода VD1 положительный потенциал, а на аноде диода VD2 – отрицательный. Диод VD1 открыт, через него протекает ток. Диод VD2 закрыт. В эту половину периода ток протекает через диод VD1 и нагрузку R_d .

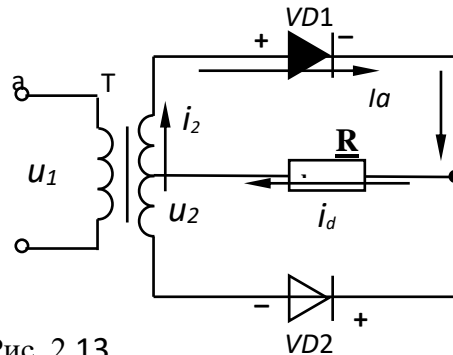


Рис. 2.13

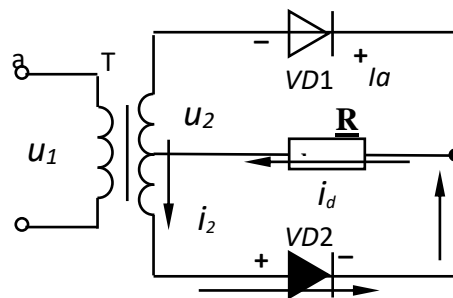


Рис. 2.14

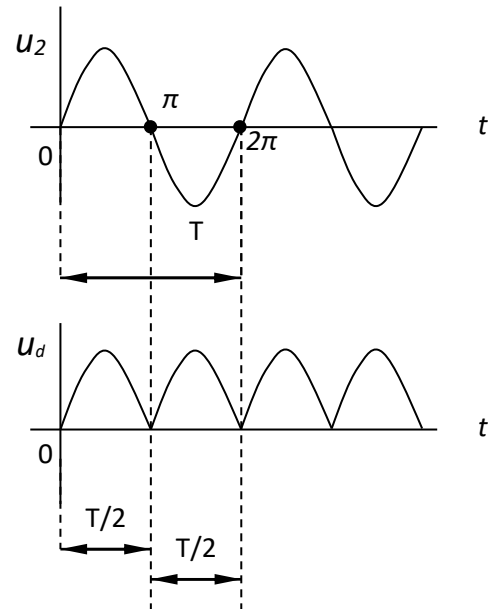


Рис. 2.15

Вторую половину периода (от π до 2π) на аноде диода VD2 положительный потенциал, а на аноде диода VD1 – отрицательный. Диод VD2 открыт, через него протекает ток (рис. 2.14). Диод VD1 закрыт. В эту половину периода ток протекает через диод VD2 и нагрузку R_d . Направление тока остаётся постоянным и не зависит от того, какой диод открыт.

Через каждый из диодов ток протекает лишь в течение половины периода, а в нагрузке – в течение всего периода, значит

$$I_a = I_d / 2 \quad (2.8)$$

где I_a – анодный ток диода,

I_d – ток нагрузки.

Каждый из диодов половину периода закрыт. В этот промежуток времени сопротивление диода большое, поэтому и падение напряжения на нём

тоже большое

$$U_{\text{обр. max}} = \pi U_d \quad (2.9)$$

На рис. 2.15 представлены волновые диаграммы напряжения на вторичной обмотке трансформатора и нагрузке в течение периода.

Однофазная двухполупериодная мостовая схема выпрямления.

Рассмотрим работу однофазной мостовой схемы выпрямления.

На вход трансформатора подаётся переменное напряжение, т.е. во вторичной обмотке трансформатора половину периода ток протекает в условно положительном направлении, а половину периода – в условно отрицательном направлении.

На рис. 2.16 представлена работа схемы в положительный полупериод, а на рис. 2.17 представлена работа схемы в отрицательный полупериод.

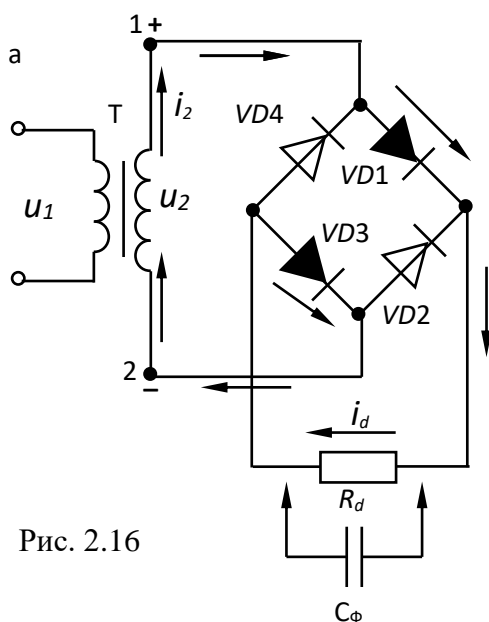


Рис. 2.16

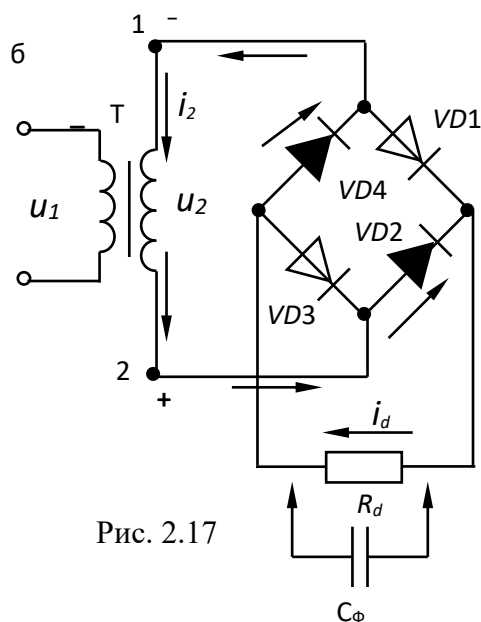


Рис. 2.17

В первый полупериод (от 0 до π) в точке 1 потенциал более высокий, чем в точке 2, поэтому открыты диоды VD1 и VD3 (потенциалы на анодах этих диодов выше, чем на катодах). Ток в этот промежуток времени протекает через вторичную обмотку трансформатора, диод VD1, нагрузку R_d и диод VD3. Во второй полупериод (от π до 2π) уже в точке 2 потенциал более высокий, чем в точке 1, поэтому открыты диоды VD2 и VD4 (потенциалы на анодах этих диодов выше, чем на катодах). Ток в этот промежуток времени

протекает через вторичную обмотку трансформатора, диод VD2, нагрузку R_d и диод VD4. Направление тока во вторичной обмотке трансформатора меняется каждые полпериода, а в нагрузке направление тока остаётся постоянным. Так же, как и в предыдущей схеме, Через каждый из диодов ток протекает лишь в течение половины периода, а в нагрузке – в течение всего периода, значит

$$I_a = I_d / 2 \quad (2.10)$$

где I_a – анодный ток диода,

I_d – ток нагрузки.

Каждый из диодов половину периода закрыт. В этот промежуток времени сопротивление диода большое, поэтому и падение напряжения на нём тоже большое. Относительно нагрузки диоды VD1 и VD3 включены последовательно. Так же диоды VD2 и VD4. поэтому в данной схеме в непроводящую часть периода (диод закрыт) напряжение на диодах в 2 раза меньше, чем в предыдущей схеме

$$U_{обр. max} = \pi U_d / 2 \quad (2.11)$$

На рис. 2.18 представлены волновые диаграммы напряжения на вторичной обмотке трансформатора и на нагрузке. Они такие же, как и для предыдущей схемы.

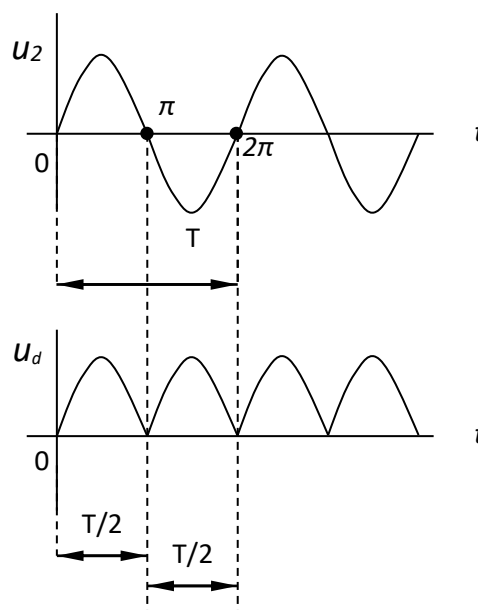


Рис. 2.18

Пример 2.3

Потребитель подключён к однополупериодному выпрямителю и потребляет ток I_d при мощности $P_d = 50$ Вт.

Подобрать полупроводниковые диоды по допустимому току $I_{\text{доп}}$ и обратному напряжению $U_{\text{ОБР. max}}$ для работы в данной схеме выпрямления. Для подбора диодов необходимо воспользоваться таблицей.

Решение.

1. Краткая запись условия задачи.

Дано: $I_d = 3$ А, $P_d = 50$ Вт

Определить: I_a , $U_{\text{ОБР. max}}$

2. Чертим схему подключения нагрузки (см. рис. 2.10).
3. Определяем напряжение на нагрузке из формулы мощности

$$P_d = I_d \cdot U_d \quad (2.12)$$

отсюда $U_d = P_d / I_d = 50 / 3 = 16,7$ (В)

4. Определяем максимальное обратное напряжение на диоде в непроводящую часть периода. Для заданной схемы определяется по формуле 2.8.

$$U_{\text{ОБР. max}} = 3,14 \cdot 16,7 = 52,44 \text{ (В)}.$$

5. В данной схеме согласно формуле 6.1 $I_a = I_d = 3$ (А).

6. По таблице выбираем диод, который должен удовлетворять следующим условиям:

$$U_{\text{ОБР. max}} < U_{\text{доп}} \quad (2.13)$$

$$52,44 \text{ В} < U_{\text{доп}}$$

$$3 \text{ А} < I_{\text{доп}} \quad (2.14)$$

В таблице несколько диодов, которые удовлетворяют данным требованиям, например: Д243А ($I_{\text{доп}} = 200$ В, $I_{\text{доп}} = 10$ А); Д232 ($U_{\text{доп}} = 400$ В, $I_{\text{доп}} = 10$ А); Д231 ($U_{\text{доп}} = 300$ В, $I_{\text{доп}} = 10$ А). Можно выбрать любой из этих диодов.

Пример 2.4

Потребитель подключён к двухполупериодному выпрямителю с нулевой точкой и потребляет ток $I_d = 0,5$ А при мощности $P_d = 50$ Вт.

Подобрать полупроводниковые диоды по допустимому току $I_{\text{доп}}$ и обратному напряжению $U_{\text{ОБР. max}}$ для работы в данной схеме выпрямления. Для подбора диодов необходимо воспользоваться таблицей.

Решение.

1. Краткая запись условия задачи.

Дано: $I_d = 0,5 \text{ А}, P_d = 50 \text{ Вт}$

Определить: $I_a, U_{\text{обр. max}}$

2. Чертим схему подключения нагрузки (см. рис. 2.13).

3. Определяем напряжение на нагрузке из формулы мощности (2.12)

$$U_d = P_d / I_d = 50 / 0,5 = 100 \text{ (В)}$$

4. Определяем максимальное обратное напряжение на диоде в непроводящую часть периода. Для заданной схемы определяется по формуле 2.9.

$$U_{\text{доп}} = 3,14 \cdot 100 = 314 \text{ (В)}.$$

5. В данной схеме согласно формуле 2.10

$$I_a = I_d / 2 = 0,5 / 2 = 0,25 \text{ (А)}.$$

6. По таблице выбираем диод, который должен удовлетворять следующим условиям:

$$U_{\text{ОБР. max}} < U_{\text{доп}} \quad (2.13)$$

$$314 \text{ В} < U_{\text{доп}}$$

$$0,25 \text{ А} < I_{\text{доп}} \quad (2.14)$$

В таблице несколько диодов, которые удовлетворяют данным требованиям, например: Д205 ($U_{\text{доп}} = 400 \text{ В}, I_{\text{доп}} = 0,4 \text{ А}$); Д214 ($U_{\text{доп}} = 600 \text{ В}, I_{\text{доп}} = 5 \text{ А}$) и другие диоды. выбрать любой из этих диодов.

Пример 2.5

Потребитель подключён к двухполупериодному выпрямителю, собранному по мостовой схеме. Потребителю подаётся выпрямленное напряжение $U_d = 250 \text{ В}$ при мощности $P_d = 60 \text{ Вт}$.

Подобрать полупроводниковые диоды по допустимому току $I_{\text{доп}}$ и обратному напряжению $U_{\text{ОБР. max}}$ для работы в данной схеме выпрямления. Для подбора диодов необходимо воспользоваться таблицей.

Решение.

1. Краткую запись условия задачи.

Дано: $U_d = 250 \text{ В}$, $P_d = 60 \text{ Вт}$

Определить: I_a , $U_{\text{доп}}$

2. Чертим схему подключения нагрузки (см. рис. 2.16).

3. Определяем ток нагрузки из формулы мощности (2.12)

$$I_d = P_d / U_d = 60 / 250 = 0,24 \text{ (А)}$$

4. Определяем максимальное обратное напряжение на диоде в непроводящую часть периода. Для заданной схемы определяется по формуле 2.11.

$$U_{\text{ОБР. max}} = 3,14 \cdot 250 / 2 = 392,5 \text{ (В)}.$$

5. В данной схеме согласно формуле 2.10

$$I_a = I_d / 2 = 0,24 / 2 = 0,12 \text{ (А)}.$$

6. По таблице выбираем диод, который должен удовлетворять следующим условиям:

$$U_{\text{ОБР. max}} < U_{\text{доп}} \quad (2.13)$$

$$392,5 \text{ В} < U_{\text{доп}}$$

$$0,12 \text{ А} < I_{\text{доп}} \quad (2.14)$$

В таблице несколько диодов, которые удовлетворяют данным требованиям, например: Д205 ($U_{\text{доп}} = 400 \text{ В}$, $I_{\text{доп}} = 0,4 \text{ А}$); Д214 ($U_{\text{доп}} = 600 \text{ В}$, $I_{\text{доп}} = 5 \text{ А}$) и другие диоды. Можно выбрать любой из этих диодов.

Ниже приведена таблица, в которой указаны допустимые значения прямого анодного тока диода и обратного напряжения на нём в непроводящую часть периода.

Таблица

Тип диода	$I_{\text{доп, А}}$	$U_{\text{доп, В}}$	Тип диода	$I_{\text{доп, А}}$	$U_{\text{доп, В}}$	Тип диода	$I_{\text{доп, А}}$	$U_{\text{доп, В}}$
Д205	0,4	400	Д221	0,4	400	Д231	10	300
Д207	0,1	200	Д234Б	5	600	Д231Б	5	300
Д209	0,1	400	Д243	5	200	Д232	10	400
Д210	0,1	00	Д243А	10	200	Д232Б	5	400
Д211	0,1	500	Д217	0,1	800	Д244	5	50
Д214	5	600	Д218	0,1	1000	Д303	3	150
Д214А	10	100	Д226	0,3	400	Д304	3	100
Д214Б	2	100	Д222	0,4	600	Д305	6	50
Д215Б	2	100	Д224	5	50	Д226А	0,3	300
Д233	10	200	Д224А	10	50	Д305	6	50
Д233Б	5	500	Д224Б	2	50	Д243Б	2	200

Учебно-методическое обеспечение

для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

№ п/п	Авторы и составители	Заглавие	Издательство	Кол-во
Основная литература				
1	Мартынова И. О.	Электротехника.	КноРус. 2017	ЭБС БООК гу:
2	Мартынова И. О.	Электротехника. Лабораторно-практические работы.	КноРус. 2017	ЭБС БООК гу:
3	Акимова Г. Н.	Электронная техника	УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 21017	ЭБС БООК гу:
Дополнительная литература				
1	Акимова Г. Н., Кочетова Н. А.	Электротехника и электроника. Методическое пособие по выполнению лабораторных занятий.	ФГБОУК «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016., - 84 стр.	12

Все права защищены. Учебное пособие или любая его часть не может быть скопирована, воспроизведена в электронной или механической форме, в виде фотокопии, записи в память ЭВМ, репродукции или каким-либо иным способом, а также использована в любой информационной системе без получения разрешения от авторов. Копирование, воспроизведение и иное использование без согласия авторов является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

Научно-методическое издание

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

Филиал в г. Нижнем Новгороде

Г.Н. Акимова
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПИСЬМЕННЫХ РАБОТ
ПО ДИСЦИПЛИНАМ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА,
ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА

Учебное пособие

Издано в авторской редакции

Компьютерная верстка:

Печатная компания "Фирстиль"

603047, Нижний Новгород, ул. Маршала Воронова, 3/8

Тел.: 8(831) 260-01-60

zakaz2@fir-stil.ru

www.fir-stil.ru

Подписано в печать: 01.03.2021 г. Формат 84x108 1/32

Печать офсетная. Усл.печ.л. 3,95.

Тираж 1000 шт.

Отпечатано с готовых файлов



ISBN 978-5-6045908-3-6



9 785604 590836