

Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»**

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ
КУРС ЛЕКЦИЙ
ДЛЯ СЛУШАТЕЛЕЙ ПЕРЕПОДГОТОВКИ**

**ВИТЕБСК
2010**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

**Курс лекций
для слушателей переподготовки
по специальности 1-27 01 71 «ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА В ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОМ
ХОЗЯЙСТВЕ»**

**Витебск
2010**

УДК 621.3(075)

ББК 31.2

Н 73

Рецензенты:

Попов Ю.В., к.т.н., доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Хлопков Ю.В., к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник государственного научного учреждения «Институт технической акустики НАН Беларуси».

Рекомендовано к изданию в качестве курса лекций редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 2 от 07.04. 2010г.

Н 73 Новиков, Ю. В. Электротехника и электрооборудование : курс лекций для слушателей переподготовки / Ю. В. Новиков ; УО «ВГТУ». – Витебск, 2010. – 108 с.

ISBN 978-985-481-213-7

Курс лекций предназначен для слушателей переподготовки, а также широкого круга лиц, для которых электротехника и электрооборудование необходимы в учебных целях и профессиональной деятельности.

УДК 621.3(075)

ББК 31.2

ISBN 978-985-481-213-7

©Новиков Ю.В., 2010

©УО «ВГТУ», 2010

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Выписка из рабочей программы курса	5
1.1 Вопросы, вынесенные на самостоятельную проработку	5
1.2 Темы практических занятий	5
Теоретические вопросы курса.....	6
2 Измерение тока, напряжения, сопротивления	6
3 Электрические цепи постоянного тока и методы их рас- чета	9
4 Расчет электрических цепей с использованием законов Ома и Кирхгофа.....	30
5 Однофазный переменный ток.....	38
5.1 Получение переменного тока.....	38
5.2 Явление резонанса	41
6 Трехфазный переменный ток.....	49
6.1 Принцип построения трехфазной системы, соединение звездой	49
6.2 Соединение треугольником.....	53
7 Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.....	56
8 Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением	62
9 Электротехническое оборудование	70
9.1 Условные обозначения.....	70
9.2 Устройство счетчика индукционной системы	73
9.3 Электронные счетчики электроэнергии	76
9.4 Оборудование идентификации коммуникаций	81
9.5 Оборудование включения и защиты.....	84
9.6 Светильники.....	95
9.7 Разъемы, зажимы, крепежные изделия.....	99
9.8 Люминесцентные лампы	105
Литература.....	107

ВВЕДЕНИЕ

Цель курса лекций – сформировать у студентов знания об электромагнитных процессах в электрических цепях, методах их расчета; о физических основах работы полупроводниковых приборов, трансформаторов, электрических машин.

В результате изучения дисциплины студент должен знать:

- физические процессы, происходящие в электрических цепях постоянного и переменного синусоидального токов;
- физические основы работы трансформаторов и двигателей, их характеристики и параметры;
- схемы наиболее распространенных систем электропривода.

Студент должен уметь:

- рассчитывать электрические цепи постоянного и переменного токов;
- работать с измерительными приборами;
- определять экспериментальные параметры и снимать характеристики различных электрических цепей и машин;
- анализировать полученные результаты;
- произвести сравнительную характеристику основных видов электроприводов.

1 Выписка из рабочей программы курса

1.1 Вопросы, вынесенные на самостоятельную проработку

Таблица 1.1 – Рекомендации по изучению вопросов, вынесенных на самостоятельную работу

№№ п/п	Вопросы, вынесенные на самостоятельную проработку	Рекомендуемая литература	Объем в час.
1	Понятие о цепях с нелинейными элементами. Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов. Методы расчета нелинейных цепей	[1], [2]	2
2	Электрические измерения. Амперметры, омметры, вольтметры, ваттметры	[1], [2]	2
3	Методы измерения сопротивлений, токов, напряжений и мощностей	[1], [2]	2
4	Переходные процессы в цепях, законы коммутации	[1], [2]	2
5	Переходные процессы в простейших цепях при подключении к источнику постоянного тока	[1], [2]	2
6	Схемы управления пуском двигателя постоянного тока. Выбор мощности двигателей в приводах	[4], [5]	2
ИТОГО			12

1.2 Темы практических занятий

Таблица 1.2 – Практические занятия, их содержание и объем в часах

№№ тем	Наименование тем	Содержание	Объем в час.
1	Расчет простых цепей постоянного тока	Приобретение навыков расчета простых цепей	4
2	Расчет цепей синусоидального тока при последовательном соединении. Расчет цепей синусоидального тока при параллельном соединении	Закрепление знаний об основных соотношениях между величинами при последовательном соединении элементов	2
3	Расчет трехфазных цепей	Анализ трехфазных цепей при соединении звездой и треугольником	2
ИТОГО			8

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ КУРСА

2 Измерение тока, напряжения, сопротивления

Измерение тока

Для измерения тока в цепи служат амперметры, включаемые последовательно в цепь, где производится определение величины тока [8]. Чтобы ток в цепи при включении амперметра не изменился, необходимо сопротивление его обмотки делать очень малым. Для этого обмотку амперметра делают из небольшого числа витков толстой проволоки. Чтобы расширить пределы измерения амперметра, применяют шунты. Шунты представляют собой манганиновые пластины или стержни, впаянные в медные или латунные наконечники. Шунт включается в цепь последовательно. Параллельно ему включается амперметр. Ток I в цепи А разветвляется обратно пропорционально сопротивлениям обмотки амперметра r_a и шунта $r_{ш}$:

$$I_a / I_{ш} = r_{ш} / r_a,$$

причем $I_{ш} = I - I_a$,

откуда сопротивление шунта

$$r_{ш} = (I_a r_a) / (I - I_a).$$

Обозначим отношение тока I к току I_a через n (число n иногда называют коэффициентом шунтирования). Тогда выражение для $r_{ш}$ можно записать так:

$$r_{ш} = r_a / (n - 1).$$

На токи до 100 А шунты помещают внутри прибора (внутренние шунты). На большие токи шунты делают наружными и присоединяются к амперметрам при помощи проводов, сопротивление которых точно выверено, так как иначе распределение токов будет другим и измерение неправильным. Встречаются универсальные шунты на несколько пределов измерений. Приборы, которые постоянно работают со своим индивидуальным шунтом, градуируются с учетом шунта, о чем делается надпись на шкале прибора. Часто применяются также калиброванные шунты. Такой шунт можно включать с любым прибором, рассчитанным на ту же величину падения напряжения, что и данный шунт. Обычно шунты ставятся только к приборам магнитоэлектрической системы для измерений в цепях постоянного тока.

Для расширения пределов измерения амперметров в цепях переменного тока применяются трансформаторы тока.

Измерение напряжения

Для измерения напряжения употребляются вольтметры. Вольтметры включаются параллельно тому участку цепи, где необходимо измерить напряжение. Чтобы прибор не потреблял большой ток и не влиял на величину напряжения цепи, обмотка его должна иметь большое сопротивление. Чем больше внутреннее сопротивление вольтметра, тем точнее он будет измерять величину напряжения [8]. Для этого обмотка вольтметра изготавливается из большого числа витков тонкой проволоки.

Для расширения пределов измерения вольтметров употребляются добавочные сопротивления, включаемые последовательно с вольтметрами. В этом случае напряжение сети распределяется между вольтметром и добавочным сопротивлением. Величину добавочного сопротивления необходимо подбирать с таким расчетом, чтобы в цепи с повышенным напряжением по обмотке вольтметра проходил тот же ток, что и при номинальном напряжении. Ток, на который рассчитана обмотка прибора:

$$I_g = U / r_g.$$

В цепи с напряжением в n раз большим ток вольтметра с добавочным сопротивлением r должен остаться прежним:

$$I_g = nU / (r_g + r) \text{ или } U / r_g = nU / (r_g + r),$$

отсюда величина добавочного сопротивления равна $r = r_g(n - 1)$.

Добавочные сопротивления изготавливают из манганиновой проволоки, намотанной на гетинаксовый или фарфоровый каркас, и помещают внутри прибора или отдельно от него. Для измерения высоких напряжений переменного тока употребляются измерительные трансформаторы напряжения.

Измерение коэффициента мощности

Значение коэффициента мощности в сетях однофазного переменного тока можно определить по показаниям вольтметра, амперметра и ваттметра [8] согласно формуле

$$\cos \varphi = P / UI.$$

Теми же приборами коэффициент мощности в сетях трехфазного тока с равномерной нагрузкой можно определить по формуле

$$\cos \varphi = P / UI \sqrt{3},$$

где U и I – линейные напряжения и ток, а φ – угол сдвига между фазными напряжением и током.

Среднее значение коэффициента мощности $\cos \varphi_{cp}$ за определенный промежуток времени можно определить по показаниям счетчиков активной и реактивной энергии за то же время согласно формуле

$$\cos \varphi_{cp} = A_a / \sqrt{A_a^2 + A_p^2},$$

где A_a - активная энергия; A_p - реактивная энергия.

Мгновенное значение коэффициента мощности на практике определяют при помощи специальных приборов – фазометров.

Измерение сопротивления мегомметром

Мегомметры служат для измерения сопротивления отдельных частей электротехнических установок по отношению к заземлению и друг относительно друга [6].

Согласно правилам, сопротивление изоляции проводов должно быть не менее чем 1000 Ом на каждый вольт рабочего напряжения. Так, например, для сети с рабочим напряжением 220 В сопротивление изоляции должно быть не менее 220 000 Ом, или 0,22 МОм.

Измерение сопротивления изоляции должно производиться напряжением, по возможности равным рабочему, и не меньшим 100 В.

Мегомметры, показания которых зависят от напряжения, состоят из источника напряжения и измерителя. Если последовательно в цепь включить регулируемое сопротивление r , то показания измерителя (вольтметра) будут зависеть от величины этого сопротивления (при постоянном напряжении цепи). При $r = 0$ показание вольтметра будет небольшим, при $r = \infty$ вольтметр покажет ноль. Включая различные сопротивления, можно отградуировать шкалу измерителя непосредственно в омах (килоомах, мегаомах). В дальнейшем таким прибором можно воспользоваться для измерения сопротивлений, если применить источник энергии с напряжением, равным напряжению при градуировке.

3 Электрические цепи постоянного тока и методы их расчета

Электрическая цепь и ее элементы

В электротехнике рассматривается устройство и принцип действия основных электротехнических устройств, используемых в быту и промышленности. Чтобы электротехническое устройство работало, должна быть создана электрическая цепь, задача которой – передать электрическую энергию этому устройству и обеспечить ему требуемый режим работы [9].

Электрической цепью называется совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об электрическом токе, ЭДС (электродвижущая сила) и электрическом напряжении.

Для анализа и расчета электрическая цепь графически представляется в виде электрической схемы, содержащей условные обозначения ее элементов и способы их соединения. Электрическая схема простейшей электрической цепи, обеспечивающей работу осветительной аппаратуры, представлена на рис. 3.1.

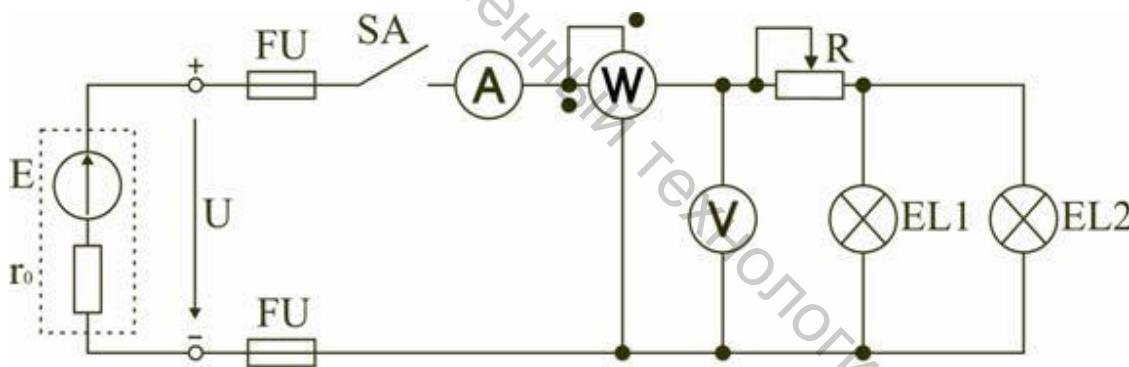


Рисунок 3.1 – Простейшая электрическая цепь

Все устройства и объекты, входящие в состав электрической цепи, могут быть разделены на три группы:

1. Источники электрической энергии (питания).

Общим свойством всех источников питания является преобразование какого-либо вида энергии в электрическую. Источники, в которых происходит преобразование неэлектрической энергии в электрическую, называются первичными источниками. Вторичные источники – это такие источники, у которых и на входе, и на выходе – электрическая энергия (например, выпрямительные устройства).

2. Потребители электрической энергии.

Общим свойством всех потребителей является преобразование электроэнергии в другие виды энергии (например, нагревательный прибор). Иногда потребители называют нагрузкой.

3. Вспомогательные элементы цепи: соединительные провода, коммутационная аппаратура, аппаратура защиты, измерительные приборы и т.д., без которых реальная цепь не работает.

Все элементы цепи охвачены одним электромагнитным процессом.

В электрической схеме на рис. 3.1 электрическая энергия от источника ЭДС E , обладающего внутренним сопротивлением r_0 , с помощью вспомогательных элементов цепи передаются через регулировочный реостат R к потребителям (нагрузке): электрическим лампочкам EL_1 и EL_2 .

Основные понятия и определения для электрической цепи

Для расчета и анализа реальная электрическая цепь представляется графически в виде расчетной электрической схемы (схемы замещения). В этой схеме реальные элементы цепи изображаются условными обозначениями, причем вспомогательные элементы цепи обычно не изображаются, а если сопротивление соединительных проводов намного меньше сопротивления других элементов цепи, его не учитывают. Источник питания показывается как источник ЭДС E с внутренним сопротивлением r_0 , реальные потребители электрической энергии постоянного тока заменяются их электрическими параметрами: активными сопротивлениями $R_1, R_2, \dots, R_n$. С помощью сопротивления R учитывают способность реального элемента цепи необратимо преобразовывать электроэнергию в другие виды, например, тепловую или лучистую [6].

При этих условиях схема на рис.3.1 может быть представлена в виде расчетной электрической схемы (рис.3.2), в которой есть источник питания с ЭДС E и внутренним сопротивлением r_0 , а потребители электрической энергии: регулировочный реостат R , электрические лампочки EL_1 и EL_2 – заменены активными сопротивлениями R, R_1 и R_2 .

Источник ЭДС на электрической схеме (рис.3.2) может быть заменен источником напряжения U , причем условное положительное направление напряжения U источника задается противоположным направлением ЭДС.

При расчете в схеме электрической цепи выделяют несколько основных элементов [9].

Ветвь электрической цепи (схемы) – участок цепи с одним и тем же током. Ветвь может состоять из одного или нескольких последовательно соединенных элементов. Схема на рис.3.2 имеет три ветви: ветвь bma , в которую включены элементы r_0, E, R и в которой возникает ток I ; ветвь ab с элементом R_1 и током I_1 ; ветвь anb с элементом R_2 и током I_2 .

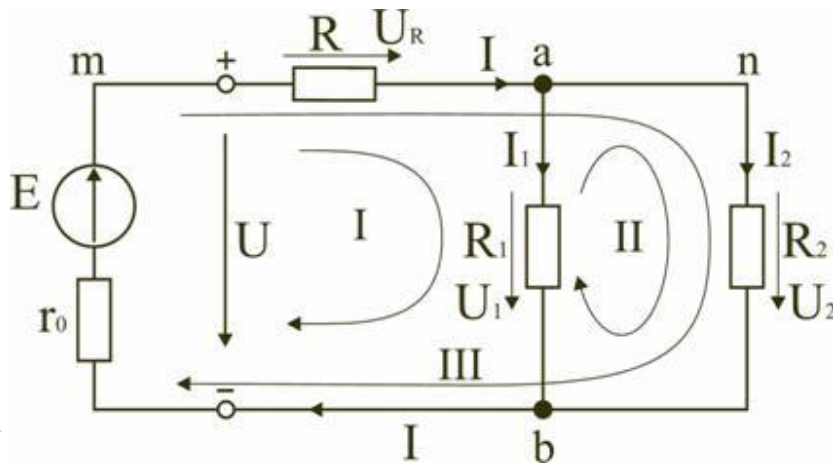


Рисунок 3.2 – Расчетная электрическая схема

Узел электрической цепи (схемы) – место соединения трех и более ветвей. В схеме на рис. 3.2 – два узла а и b. Ветви, присоединенные к одной паре узлов, называют параллельными. Сопротивления R_1 и R_2 (рис. 3.2) находятся в параллельных ветвях.

Контур – любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям. В схеме на рис. 3.2 можно выделить три контура: I – bmab; II – anba; III – manbm, на схеме стрелкой показывают направление обхода контура.

Условные положительные направления ЭДС источников питания, токов во всех ветвях, напряжений между узлами и на зажимах элементов цепи необходимо задать для правильной записи уравнений, описывающих процессы в электрической цепи или ее элементах. На схеме (рис. 3.2) стрелками укажем положительные направления ЭДС, напряжений и токов:

а) для ЭДС источников – произвольно, но при этом следует учитывать, что полюс (зажим источника), к которому направлена стрелка, имеет более высокий потенциал по отношению к другому полюсу;

б) для токов в ветвях, содержащих источники ЭДС, совпадающими с направлением ЭДС; во всех других ветвях произвольно;

в) для напряжений – совпадающими с направлением тока в ветви или элемента цепи.

Все электрические цепи делятся на линейные и нелинейные.

Элемент электрической цепи, параметры которого (сопротивление и др.) не зависят от тока в нем, называют линейным, например, электропечь.

Нелинейный элемент, например, лампа накаливания, имеет сопротивление, величина которого увеличивается при повышении напряжения, а следовательно, и тока, подводимого к лампочке.

Следовательно, в линейной электрической цепи все элементы – линейные, а нелинейной называют электрическую цепь, содержащую хотя бы один нелинейный элемент.

Основные законы цепей постоянного тока

Расчет и анализ электрических цепей производится с использованием закона Ома, первого и второго законов Кирхгофа. На основе этих законов устанавливается взаимосвязь между значениями токов, напряжений, ЭДС всей электрической цепи и отдельных ее участков и параметрами элементов, входящих в состав этой цепи [5,6].

Закон Ома для участка цепи

Соотношение между током I , напряжением U_R и сопротивлением R участка ab электрической цепи (рис. 3.3) выражается законом Ома:

$$I = U_R / R, \quad (3.1)$$

или $U_R = RI$.

В этом случае $U_R = RI$ называют напряжением или падением напряжения на резисторе R , а I – током в резисторе R .

При расчете электрических цепей иногда удобнее пользоваться не сопротивлением R , а величиной, обратной сопротивлению, т.е. электрической проводимостью:

$$q = 1 / R = I / U.$$

В этом случае закон Ома для участка цепи запишется в виде:

$$I = Uq.$$

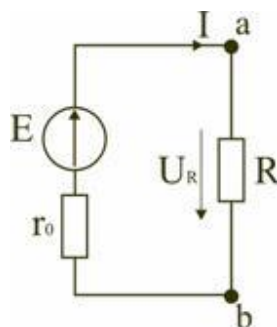


Рисунок 3.3 – Участок электрической цепи

Закон Ома для всей цепи

Этот закон определяет зависимость между ЭДС E источника питания с внутренним сопротивлением r_0 (рис. 3.3), током I электрической цепи и общим эквивалентным сопротивлением $R_{\Sigma} = r_0 + R$ всей цепи:

$$I = E / R_{\Sigma} = E / (r_0 + R). \quad (3.2)$$

Сложная электрическая цепь содержит, как правило, несколько ветвей, в которые могут быть включены свои источники питания, и режим ее работы не может быть описан только законом Ома. Но это можно выполнить на основании первого и второго законов Кирхгофа, являющихся следствием закона сохранения энергии.

Первый закон Кирхгофа

В любом узле электрической цепи алгебраическая сумма токов равна нулю:

$$\sum_{k=1}^m I_k = 0, \quad (3.3)$$

где m – число ветвей, подключенных к узлу.

При записи уравнений по первому закону Кирхгофа токи, направленные к узлу, берут со знаком «плюс», а токи, направленные от узла – со знаком «минус». Например, для узла а (см. рис. 3.2) $I - I_1 - I_2 = 0$.

Второй закон Кирхгофа

В любом замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжений на всех его участках

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m R_k \cdot I_k = \sum_{k=1}^m U_k, \quad (3.4)$$

где n – число источников ЭДС в контуре; m – число элементов с сопротивлением R_k в контуре; $U_k = R_k I_k$ – напряжение или падение напряжения на k -м элементе контура.

Для схемы (рис. 3.2) запишем уравнение по второму закону Кирхгофа:

$$E = U_R + U_1.$$

Если в электрической цепи включены источники напряжений, то второй закон Кирхгофа формулируется в следующем виде: алгебраическая сумма напряжений на всех элементах контура, включая источники ЭДС, равна нулю:

$$\sum_{k=1}^m U_k = 0. \quad (3.5)$$

При записи уравнений по второму закону Кирхгофа необходимо:

- 1) задать условные положительные направления ЭДС, токов и напряжений;
- 2) выбрать направление обхода контура, для которого записывается уравнение;
- 3) записать уравнение, пользуясь одной из формулировок второго закона Кирхгофа, причем слагаемые, входящие в уравнение, берут со знаком «плюс», если их условные положительные направления совпадают с обходом контура, и со знаком «минус», если они противоположны.

Запишем уравнения по II закону Кирхгофа для контуров электрической схемы (рис. 3.2):

$$\text{контур I: } E = RI + R_1 I_1 + r_0 I,$$

$$\text{контур II: } R_1 I_1 + R_2 I_2 = 0,$$

$$\text{контур III: } E = RI + R_2 I_2 + r_0 I.$$

В действующей цепи электрическая энергия источника питания преобразуется в другие виды энергии. На участке цепи с сопротивлением R в течение времени t при токе I расходуется электрическая энергия

$$W = I^2 R t. \quad (3.6)$$

Скорость преобразования электрической энергии в другие виды представляет электрическую мощность

$$P = W / t = I^2 R = UI. \quad (3.7)$$

Из закона сохранения энергии следует, что мощность источников питания в любой момент времени равна сумме мощностей, расходуемой на всех участках цепи:

$$\sum E \cdot I = \sum I^2 \cdot R. \quad (3.8)$$

Это соотношение (3.8) называют уравнением баланса мощностей. При составлении уравнения баланса мощностей следует учесть, что если действительные направления ЭДС и тока источника совпадают, то источник ЭДС работает в режиме источника питания, и произведение $E I$ подставляют в (3.8) со знаком плюс. Если не совпадают, то источник ЭДС работает в режиме потребителя электрической энергии, и произведение $E I$ подставляют в (3.8) со знаком минус. Для цепи, показанной на рис. 3.2 уравнение баланса мощностей запишется в виде:

$$EI = I^2(r_0 + R) + I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2.$$

При расчете электрических цепей используются определенные единицы измерения. Электрический ток измеряется в амперах (А), напряжение – в вольтах (В), сопротивление – в омах (Ом), мощность – в ваттах (Вт), электрическая энергия – в ватт-час (Вт-час), проводимость – в сименсах (См).

Кроме основных единиц, используют более мелкие и более крупные единицы измерения: миллиампер ($1\text{мА} = 10^{-3}\text{А}$), килоампер ($1\text{кА} = 10^3\text{А}$), милливольт ($1\text{мВ} = 10^{-3}\text{В}$), киловольт ($1\text{кВ} = 10^3\text{В}$), килоом ($1\text{кОм} = 10^3\text{Ом}$), мегаом ($1\text{МОм} = 10^6\text{Ом}$), киловатт ($1\text{кВт} = 10^3\text{Вт}$), киловатт-час ($1\text{кВт-час} = 10^3\text{ватт-час}$).

Способы соединения сопротивлений и расчет эквивалентного сопротивления электрической цепи

Сопротивления в электрических цепях могут быть соединены последовательно, параллельно, по смешанной схеме и по схемам «звезда», «треугольник». Расчет сложной схемы упрощается, если сопротивления в этой схеме заменяются одним эквивалентным сопротивлением $R_{\text{экв}}$, и вся схема представляется в виде схемы на рис. 3.4, где $R = R_{\text{экв}}$, а расчет токов и напряжений производится с помощью законов Ома и Кирхгофа [5,6].

Электрическая цепь с последовательным соединением элементов представлена на рисунке 3.4.

Последовательным называют такое соединение элементов цепи, при котором во всех включенных в цепь элементах возникает один и тот же ток I (рис. 3.4).

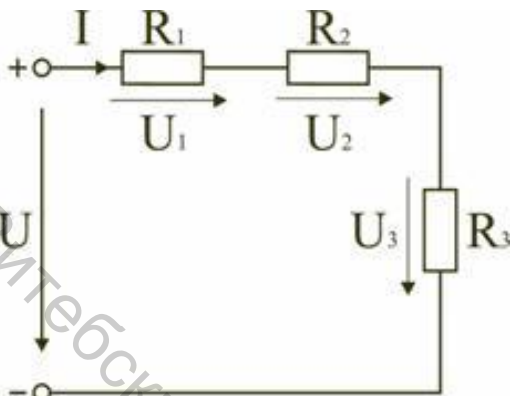


Рисунок 3.4 – Последовательное соединение элементов

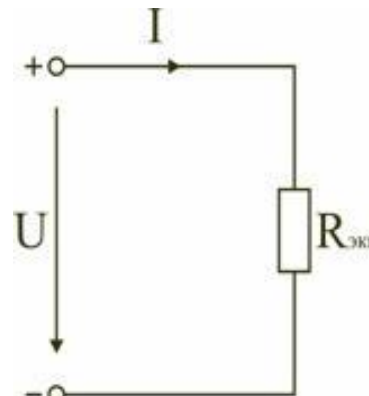


Рисунок 3.5 – Эквивалентная схема

На основании второго закона Кирхгофа (3.5) общее напряжение U всей цепи равно сумме напряжений на отдельных участках:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \text{ или } IR_{\text{экв}} = IR_1 + IR_2 + IR_3,$$

откуда следует

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_2 + R_3. \quad (3.9)$$

Таким образом, при последовательном соединении элементов цепи общее эквивалентное сопротивление цепи равно арифметической сумме сопротивлений отдельных участков. Следовательно, цепь с любым числом последовательно включенных сопротивлений можно заменить простой цепью с одним эквивалентным сопротивлением $R_{\text{экв}}$ (рис. 3.5). После этого расчет цепи сводится к определению тока I всей цепи по закону Ома:

$$I = \frac{U}{R_{\text{экв}}},$$

и по вышеприведенным формулам рассчитывают падение напряжений U_1 , U_2 , U_3 на соответствующих участках электрической цепи (рис. 3.4).

Недостаток последовательного включения элементов заключается в том, что при выходе из строя хотя бы одного элемента прекращается работа всех остальных элементов цепи.

Электрическая цепь с параллельным соединением элементов

Параллельным называют такое соединение, при котором все включенные в цепь потребители электрической энергии находятся под одним и тем же напряжением (рис. 3.6).

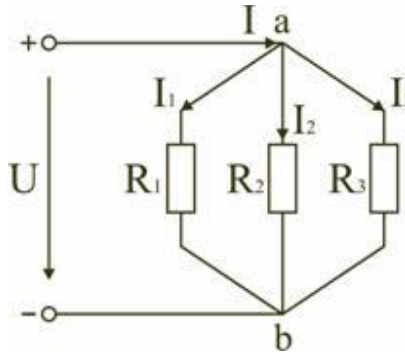


Рисунок 3.6 – Параллельное соединение элементов

В этом случае они присоединены к двум узлам цепи а и б, и на основании первого закона Кирхгофа (3.3) можно записать, что общий ток I всей цепи равен алгебраической сумме токов отдельных ветвей:

$$I = I_1 + I_2 + I_3, \text{ т.е.}$$

$$\frac{U}{R_{\text{ЭКВ}}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3},$$

откуда следует, что

$$\frac{1}{R_{\text{ЭКВ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}. \quad (3.10)$$

В том случае, когда параллельно включены два сопротивления R_1 и R_2 , они заменяются одним эквивалентным сопротивлением

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}. \quad (3.11)$$

Из соотношения (3.10) следует, что эквивалентная проводимость цепи равна арифметической сумме проводимостей отдельных ветвей:

$$g_{\text{экв}} = g_1 + g_2 + g_3.$$

По мере роста числа параллельно включенных потребителей проводимость цепи $g_{\text{экв}}$ возрастает, и наоборот, общее сопротивление $R_{\text{экв}}$ уменьшается.

Напряжения в электрической цепи с параллельно соединенными сопротивлениями (рис. 3.6)

$$U = IR_{\text{экв}} = I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3.$$

Отсюда следует, что

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1},$$

т.е. ток в цепи распределяется между параллельными ветвями обратно пропорционально их сопротивлениям.

По параллельно включенной схеме работают в номинальном режиме потребители любой мощности, рассчитанные на одно и то же напряжение. Причем включение или отключение одного или нескольких потребителей не отражается на работе остальных. Поэтому эта схема является основной схемой подключения потребителей к источнику электрической энергии.

Электрическая цепь со смешанным соединением элементов

Смешанным называется такое соединение, при котором в цепи имеются группы параллельно и последовательно включенных сопротивлений [5,6].

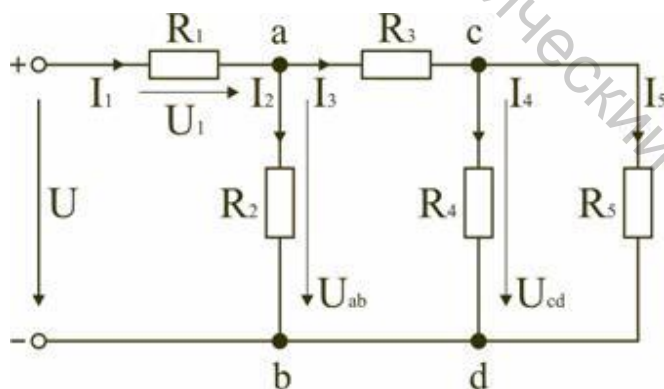


Рисунок 3.7 – Схема электрической цепи

Для цепи, представленной на рис. 3.7, расчет эквивалентного сопротивления начинается с элементов схемы наиболее удаленных от источника тока. Для упрощения расчетов примем, что все сопротивления в этой схеме являются одинако-

выми: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R$. Сопротивления R_4 и R_5 включены параллельно, тогда сопротивление участка цепи cd равно:

$$R_{cd} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5} = \frac{R \cdot R}{R + R} = \frac{R}{2}.$$

В этом случае исходную схему (рис. 3.7) можно представить в следующем виде (рис. 3.8):

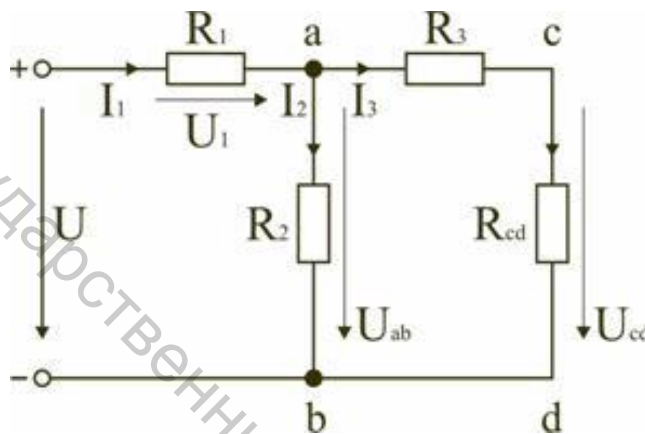


Рисунок 3.8 – Эквивалентная схема

На схеме (рис. 3.8) сопротивления R_3 и R_{cd} соединены последовательно, и тогда сопротивление участка цепи ad равно:

$$R_{ad} = R_3 + R_{cd} = R + \frac{R}{2} = \frac{3}{2}R.$$

Схему (рис. 3.8) можно представить в сокращенном варианте (рис. 3.9).

На схеме (рис. 3.9) сопротивления R_2 и R_{ad} соединены параллельно, тогда сопротивление участка цепи ab равно:

$$R_{ab} = \frac{R_2 \cdot R_{ad}}{R_2 + R_{ad}} = \frac{R \cdot \frac{3}{2}R}{R + \frac{3}{2}R} = \frac{3}{5}R.$$

Схему (рис. 3.9) можно представить в упрощенном варианте (рис. 3.10), где сопротивления R_1 и R_{ab} включены последовательно.

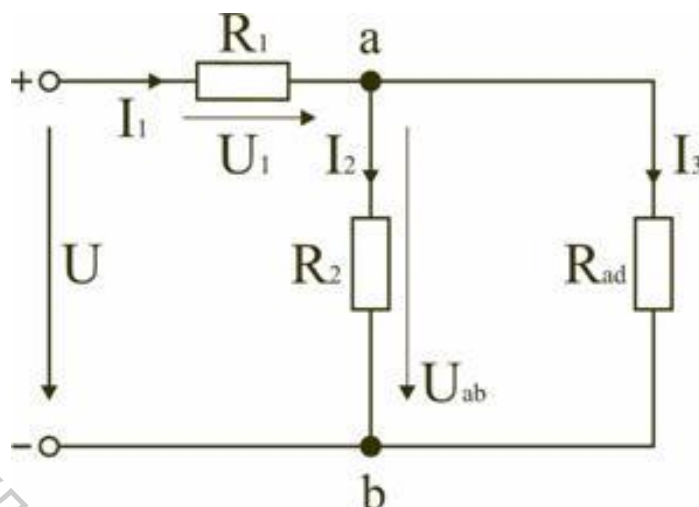


Рисунок 3.9 – Упрощенная схема

Тогда эквивалентное сопротивление исходной схемы (рис. 3.7) будет равно:

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_{ab} = R + \frac{3}{5}R = \frac{8}{5}R.$$

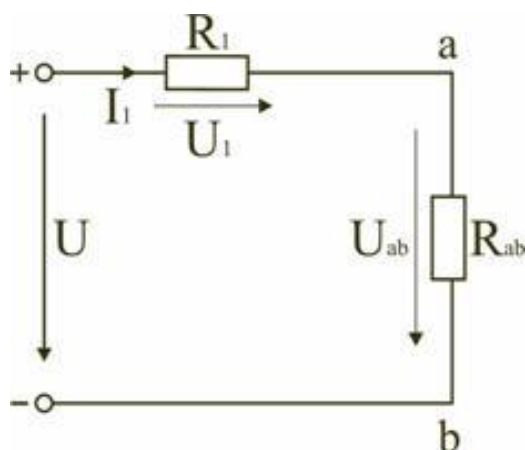


Рисунок 3.10 – Эквивалентная схема

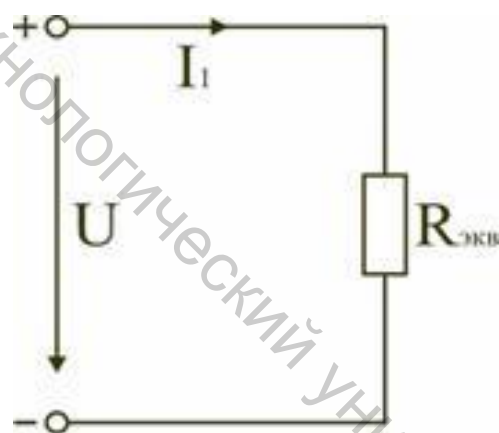


Рисунок 3.11 – Эквивалентная схема

В результате преобразований исходная схема (рис. 3.7) представлена в виде схемы (рис. 3.11) с одним сопротивлением $R_{\text{экв}}$. Расчет токов и напряжений для всех элементов схемы можно произвести по законам Ома и Кирхгофа.

Соединение элементов электрической цепи по схемам «звезда» и «треугольник»

В электротехнических и электронных устройствах элементы цепи соединяются по мостовой схеме (рис. 3.12). Сопротивления R_{12} , R_{13} , R_{24} , R_{34} включены в плечи моста, в диагональ 1–4 включен источник питания с ЭДС E , другая диагональ 3–2 называется измерительной диагональю моста [9].

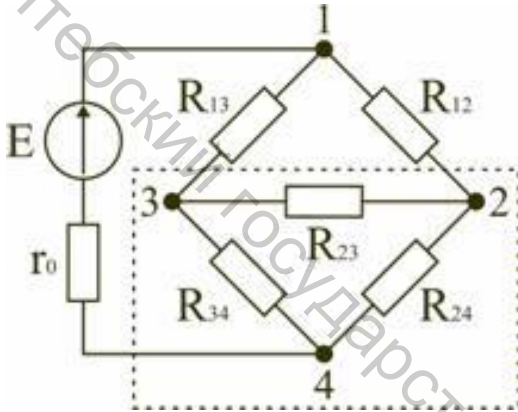


Рисунок 3.12 – Мостовая схема

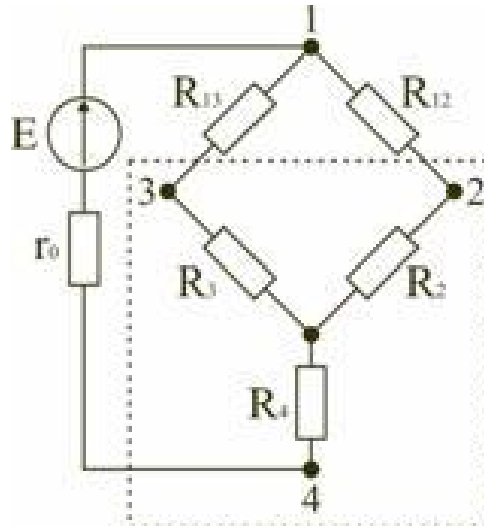


Рисунок 3.13 – Эквивалентная схема

В мостовой схеме сопротивления R_{13} , R_{12} , R_{23} и R_{24} , R_{34} , R_{23} соединены по схеме «треугольник». Эквивалентное сопротивление этой схемы можно определить только после замены одного из треугольников, например треугольника R_{24} R_{34} R_{23} звездой R_2 R_3 R_4 (рис. 3.13). Такая замена будет эквивалентной, если она не вызовет изменения токов всех остальных элементов цепи. Для этого величины сопротивлений звезды должны рассчитываться по следующим соотношениям:

$$R_2 = \frac{R_{23} \cdot R_{24}}{R_{23} + R_{24} + R_{34}}; R_3 = \frac{R_{23} \cdot R_{34}}{R_{23} + R_{24} + R_{34}}; R_4 = \frac{R_{24} \cdot R_{34}}{R_{23} + R_{24} + R_{34}}; \quad (3.12)$$

Для замены схемы «звезда» эквивалентным треугольником необходимо рассчитать сопротивления треугольника:

$$R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_4}; R_{24} = R_2 + R_4 + \frac{R_2 \cdot R_4}{R_3}; R_{34} = R_3 + R_4 + \frac{R_3 \cdot R_4}{R_2}. \quad (3.13)$$

После проведенных преобразований (рис. 3.13) можно определить величину эквивалентного сопротивления мостовой схемы (рис. 3.12)

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{(R_{12} \cdot R)(R_{13} + R_3)}{(R_{12} + R_2) + (R_{13} + R_3)} + R_4.$$

Источник ЭДС и источник тока в электрических цепях

При расчете и анализе электрических цепей реальный источник электрической энергии с конечным значением величины внутреннего сопротивления r_0 заменяют расчетным эквивалентным источником ЭДС или источником тока [1,9].

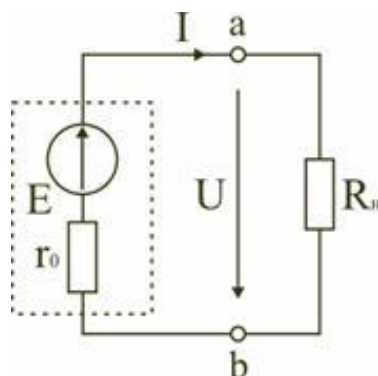


Рисунок 3.14 – Электрическая схема

Источник ЭДС (рис. 3.14) имеет внутреннее сопротивление r_0 , равное внутреннему сопротивлению реального источника. Стрелка в кружке указывает направление возрастания потенциала внутри источника ЭДС.

Для данной цепи запишем соотношение по второму закону Кирхгофа:

$$E = U + Ir_0 \text{ или } E = U - Ir_0. \quad (3.14)$$

Эта зависимость напряжения U на зажимах реального источника от тока I определяется его вольт-амперной или внешней характеристикой (рис. 3.15). Уменьшение напряжения источника U при увеличении тока нагрузки I объясняется падением напряжения $\Delta U = Ir_0$ на его внутреннем сопротивлении r_0 .

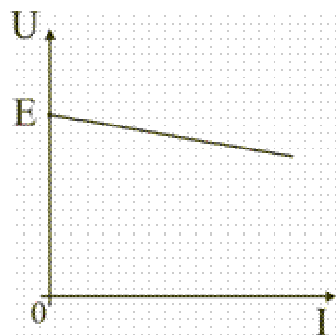


Рисунок 3.15 – Вольт-амперная

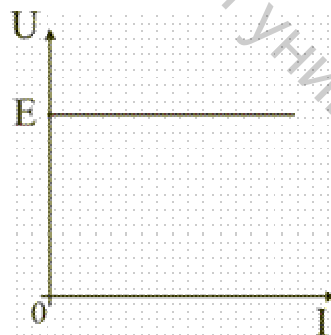


Рисунок 3.16 – Вольт-амперная

характеристика

характеристика

У идеального источника ЭДС внутреннее сопротивление $r_0 \ll R_n$. В этом случае его вольт-амперная характеристика представляет собой прямую линию (рис. 3.16), следовательно, напряжение U на его зажимах постоянно ($U = E$) и не зависит от величины сопротивления нагрузки R_n .

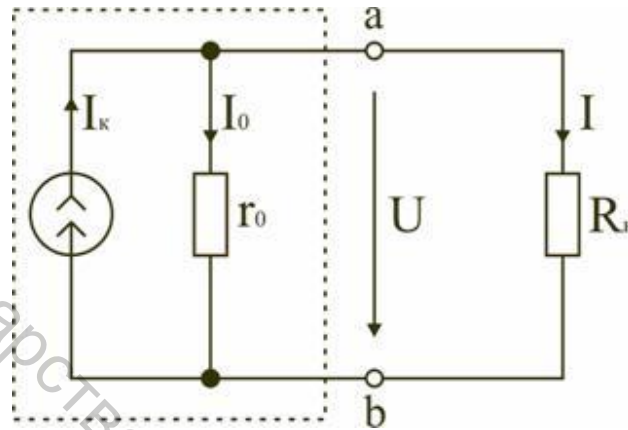


Рисунок 3.17 – Схема электрическая

Источник тока, заменяющий реальный источник электрической энергии, характеризуется неизменным по величине током I_k , равным току короткого замыкания источника ЭДС :

$$I_k = \frac{E}{r_0},$$

и внутренним сопротивлением r_0 , включенным параллельно (рис. 2.17).

Стрелка в кружке указывает положительное направление тока источника. Для данной цепи запишем соотношение по первому закону Кирхгофа:

$$I_k = I_0 + I;$$

$$I_0 = \frac{U}{r_0}.$$

В этом случае вольт-амперная (внешняя) характеристика $I(U)$ источника тока (рис. 3.18) определится соотношением

$$I = I_k - I_0 = I_k - U / r_0. \quad (3.15)$$

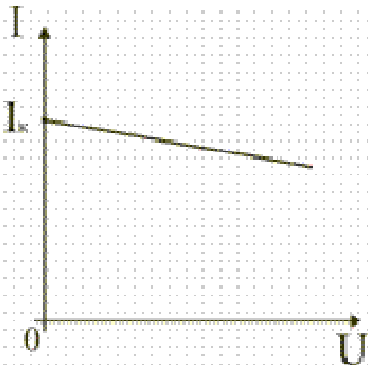


Рисунок 3.18 – Вольт-амперная характеристика

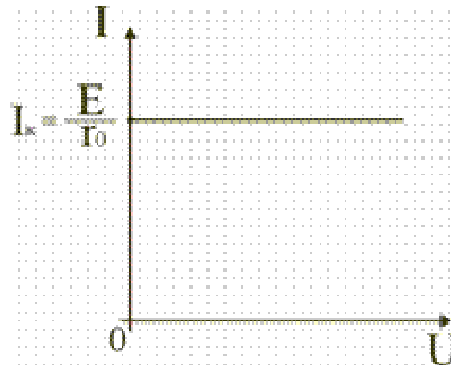


Рисунок 3.19 – Вольт-амперная характеристика

Уменьшение тока нагрузки I при увеличении напряжения U на зажимах аб источника тока объясняется увеличением тока I_0 , замыкающегося в цепи источника тока.

В идеальном источнике тока $r_0 \gg R_n$. Тогда из выражения (3.11) следует, что вольт-амперная характеристика $I(U)$ идеального источника тока представляет прямую линию, проведенную параллельно оси абсцисс на уровне $I = I_K = E / r_0$ (рис. 3.19).

При сравнении внешних характеристик источника ЭДС (рис. 3.15) и источника тока (рис. 3.18) следует, что они одинаково реагируют на изменение величины сопротивления нагрузки. Покажем, что в обоих случаях ток I в нагрузке определяется одинаковым соотношением.

Ток в нагрузке R_n для схем источника ЭДС (рис. 3.14) и источника тока (рис. 3.17) одинаков и равен

$$I = \frac{E}{(r_0 + R_n)}.$$

Для схемы (рис. 3.14) это следует из закона Ома, т.к. при последовательном соединении сопротивления r_0 и R_n складываются. В схеме (рис. 3.17) ток

$$I_K = \frac{E}{r_0},$$

распределяется обратно пропорционально сопротивлениям r_0 и R_n двух параллельных ветвей. Ток в нагрузке R_n

$$I = I_K \frac{r_0}{r_0 + R_n} = \frac{E}{r_0} \cdot \frac{r_0}{r_0 + R_n} = \frac{E}{r_0 + R_n},$$

т.е. совпадает по величине с током при подключении нагрузки к источнику ЭДС. Следовательно, схема источника тока (рис. 3.17) эквивалентна схеме источника ЭДС (рис. 3.14) в отношении энергии, выделяющейся в сопротивлении нагрузки R_H , но не эквивалентна ей в отношении энергии, выделяющейся во внутреннем сопротивлении источника питания.

Каким из двух эквивалентных источников питания пользоваться, не играет существенной роли. Однако на практике при расчете электротехнических устройств используется в качестве источника питания источник ЭДС с внутренним сопротивлением r_0 и величиной электродвижущей силы E .

В тех случаях, когда номинальное напряжение или номинальный ток и мощность источника электрической энергии оказываются недостаточными для питания потребителей, вместо одного используют несколько источников. Существует два основных способа соединения источников питания: последовательное и параллельное.

Последовательное включение источников питания (источников ЭДС) применяется тогда, когда требуется создать напряжение требуемой величины, а рабочий ток в цепи меньше или равен номинальному току одного источника ЭДС (рис. 3.20).

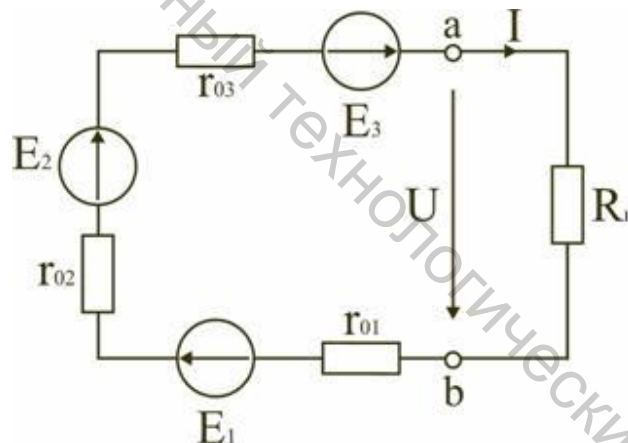


Рисунок 3.20 – Последовательное включение источника питания

Для этой цепи на основании второго закона Кирхгофа можно записать

$$E_1 + E_2 + E_3 = I(r_{01} + r_{02} + r_{03} + R_H),$$

откуда

$$I = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{r_{01} + r_{02} + r_{03} + R_H} = \frac{E}{r_{\Sigma} + R_H}.$$

Таким образом, электрическая цепь на рис. 3.20 может быть заменена цепью с эквивалентным источником питания (рис. 3.21), имеющим ЭДС $E_э$ и внутреннее сопротивление $r_э$.

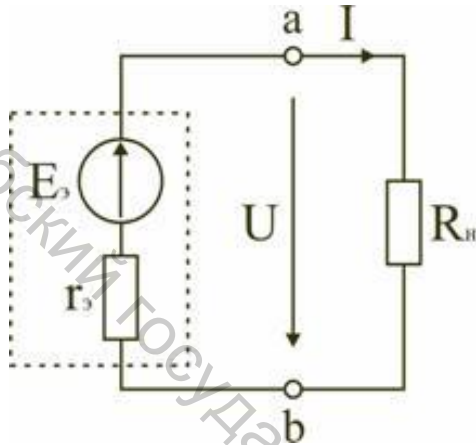


Рисунок 3.21 – Эквивалентный источник питания

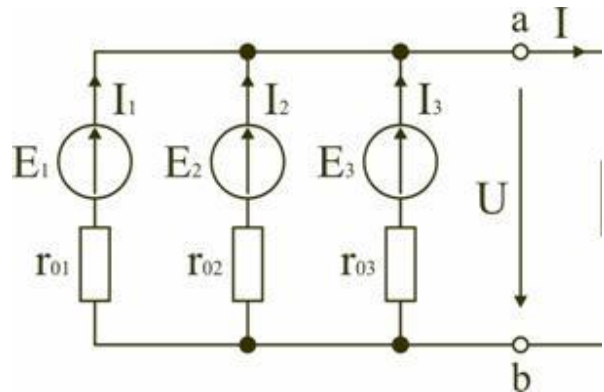


Рисунок 3.22 – Параллельное соединение источников

При параллельном соединении источников (рис. 3.22) соединяются между собой положительные выводы всех источников, а также их отрицательные выводы. Характерным для параллельного соединения является одно и то же напряжение U на выводах всех источников. Для электрической цепи на рис. 3.22 можно записать следующие уравнения:

$$I = I_1 + I_2 + I_3; P = P_1 + P_2 + P_3 = UI_1 + UI_2 + UI_3 = UI.$$

Как видно, при параллельном соединении источников ток и мощность внешней цепи равны соответственно сумме токов и мощностей источников. Параллельное соединение источников применяется, когда номинальные токи и мощность одного источника недостаточны для питания потребителей. На параллельную работу включают обычно источники с одинаковыми ЭДС, мощностями и внутренними сопротивлениями.

Режимы работы электрической цепи

При подключении к источнику питания различного количества потребителей или изменения их параметров будут изменяться величины напряжений, токов и мощностей в электрической цепи, от значений которых зависит режим работы цепи и ее элементов [5,6].

Реальная электрическая цепь может быть представлена в виде активного и пассивного двухполюсников (рис. 3.23).

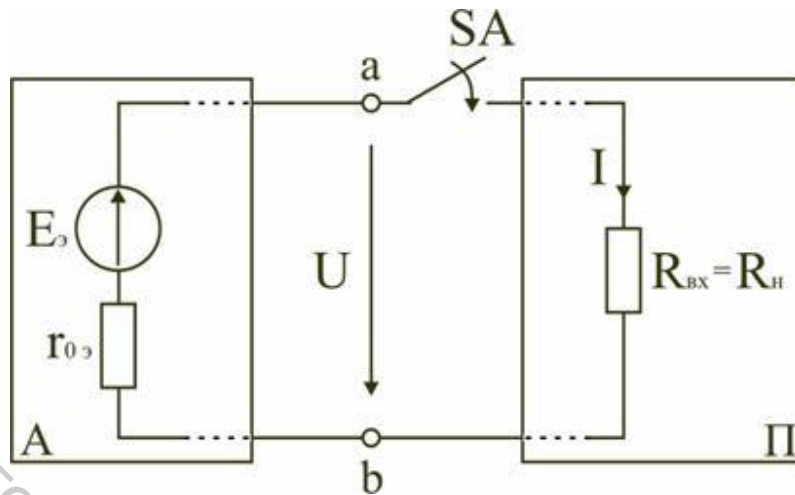


Рисунок 3.23 – Электрическая цепь

Двухполюсником называют цепь, которая соединяется с внешней относительно нее частью цепи через два вывода а и б.

Активный двухполюсник содержит источники электрической энергии, а пассивный двухполюсник их не содержит. Для расчета цепей с двухполюсниками реальные активные и пассивные элементы цепи представляются схемами замещения. Схема замещения пассивного двухполюсника П представляется в виде его входного сопротивления

$$R_{\text{вх}} = \frac{U}{I}.$$

Схема замещения активного двухполюсника А представляется эквивалентным источником с ЭДС E_0 и внутренним сопротивлением r_{0_0} , нагрузкой для которого является входное сопротивление пассивного двухполюсника $R_{\text{вх}} = R_n$.

Режим работы электрической цепи (рис. 3.23) определяется изменениями параметров пассивного двухполюсника, в общем случае величиной сопротивления нагрузки R_n . При анализе электрической цепи рассматривают следующие режимы работы: холостого хода, номинальный, короткого замыкания и согласованный.

Работа активного двухполюсника под нагрузкой R_n определяется его вольт-амперной (внешней) характеристикой, уравнение которой для данной цепи запишется в виде:

$$U = E_0 - Ir_{0_0}. \quad (3.16)$$

Вольт-амперная характеристика строится по двум точкам 1 и 2 (рис. 3.24), соответствующим режимам холостого хода и короткого замыкания.

Режим холостого хода

В этом режиме с помощью ключа SA нагрузка R_n отключается от источника питания (рис. 3.24). В этом случае ток в нагрузке становится равным нулю, как следует из соотношения (3.12) напряжение на зажимах аб становится равным ЭДС E_ε и называется напряжением холостого хода U_{xx} :

$$U = U_{xx} = E_\varepsilon.$$

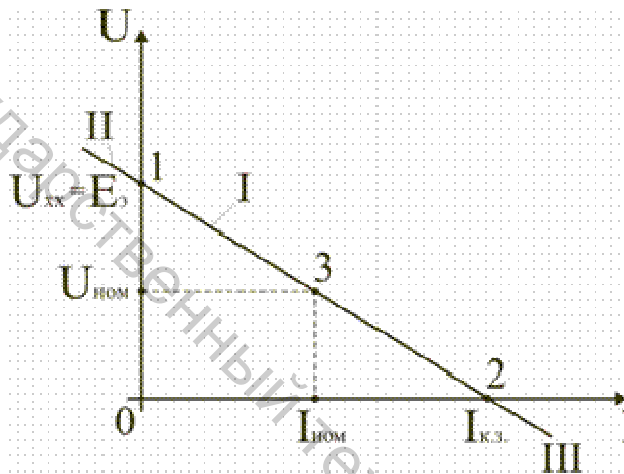


Рисунок 3.24 – Вольт-амперная характеристика

Режим короткого замыкания

Ключ SA в схеме электрической цепи (рис. 3.23) замкнут, а сопротивление $R_n = 0$. Напряжение U на зажимах аб становится равным нулю, т.к. $U = IR_n$, а уравнение (3.12) вольт-амперной характеристики можно записать в виде

$$I = I_{кз} = \frac{E_\varepsilon}{r_{о\varepsilon}}. \quad (3.17)$$

Значение тока короткого замыкания $I_{кз}$ соответствует точке 2 на вольт-амперной характеристике (рис. 3.24).

Анализ этих двух режимов показывает, что при расчете электрических цепей параметры активного двухполюсника $E_{\mathcal{O}}$ и $r_{0\mathcal{O}}$ могут быть определены по результатам режимов холостого хода и короткого замыкания:

$$\begin{aligned} E_{\mathcal{O}} &= U_{xx}; \\ r_{0\mathcal{O}} &= \frac{U_{xx}}{I_{K3}}. \end{aligned} \quad (3.18)$$

При изменении тока в пределах $0 < I < I_K$ активный двухполюсник (эквивалентный источник) отдает энергию во внешнюю цепь (участок I вольт-амперной характеристики на рис. 3.24). При токе $I < 0$ (участок II) источник получает энергию из внешней цепи, т.е. работает в режиме потребителя электрической энергии. Это произойдет, если к зажимам аb двухполюсника присоединена внешняя цепь с источниками питания. При напряжении $U < 0$ (участок III) резисторы активного двухполюсника потребляют энергию источников из внешней цепи и самого активного двухполюсника.

Номинальный режим

Номинальный режим электрической цепи обеспечивает технические параметры как отдельных элементов, так и всей цепи, указанные в технической документации, в справочной литературе или на самом элементе. Для разных электротехнических устройств указывают свои номинальные параметры. Три основных параметра указываются практически всегда: номинальное напряжение $U_{ном}$, номинальная мощность $P_{ном}$ и номинальный ток $I_{ном}$.

Работа активного двухполюсника под нагрузкой в номинальном режиме определяется уравнением (3.16), записанном для номинальных параметров

$$U_{ном} = E_{\mathcal{O}} - I_{ном} r_{0\mathcal{O}}. \quad (3.19)$$

На вольт-амперной характеристике (рис. 3.24) это уравнение определяется точкой 3 с параметрами $U_{ном}$ и $I_{ном}$.

Согласованный режим

Согласованный режим электрической цепи обеспечивает максимальную передачу активной мощности от источника питания к потребителю. Определим параметры электрической цепи (рис. 3.24), обеспечивающие получение согласован-

ного режима. При подключении нагрузки R_H к активному двухполюснику (рис. 3.24) в ней возникает ток

$$I = \frac{E_{\mathcal{O}}}{r_{O\mathcal{O}} + R_H}.$$

При этом на нагрузке выделится активная мощность

$$P = I^2 \cdot R_H = \frac{E_{\mathcal{O}}^2}{(r_{O\mathcal{O}} + R_H)^2} R_H. \quad (3.20)$$

Значение максимальной мощности, которая может быть выделена в нагрузке R_H :

$$P_{\max} = \frac{E_{\mathcal{O}}^2}{4r_{O\mathcal{O}}}. \quad (3.21)$$

Полезная мощность, выделяющаяся в нагрузке, определяется уравнением (3.20). Полная активная мощность, выделяемая активным двухполюсником:

$$P_{\text{полн}} = E_{\mathcal{O}} \cdot I = \frac{E_{\mathcal{O}}^2}{r_{O\mathcal{O}} + R_H}.$$

Коэффициент полезного действия

$$h = \frac{P}{P_{\text{полн}}} = \frac{R_H}{r_{O\mathcal{O}} + R_H}, \quad (3.22)$$

если $R_H = r_{O\mathcal{O}}$, то $\eta = 0,5$.

Для мощных электротехнических устройств такое низкое значение КПД недопустимо. Но в электронных устройствах и схемах, где величина P измеряется в милливаттах, с низким КПД можно не считаться, поскольку в этом режиме обеспечивается максимальная передача мощности на нагрузку.

4 Расчет электрических цепей с использованием законов Ома и Кирхгофа

Законы Ома и Кирхгофа используют, как правило, при расчете относительно простых электрических цепей с небольшим числом контуров, хотя принципиально с их помощью можно рассчитать сколь угодно сложные электрические цепи [1,2].

При расчете электрических цепей в большинстве случаев известны параметры источников ЭДС или напряжения, сопротивления элементов электрической цепи, и задача сводится к определению токов в ветвях цепи. Зная токи, можно найти напряжения на элементах цепи, мощность, потребляемую отдельными элементами и всей цепью в целом, мощность источников питания и др.

Расчет цепи с одним источником питания

Электрическая цепь, схема которой приведена на рис. 4.1, состоит из одного источника питания, имеющего ЭДС E и внутреннее сопротивление r_0 , и резисторов R_1, R_2, R_3 , подключенных к источнику по смешанной схеме. Операции расчета такой схемы рекомендуется производить в определенной последовательности.

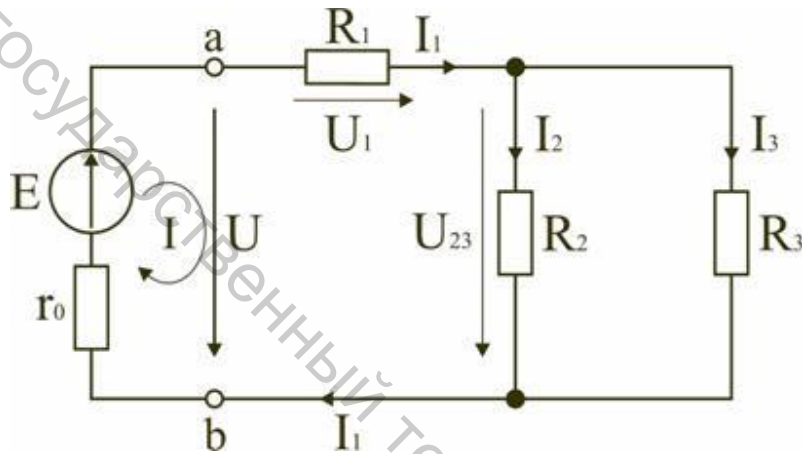


Рисунок 4.1 – Электрическая цепь

1. Обозначение токов и напряжений на участках цепи.

Резистор R_1 включен последовательно с источником, поэтому ток I_1 для них будет общим, токи в резисторах R_2 и R_3 обозначим соответственно I_2 и I_3 . Аналогично обозначим напряжения на участках цепи.

2. Расчет эквивалентного сопротивления цепи.

Резисторы R_2 и R_3 включены по параллельной схеме и заменяются согласно (3.7) эквивалентным сопротивлением:

$$R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}.$$

В результате цепь на рис. 4.1 преобразуется в цепь с последовательно соединенными резисторами R_1, R_{23} и r_0 . Тогда эквивалентное сопротивление всей цепи запишется в виде:

$$R_{\Sigma} = r_0 + R_1 + R_{23}.$$

3. Расчет тока в цепи источника. Ток I_1 определим по закону Ома:

$$I_1 = U / R_9.$$

4. Расчет напряжений на участках цепи. По закону Ома определим величины напряжений:

$$U_1 = I_1 R_1; U_{23} = I_1 R_{23}.$$

Напряжение U на зажимах аb источника питания определим по второму закону Кирхгофа (3.4) для контура I (рис. 4.1):

$$E = I_1 r_0 + U; U = E - I_1 r_0.$$

5. Расчет токов и мощностей для всех участков цепи. Зная величину напряжения U_{23} , определим по закону Ома токи в резисторах R_2 и R_3 :

$$I_2 = \frac{U_{23}}{R_2}; I_3 = \frac{U_{23}}{R_3}.$$

По формуле (3.8) определим величину активной электрической мощности, отдаваемую источником питания потребителям электрической энергии:

$$P = EI_1.$$

В элементах схемы расходуются активные мощности:

$$P_1 = I_1^2 \cdot R_1; P_2 = I_2^2 \cdot R_2; P_3 = I_3^2 \cdot R_3.$$

На внутреннем сопротивлении r_0 источника питания расходуются часть электрической мощности, отдаваемой источником. Эту мощность называют мощностью потерь ΔP :

$$\Delta P = I_1^2 \cdot r_0;$$

6. Проверка правильности расчетов. Эта проверка производится составлением уравнения баланса мощностей (3.8): мощность, отдаваемая источником питания, должна быть равна сумме мощностей, расходуемых в резистивных элементах схемы:

$$E \cdot I_1 = I_1^2 \cdot (r_0 + R_1) + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3.$$

Кроме того, правильность вычисления токов можно проверить, составив уравнение по первому закону Кирхгофа (3.3) для узла схемы:

$$I_1 = I_2 + I_3.$$

Расчет разветвленной электрической цепи с несколькими источниками питания

Основным методом расчета является метод непосредственного применения первого и второго законов Кирхгофа [1,9].

В качестве примера рассмотрим цепь, схема которой приведена на рис. 4.2. Схема цепи содержит 6 ветвей ($m = 6$) и 4 узла: a, b, c, d ($n = 4$). По каждой ветви проходит свой ток, следовательно, число неизвестных токов равно числу ветвей, и для определения токов необходимо составить m уравнений. При этом по первому закону Кирхгофа составляют уравнения для $(n - 1)$ узлов. Недостающие $m - (n - 1)$ уравнения получают по второму закону Кирхгофа, составляя их для $m - (n - 1)$ взаимно независимых контуров. Рекомендуется выполнять операции расчета в определенной последовательности.

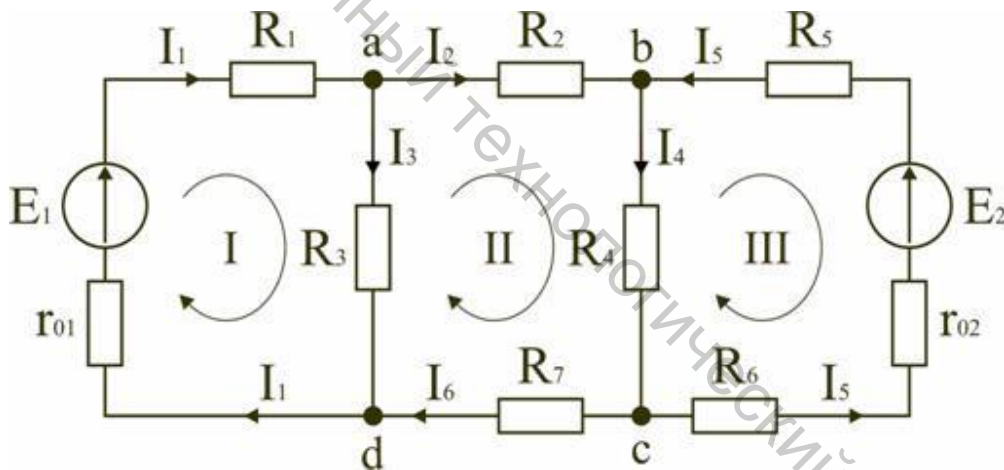


Рисунок 4.2 – Электрическая схема

1. Обозначение токов во всех ветвях. Направление токов выбираем произвольно, но в цепях с источниками ЭДС рекомендуется, чтобы направление токов совпадало с направлением ЭДС.

2. Составление уравнений по первому закону Кирхгофа. Выбираем $4 - 1 = 3$ узла (a, b, c) и для них записываем уравнения:

$$\text{узел a: } I_1 - I_2 - I_3 = 0;$$

$$\text{узел b: } I_2 - I_4 + I_5 = 0;$$

узел с: $I_4 - I_5 + I_6 = 0$.

3. Составление уравнений по второму закону Кирхгофа. Необходимо составить $6 - 3 = 3$ уравнения. В схеме на рис. 4.2 выбираем контуры I, II, III и для них записываем уравнения:

контур I: $E_1 = I_1(r_{01} + R_1) + I_3R_3$;

контур II: $0 = I_2R_2 + I_4R_4 + I_6R_7 - I_3R_3$;

контур III: $-E_2 = -I_5(r_{02} + R_5 + R_6) - I_4R_4$.

4. Решение полученной системы уравнений и анализ результатов. Полученная система из шести уравнений решается известными математическими методами. Если в результате расчетов численное значение тока получено со знаком «минус», это означает, что реальное направление тока данной ветви противоположно принятому в начале расчета. Если в ветвях с ЭДС токи совпадают по направлению с ЭДС, то данные элементы работают в режиме источников, отдавая энергию в схему. В тех ветвях, где направления тока и ЭДС не совпадают, источники ЭДС работают в режиме потребителя.

5. Проверка правильности расчетов. Для проверки правильности произведенных расчетов можно на основании законов Кирхгофа написать уравнения для узлов и контуров схемы, которые не использовались при составлении исходной системы уравнений:

узел d: $I_3 + I_6 - I_1 = 0$,

внешний контур схемы: $E_1 - E_2 = I_1(r_{01} + R_1) + I_2R_2 - I_5(r_{02} + R_5 + R_6) + I_6R_7$.

Независимой проверкой является составление уравнения баланса мощностей (3.8) с учетом режимов работы элементов схемы с ЭДС:

$$E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_5 = I_1^2 \cdot (r_{01} + R_1) + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 + I_4^2 \cdot R_4 + I_5^2 \cdot (r_{02} + R_5 + R_6) + I_6^2 \cdot R_7.$$

Если активная мощность, поставляемая источниками питания, равна по величине активной мощности, израсходованной в пассивных элементах электрической цепи, то правильность расчетов подтверждена.

Основные методы расчета сложных электрических цепей

С помощью законов Ома и Кирхгофа, можно рассчитать электрические цепи любой сложности. Однако решение в этом случае может оказаться слишком громоздким и потребует больших затрат времени. По этой причине для расчета слож-

ных электрических цепей разработаны на основе законов Ома и Кирхгофа более рациональные методы расчета, два из которых: метод узлового напряжения и метод эквивалентного генератора.

Метод узлового напряжения

Этот метод рекомендуется использовать в том случае, если сложную электрическую схему можно упростить, заменяя последовательно и параллельно соединенные резисторы эквивалентными, используя при необходимости преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду. Если полученная схема содержит несколько параллельно соединенных активных и пассивных ветвей, например, схема на рис. 4.3, ее расчет и анализ весьма просто можно произвести методом узлового напряжения.

Пренебрегая сопротивлением проводов, соединяющих ветви цепи, в схеме (рис. 4.3) можно выделить два узла: а и б. В зависимости от значений и направлений ЭДС и напряжений, а также значений сопротивлений ветвей между узловыми точками а и б установится определенное узловое напряжение U_{ab} . Предположим, что оно направлено так, как показано на рис. 4.3, и известно. Зная напряжение U_{ab} , легко найти токи во всех ветвях.

Выберем положительные направления токов и обозначим их на схеме. Запишем уравнения по второму закону Кирхгофа для контуров (2.4), проходящих по первой и второй ветви, содержащих источники ЭДС, совершая обход контуров по часовой стрелке.

Первая ветвь: $E_1 = I_1(r_{01} + R_1) + U_{ab}$.

Вторая ветвь: $-E_2 = -I_2(r_{02} + R_2) + U_{ab}$.

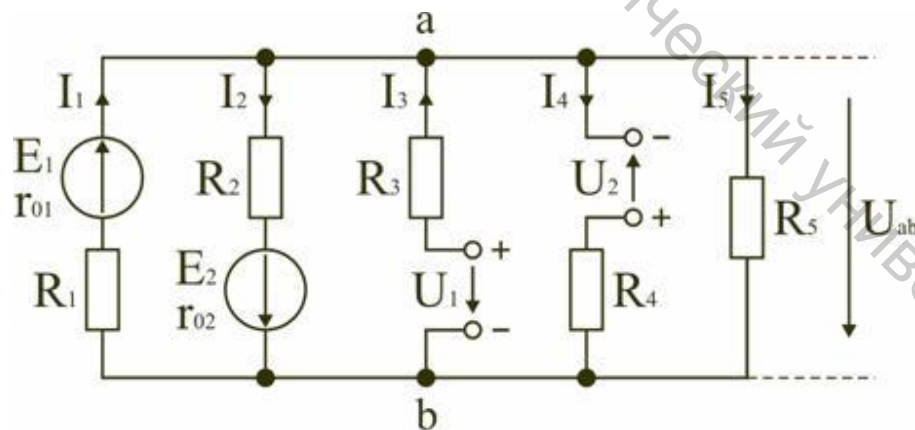


Рисунок 4.3 – Электрическая схема

Определим значения токов, возникающих в первой и второй ветвях:

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{r_{01} + R_1} = (E_1 - U_{ab}) \cdot g_1,$$

$$I_2 = \frac{E_2 - U_{ab}}{r_{02} + R_2} = (E_2 - U_{ab}) \cdot g_2,$$

$$g_1 = \frac{1}{r_{01} + R_1}; g_2 = \frac{1}{r_{02} + R_2} - \text{проводимости первой и второй ветвей.}$$

Запишем уравнения по второму закону Кирхгофа для ветвей (рис. 4.3), содержащих источники напряжений, совершая обход контуров также по часовой стрелке.

$$\text{Третья ветвь: } U_{ab} - U_1 + I_3 R_3 = 0.$$

$$\text{Четвертая ветвь: } U_{ab} + U_2 - I_4 R_4 = 0.$$

Определим значения токов, возникающих в третьей и четвертой ветвях:

$$I_3 = \frac{U_1 - U_{ab}}{R_3} = (U_1 - U_{ab}) \cdot g_3,$$

$$I_4 = \frac{U_2 - U_{ab}}{R_4} = (U_2 - U_{ab}) \cdot g_4,$$

$$g_3 = \frac{1}{R_3}; g_4 = \frac{1}{R_4} - \text{проводимости третьей и четвертой ветвей.}$$

Ток в пятой ветви определим по закону Ома:

$$I_5 = \frac{U_{ab}}{R_5} = U_{ab} \cdot g_5,$$

$g_5 = \frac{1}{R_5}$ – проводимость пятой ветви.

Для вывода формулы, позволяющей определить напряжение U_{ab} , напомним уравнение по первому закону Кирхгофа (рис. 4.3) для узла а:

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0.$$

После замены токов их выражениями и соответствующих преобразований получим:

$$U_{ab} = \frac{E_1 \cdot g_1 - E_2 \cdot g_2 + U_1 \cdot g_3 - U_2 \cdot g_4}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5}.$$

Формула узлового напряжения в общем случае имеет вид:

$$U_{ab} = \frac{\sum E \cdot g + \sum U \cdot g}{\sum g}. \quad (4.1)$$

При расчете электрической цепи методом узлового напряжения после определения величины напряжения U_{ab} значения токов в ветвях находят по их выражениям.

При записи формулы следует задаться положительным направлением узлового напряжения U_{ab} . Со знаком «+» в (4.1) должны входить ЭДС, направленные между точками а и б встречно напряжению U_{ab} , и напряжения ветвей, направленные согласно с U_{ab} . Знаки в формуле (4.1) не зависят от направления токов ветвей.

При расчете и анализе электрических цепей методом узлового напряжения рекомендуется выбирать положительные направления токов после определения узлового напряжения. В этом случае при расчете токов положительные направления токов нетрудно выбрать таким образом, чтобы все они совпадали с их действительными направлениями.

Проверка правильности произведенных расчетов проводится по первому закону Кирхгофа для узла а или б, а также составлением уравнения баланса мощностей (3.8).

5 Однофазный переменный ток

5.1 Получение переменного тока

До конца XIX в. использовались только источники постоянного тока — химические элементы и генераторы. Это ограничивало возможности передачи электрической энергии на большие расстояния. Для уменьшения потерь в линиях электропередачи необходимо использовать очень высокое напряжение. Однако получить достаточно высокое напряжение от генератора постоянного тока практически невозможно. Проблема передачи электрической энергии на большие расстояния была решена только при использовании переменного тока и трансформаторов.

Переменный ток имеет ряд преимуществ по сравнению с постоянным: генератор переменного тока значительно проще и дешевле генератора постоянного тока; переменный ток можно трансформировать; переменный ток легко преобразуется в постоянный; двигатели переменного тока значительно проще и дешевле, чем двигатели постоянного тока.

Переменным током можно назвать ток, который с течением времени изменяет свою величину, но в технике переменным током называют такой ток, который периодически изменяет и величину, и направление. Причем среднее значение силы такого тока за период T равно нулю. Периодическим переменный ток называется потому, что через промежутки времени, кратные T , характеризующие его физические величины принимают одинаковые значения.

В электротехнике наибольшее распространение получил синусоидальный переменный ток, величина которого изменяется по закону синуса (или косинуса), обладающий рядом достоинств по сравнению с другими периодическими токами.

Переменный ток промышленной частоты получают на электростанциях с помощью генераторов переменного тока (трехфазных синхронных генераторов).

Получение переменного тока. Пусть в однородном магнитном поле постоянного магнита равномерно вращается с угловой скоростью ω рамка площадью S (рис. 5.1). Магнитный поток через рамку

$$\Phi = BS \cos \alpha, \quad (5.1)$$

где α — угол между нормалью к рамке n и вектором магнитной индукции B .

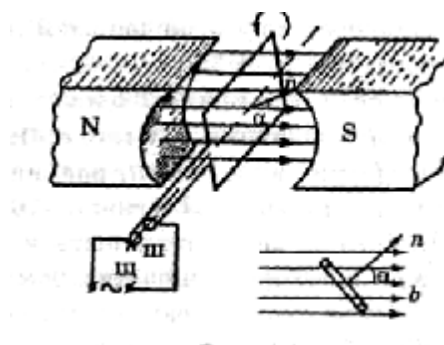


Рисунок 5.1

Поскольку при равномерном вращении рамки угловая скорость $\omega = \frac{\alpha}{t}$, то угол α будет изменяться по закону $\alpha = \omega \cdot t$, формула (5.1) примет вид

$$\Phi = BS \cos \omega \cdot t, \quad (5.2)$$

Величину ω называют круговой частотой. Поскольку при вращении рамки пересекающий ее магнитный поток все время меняется, то по закону электромагнитной индукции в ней будет наводиться ЭДС индукции

$$E = \frac{d\Phi}{dt} = BS \sin \omega t, \quad (5.3)$$

где $E_0 = BS\omega$ – амплитуда синусоидальной ЭДС. Таким образом, в рамке возникнет синусоидальная ЭДС, а если замкнуть рамку на нагрузку, то в цепи потечет синусоидальный ток.

Значение переменной ЭДС (а также тока и напряжения) в данный момент времени называется мгновенным значением.

Величину, стоящую под знаком синуса или косинуса, называют фазой колебаний, описываемых этими функциями. Фаза определяет значение ЭДС в любой момент времени t . Фаза измеряется в градусах или в радианах. Величина f называется частотой колебаний.



Время T одного полного изменения ЭДС (это время одного оборота рамки) называют периодом ЭДС. Изменение ЭДС со временем может быть изображено на временной диаграмме (рис. 5.2).

Рисунок 5.2

Частота колебаний измеряется в секундах, частота – в герцах (Гц). В большинстве стран, включая Россию, промышленная частота переменного тока составляет 50 Гц (в США и Японии – 60 Гц).

Величина промышленной частоты переменного тока обусловлена технико-экономическими соображениями. Если она слишком низка, то увеличиваются габариты электрических машин, расход материалов на их изготовление; заметным становится мигание света в электрических лампочках. При слишком высоких частотах увеличиваются потери энергии в сердечниках электрических машин и трансформаторах. Поэтому наиболее оптимальными оказались частоты 50 – 60 Гц. Однако в некоторых случаях используются переменные токи с более высокой и с более низкой частотой. Например, в самолетах применяется частота 400 Гц. На этой частоте можно значительно уменьшить габариты и вес трансформаторов и электромоторов, что для авиации более существенно, чем увеличение потерь в сердечниках. На железных дорогах используют переменный ток с частотой 25 Гц и даже 16,66 Гц.

Действующие значения тока и напряжения

Для описания характеристик переменного тока необходимо избрать определенные физические величины. Мгновенные и амплитудные значения для этих целей неудобны, а средние значения за период равны нулю. Поэтому вводят понятие действующих значений тока и напряжения. Они основаны на тепловом действии тока, не зависящем от его направления.

Действующими значениями тока и напряжения называют соответствующие параметры такого постоянного тока, при котором в данном проводнике за данный промежуток времени выделяется столько же теплоты, что и при переменном токе.

При изменении тока по синусоиде его действующее значение меньше его амплитудного значения в $\sqrt{2}$ раз, т. е.

$$I = \frac{I_o}{\sqrt{2}} \approx 0,7077 \cdot I_o. \quad (5.4)$$

Такое же соотношение справедливо для ЭДС и напряжения:

$$U = \frac{U_o}{\sqrt{2}}, \quad E = \frac{E_o}{\sqrt{2}}. \quad (5.5)$$

Действующие значения обозначаются прописными латинскими буквами без индексов.

Электроизмерительные приборы переменного тока проградуированы в действующих значениях измеряемых величин. В некоторых книгах действующие значения называют эффективными значениями.

Метод векторных диаграмм, т. е. изображение величин, характеризующих переменный ток векторами, а не тригонометрическими функциями, чрезвычайно удобен.

Переменный ток, в отличие от постоянного, характеризуется двумя скалярными величинами – амплитудой и фазой. Поэтому для математического описания переменного тока необходим математический объект, также характеризующийся двумя скалярными величинами. Существуют два таких математических объекта – это вектор на плоскости и комплексное число. В теории электрических цепей и те и другие используются для описания переменных токов

5.2 Явление резонанса

Явление резонанса относится к наиболее важным с практической точки зрения свойствам электрических цепей. Оно заключается в том, что электрическая цепь, имеющая реактивные элементы, обладает чисто резистивным сопротивлением [8,9].

Резонансом называется такой режим работы цепи, включающей в себя индуктивные и емкостные элементы, при котором ее входное сопротивление (входная проводимость) вещественно. Следствием этого является совпадение по фазе тока на входе цепи с входным напряжением.

Общее условие резонанса для любого двухполюсника можно сформулировать в виде $\text{Im}[\underline{Z}] = 0$ или $\text{Im}[\underline{Y}] = 0$, где $\underline{Z}$ и $\underline{Y}$ – комплексное сопротивление и проводимость двухполюсника. Следовательно, режим резонанса полностью определяется параметрами электрической цепи и не зависит от внешнего воздействия на нее со стороны источников электрической энергии.

Последовательный резонансный контур представлен на рис. 5.3 а. Комплексное сопротивление цепи равно

$$\underline{Z} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right). \quad (5.6)$$

Условие резонанса из выражения (5.6) будет

$$\text{Im}[\underline{Z}] = 0 \Rightarrow \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \Leftrightarrow x_L = x_C. \quad (5.7)$$

Таким образом, резонанс в цепи наступает независимо от значения резистивного сопротивления R , когда индуктивное сопротивление $x_L = \omega L$ равно емкост-

ному $x_C = 1/(\omega C)$. Как следует из выражения (5.7), это состояние может быть получено вариацией любого из трех параметров – L , C и ω , а также любой их комбинацией. При вариации одного из параметров условие резонанса можно представить в виде:

$$L_0 = \frac{1}{\omega^2 C}; \quad C_0 = \frac{1}{\omega^2 L}; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (5.8)$$

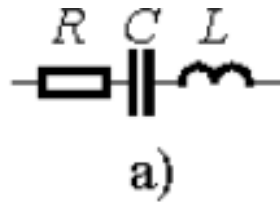


Рисунок 5.3 – Электрическая схема (а), векторная диаграмма (б)

Таким образом, резонанс в цепи наступает независимо от значения резистивного сопротивления R , когда индуктивное сопротивление $x_L = \omega L$ равно емкостному $x_C = 1/(\omega C)$. Как следует из выражения (5.7), это состояние может быть получено вариацией любого из трех параметров – L , C и ω , а также любой их комбинацией. При вариации одного из параметров условие резонанса можно представить в виде:

$$L_0 = \frac{1}{\omega^2 C}; \quad C_0 = \frac{1}{\omega^2 L}; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (5.9)$$

Все величины, входящие в выражение (5.9), положительны, поэтому эти условия выполнимы всегда, т.е. резонанс в последовательном контуре можно создать

- изменением индуктивности L при постоянных значениях C и ω ;
- изменением емкости C при постоянных значениях L и ω ;
- изменением частоты ω при постоянных значениях L и C .

Наибольший интерес для практики представляет вариация частоты. При изменении частоты резистивная составляющая комплексного сопротивления цепи $\underline{Z}$ остается постоянной, а реактивная изменяется. Поэтому конец вектора $\underline{Z}$ на комплексной плоскости перемещается по прямой, параллельной мнимой оси и проходящей через точку R вещественной оси (рис. 5.9 б)). В режиме резонанса мнимая составляющая $\underline{Z}$ равна нулю и $\underline{Z} = Z = Z_{\min} = R$, $\varphi = 0$, т.е. полное сопротивление при резонансе соответствует минимальному значению.

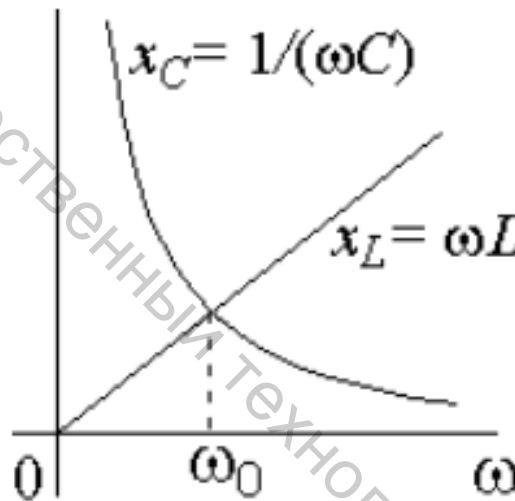


Рисунок 5.4 – Изменение индуктивного и емкостного сопротивления от частоты

Индуктивное и емкостное сопротивления изменяются в зависимости от частоты так, как показано на рис. 5.4. Равенство сопротивлений x_L и x_C наступает в режиме резонанса при частоте ω_0 .

Переходя от амплитудных значений к действующим, получим напряжения на отдельных элементах контура

$$U_R = RI; \quad U_L = \omega LI; \quad U_C = \frac{I}{\omega C}, \quad (5.10)$$

где $r = \sqrt{\frac{L}{C}}$ – величина, имеющая размерность сопротивления и называемая волновым или характеристическим сопротивлением контура.

Следовательно, при резонансе

- напряжение на резисторе равно напряжению на входе контура;
- напряжения на реактивных элементах одинаковы и пропорциональны волновому сопротивлению контура;
- соотношение напряжения на входе контура (на резисторе) и напряжений на реактивных элементах определяется соотношением резистивного и волнового сопротивлений.

Сопоставляя частотные характеристики последовательного резонансного контура от источника тока с характеристиками при питании его от источника ЭДС, можно сделать следующие выводы:

- частотные характеристики напряжений и тока контура принципиально отличаются друг от друга, т.к. при питании от источника ЭДС сумма напряжений остается постоянной и происходит только их перераспределение между элементами, а при питании от источника тока падения напряжения на каждом элементе формируются независимо;
- режимы резонанса для обоих случаев полностью идентичны;
- фазовые частотные характеристики для обоих случаев также идентичны.

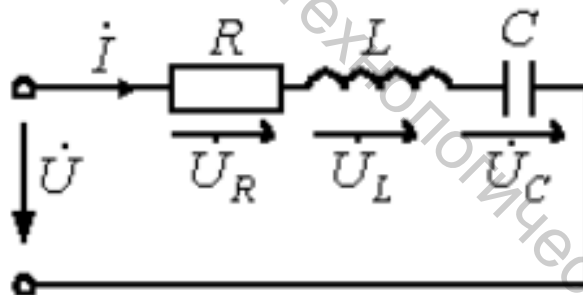


Рисунок 5.5 – Схема электрической цепи

Для цепи на рис.5.5 имеет место

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{I} \left[R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right] = \dot{I} \underline{Z} ; \quad (5.11)$$

где

$$\underline{Z} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} e^{j\varphi} \quad (5.12)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L - 1/(\omega C)}{R} \quad (5.13)$$

В зависимости от соотношения величин ωL и $\frac{1}{\omega C}$ возможны три различных случая [6,8].

1. В цепи преобладает индуктивность, т.е.

$$\omega L > 1/(\omega C),$$

а следовательно,

$$\dot{U}_L > \dot{U}_C.$$

Этому режиму соответствует векторная диаграмма на рис. 5.6,а.

2. В цепи преобладает емкость, т.е.

$$\omega L < 1/(\omega C),$$

значит,

$$\dot{U}_L < \dot{U}_C.$$

Этот случай отражает векторная диаграмма на рис. 5.6,б.

3. $\dot{U}_L = \dot{U}_C$ – случай резонанса напряжений (рис. 5.6,в).

Условие резонанса напряжений:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (5.14)$$

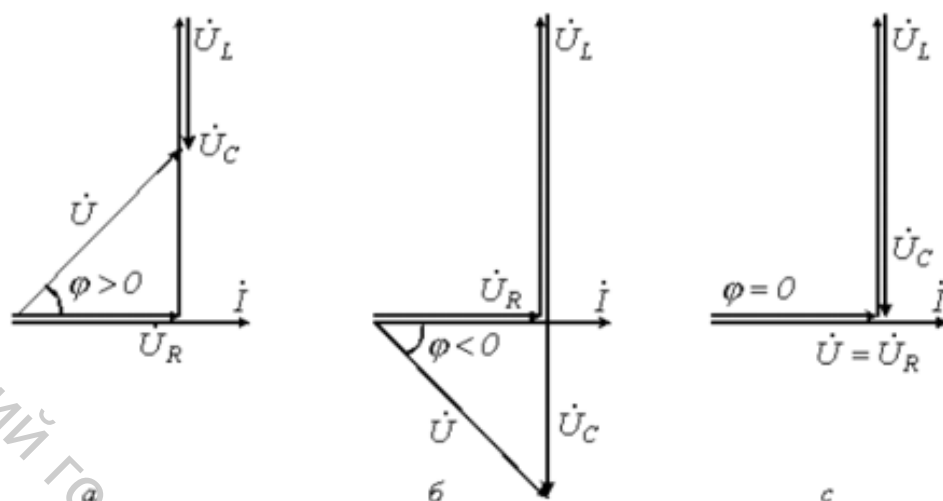


Рисунок 5.6 – Векторные диаграммы

Как показывает анализ, режима резонанса можно добиться путем изменения параметров L и C , а также частоты:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5.15)$$

Другим параметром резонансного контура является характеристическое сопротивление, связанное с добротностью соотношением

$$\rho = \omega_p L = \frac{1}{\omega_p C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5.16)$$

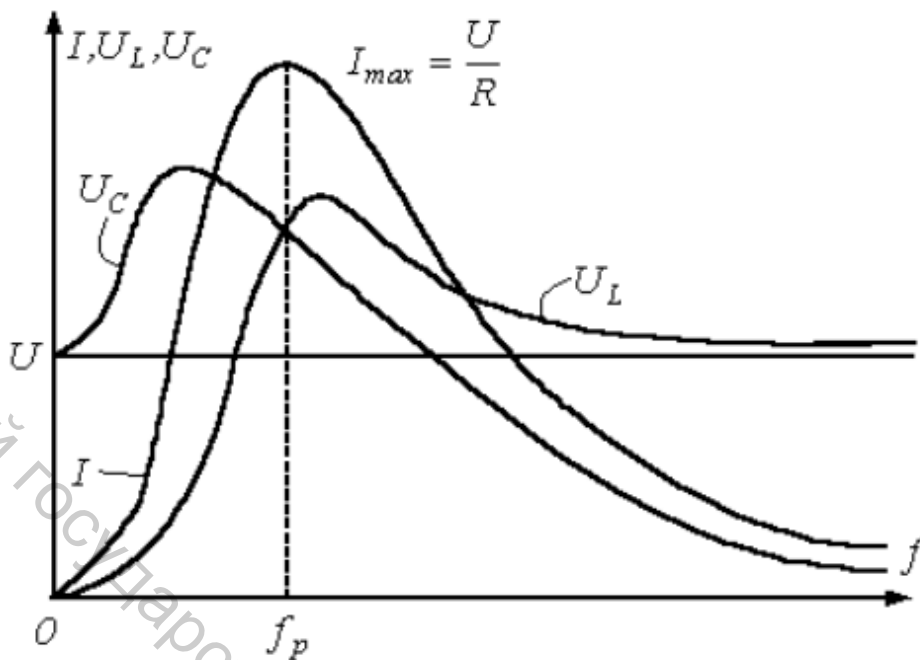


Рисунок 5.7 – Графики зависимости параметров элементов от частоты

Резонанс в цепи с параллельно соединенными элементами (резонанс токов)

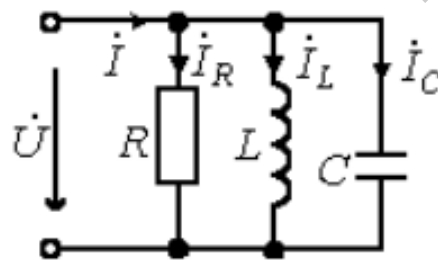


Рисунок 5.8 – Схема электрической цепи

Для цепи рис. 5.8 имеем

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C = \dot{U} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \right) = \dot{U} [g + j(b_C - b_L)] = \dot{U} \underline{Y},$$

где

$$\underline{Y} = \sqrt{g^2 + (b_C - b_L)^2} e^{-j\varphi}; \quad (5.17)$$

$$\varphi = \arctg \frac{b_L - b_C}{g}. \quad (5.18)$$

В зависимости от соотношения величин b_L и b_C , как и в рассмотренном выше случае последовательного соединения элементов, возможны три различных случая [1,9].

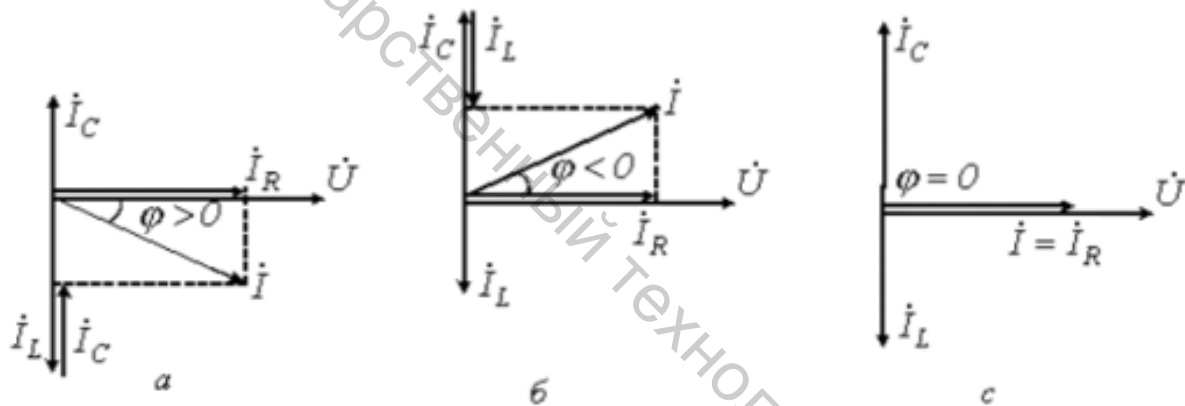


Рисунок 5.9 – Векторные диаграммы

В цепи преобладает индуктивность, т.е.

$$b_L > b_C,$$

а следовательно,

$$I_L > I_C.$$

Этому режиму соответствует векторная диаграмма на рис. 5.9 а.

В цепи преобладает емкость, т.е.

$$b_L < b_C,$$

а значит,

$$I_L < I_C.$$

Этот случай иллюстрирует векторная диаграмма на рис. 5.9 б.

$I_L = I_C$ —случай резонанса токов (рис. 5.9 в).

Условие резонанса токов

$$b_L = b_C,$$

или

$$\frac{I}{\omega L} = \omega C. \quad (5.19)$$

Таким образом, при резонансе токов входная проводимость цепи минимальна, а входное сопротивление, наоборот, максимально. В частности, при отсутствии в цепи на рис. 3.8 резистора R ее входное сопротивление в режиме резонанса стремится к бесконечности, т.е. при резонансе токов ток на входе цепи минимален.

Резонансная частота определяется соотношением (3.15). Однако не следует использовать выражение (3.15) для любой резонансной цепи. Оно справедливо только для простейших схем с последовательным или параллельным соединением индуктивного и емкостного элементов.

6 Трехфазный переменный ток

6.1 Принцип построения трехфазной системы, соединение звездой

Объединение в одной линии электропередачи нескольких цепей переменного тока с независимыми источниками электроэнергии называется многофазной системой. Наибольшее распространение получила трехфазная система, которая была изобретена и разработана во всех деталях, включая генератор трехфазного переменного тока, трехфазный трансформатор и асинхронный двигатель, выдающимся русским инженером М. О. Доливо-Добровольским в 1889—1891 гг.

Трехфазной системой переменного тока называется совокупность трех однофазных переменных токов одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых друг относительно друга по фазе на $1/3$ периода (120°).

Трехфазный генератор состоит из трех одинаковых изолированных друг от друга обмоток, расположенных на статоре и разнесенных в пространстве на 120° . В центре статора вращается электромагнит (рис. 6.1).

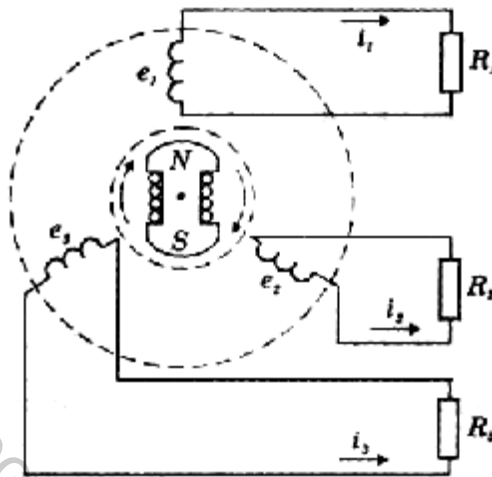


Рисунок 6.1 – Трехфазный генератор

При этом форма магнита такова, что магнитный поток, пронизывающий каждую катушку, изменяется по косинусоидальному закону. Тогда по закону электромагнитной индукции в катушках будут индуцироваться ЭДС равной амплитуды и частоты, отличающиеся друг от друга по фазе на 120° :

$$\begin{aligned} e_A &= E_0 \sin \omega \cdot t; \\ e_B &= E_0 \sin(\omega \cdot t - 120^\circ); \\ e_C &= E_0 \sin(\omega \cdot t - 240^\circ). \end{aligned} \quad (6.1)$$

Эти три ЭДС можно изобразить на временной (рис. 6.2 а) и векторной (рис. 6.2 б) диаграммах:

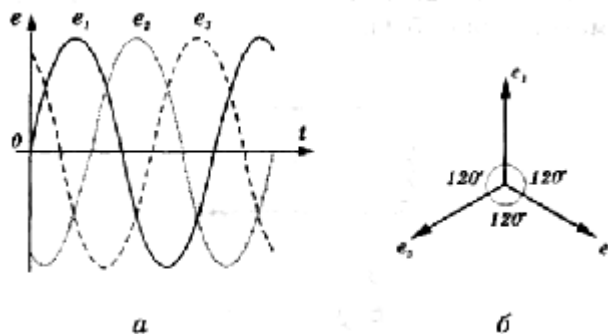


Рисунок 6.2 – Изображение ЭДС:

а) на временной диаграмме; б) на векторной диаграмме

Если все концы обмоток генератора соединить в одной точке O , а к их началам присоединить провода, идущие к приемникам электрической энергии (у которых концы также соединены в общей точке O'), то мы получим соединение звездой (рис. 6.3).

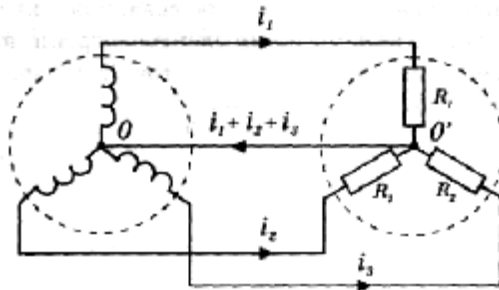


Рисунок 6.3 – Соединение звездой

Видно, что контуры, по которым замыкаются фазные токи, при таком соединении не изменятся по сравнению с рис. 6.1. Следовательно, по общему обратному проводу будет протекать ток, равный сумме токов трех фаз:

$$\dot{I}_O = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (6.2)$$

Если все три фазы имеют одинаковые нагрузки, то фазные токи будут равны по модулю, отличаясь друг от друга по фазе на 120° :

$$\begin{aligned} I_A &= I_0 \sin \omega \cdot t; \\ I_B &= I_0 \sin(\omega \cdot t - 120^\circ); \\ I_C &= I_0 \sin(\omega \cdot t - 240^\circ). \end{aligned} \quad (6.3)$$

Для того чтобы найти значение тока в проводе OO' , нужно сложить токи (6.3). Это можно сделать с помощью векторной диаграммы (рис. 6.4). При симметричной нагрузке ток в общем проводе равен нулю, поэтому провод OO' называется нулевым. Точка соединения концов обмоток генератора или концов нагрузок называется нулевой. Провода, соединяющие начала обмоток генератора с приемниками электроэнергии, называются линейными. Система трехфазного тока с нулевым проводом называется четырехпроводной.

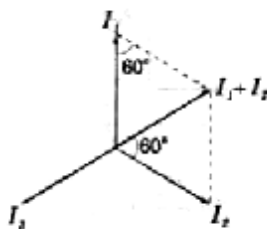


Рисунок 6.4 – Векторная диаграмма

В цепях трехфазного тока вне зависимости от способа соединения различают два типа напряжений — линейные U_L и фазные U_Φ — и два типа токов — линейные I_L и фазные I_Φ . Напряжение между двумя линейными проводами называется линейным, а между линейным и нулевым проводом — фазным. Токи, протекающие в линейных проводах, называются линейными, а в нагрузках фаз — фазными.

Поскольку в нулевом проводе ток равен нулю, то этот провод можно совсем убрать, оставив только три линейных провода. Однако это не всегда возможно. В случае несимметричной нагрузки отсутствие нулевого провода приведет к перераспределению фазных напряжений, в результате чего некоторые из них станут выше номинального (что недопустимо), а некоторые — ниже. Если же при несимметричной нагрузке включить нулевой провод, то все фазные напряжения будут равны номинальному, а по нулевому проводу будет протекать некоторый ток. В цепях с симметричными нагрузками нулевой провод не нужен. Однако наличие нулевого провода обеспечивает равенство фазных напряжений при несимметричной нагрузке.

В дальнейшем для обозначения линейных напряжений будем пользоваться двойными индексами, а фазных — одинарными (рис. 6.5).

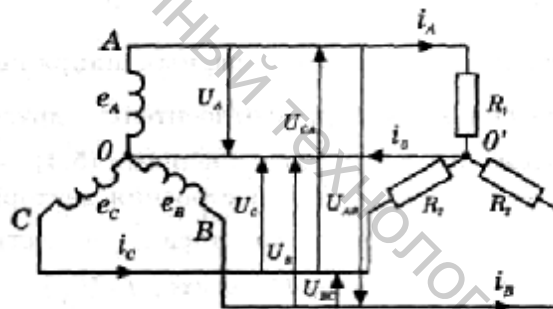


Рисунок 6.5 – Соединение обмоток генератора и нагрузки звездой

При соединении звездой линейный ток совпадает с фазным. Как видно из рис. 6.5, линейные напряжения при соединении звездой являются векторными разностями соответствующих фазных напряжений:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B; \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C; \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A.\end{aligned}\tag{6.4}$$

6.2 Соединение треугольником

Если обмотки генератора трехфазного тока соединить так, что конец первой обмотки соединяется с началом второй, конец второй с началом третьей, конец третьей с началом первой, а к общим точкам подключить линейные провода, то получим соединение треугольником (рис. 6.6).

Кажущегося короткого замыкания в обмотках генератора не произойдет, так как сумма мгновенных значений ЭДС в них равна нулю:

$$\dot{e}_A + \dot{e}_B + \dot{e}_C = 0, \quad (6.5)$$

На рис. 6.6 три приемника тока включены треугольником, в отличие от соединения звездой, где в большинстве случаев применяется четырехпроводная система.

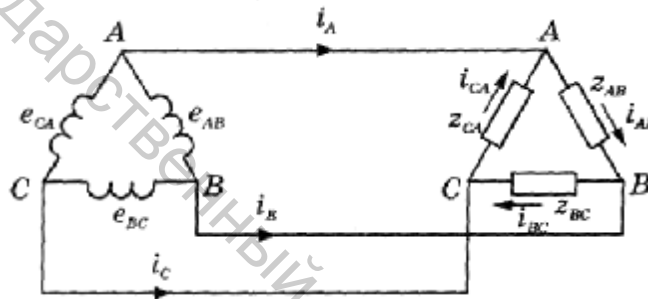


Рисунок 6. 6 – Соединение треугольником

При соединении треугольником существуют только линейные напряжения (U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}), поскольку нулевой провод отсутствует, но появляются фазные (I_{AB}, I_{BC}, I_{CA}) линейные (I_A, I_B, I_C), токи. Соотношения между линейными и фазными токами могут быть получены, если для каждой узловой точки потребителя применить первое правило Кирхгофа. Любой из линейных токов равен геометрической разности двух фазных токов. Кроме того, сложение этих равенств показывает, что геометрическая сумма линейных токов равна нулю:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0. \quad (6.6)$$

Приемники, включаемые в трехфазную цепь, могут быть как однофазными, так и трехфазными.

С и м м е т р и ч н ы м и называют приемники, комплексы сопротивлений фаз которых равны между собой: $Z_a = Z_b = Z_c = \text{const}$. Если это условие не выполняется, то приемники называют н е с и м м е т р и ч н ы м и ; при этом нагрузка может быть р а в - н о м е р н о й , если $z_a = z_b = z_c$, или о д н о р о д н о й , если равны сдвиги фаз. Фазы приемников также могут соединяться как звездой, так и треугольником. Важно отметить, что способ соединения фаз источника питания не предопределяет способа соеди-

нения фаз приемника. Так как каждая фаза реальной симметричной трехфазной цепи составляется из одинаковых элементов, то (в инженерной практике) такие цепи часто изображают однолинейными (рис. 6.7). На такой схеме указывают величины, характеризующие только одну фазу.

В трехпроводную цепь при соединении нагрузки звездой включают только симметричные трехфазные приемники: электрические двигатели, электрические печи и др.

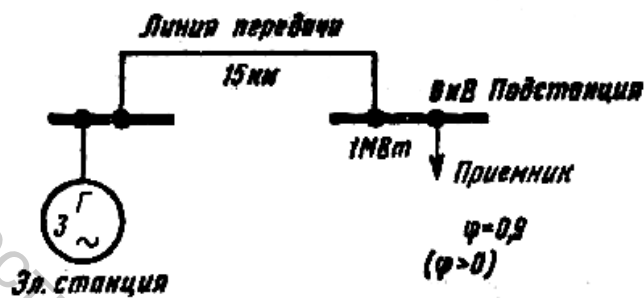


Рисунок 6.7 – Симметричная трехфазная цепь, изображается однолинейной

На рис. 6.8 показана схема четырехпроводной осветительной сети жилого дома при соединении фаз нагрузки звездой.

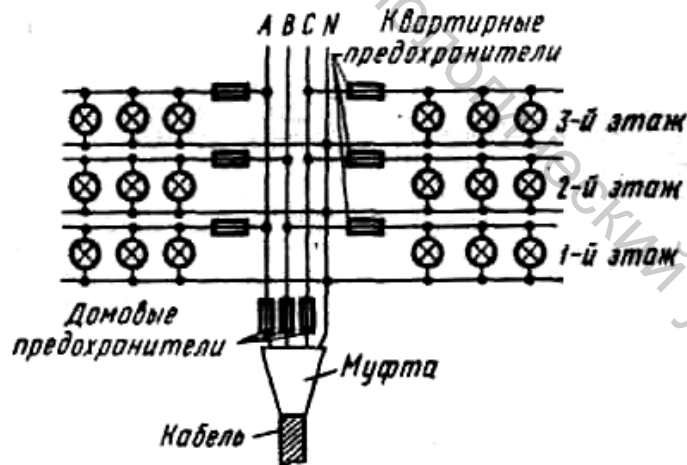


Рисунок 6.8 – Четырехпроводная осветительная сеть жилого дома

Нейтральный провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника при несимметричной нагрузке. Поэтому в четырехпроводную сеть включают однофазные приемники (например, лампы накаливания), и режим работы каждого такого приемника, находящегося под неизменным фазным напряжением источни-

ка питания, не будет зависеть от режима работы приемников, включенных в другие фазы.

Ток в нейтральном проводе зависит не только от характера сопротивлений фаз приемника, но и от схемы их включения.

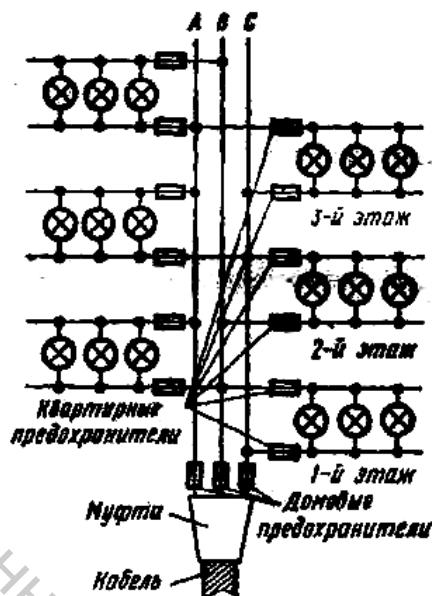


Рисунок 6.9 – Схема трехпроводной осветительной сети при соединении фаз нагрузки треугольником

Что касается симметричных трехфазных приемников, то их можно включать в трехпроводную цепь либо звездой, либо треугольником — это значительно расширяет область применения таких приемников.

На щитках многих трехфазных электродвигателей указывают два напряжения (например, 380/220) и помещают шесть выводов: если линейное напряжение сети $U_3 = 380$ В, то двигатель включают звездой. Номинальное напряжение большинства потребителей колеблется в пределах от 127 до 500 В; мощные электродвигатели работают при напряжении 3 и 6 кВ. Таким образом, возникает необходимость создания ряда понизительных станций, на которых происходит неоднократное трансформирование напряжения. Трансформаторы, используемые в сетях распределения электроэнергии, называются силовыми; они имеют номинальную мощность от нескольких единиц до нескольких сотен тысяч киловольт-ампер.

Трансформаторы применяются также в качестве элементов измерительных устройств (измерительные трансформаторы), электротермических устройств (печные трансформаторы) в электросварке (сварочные трансформаторы) и т. п.

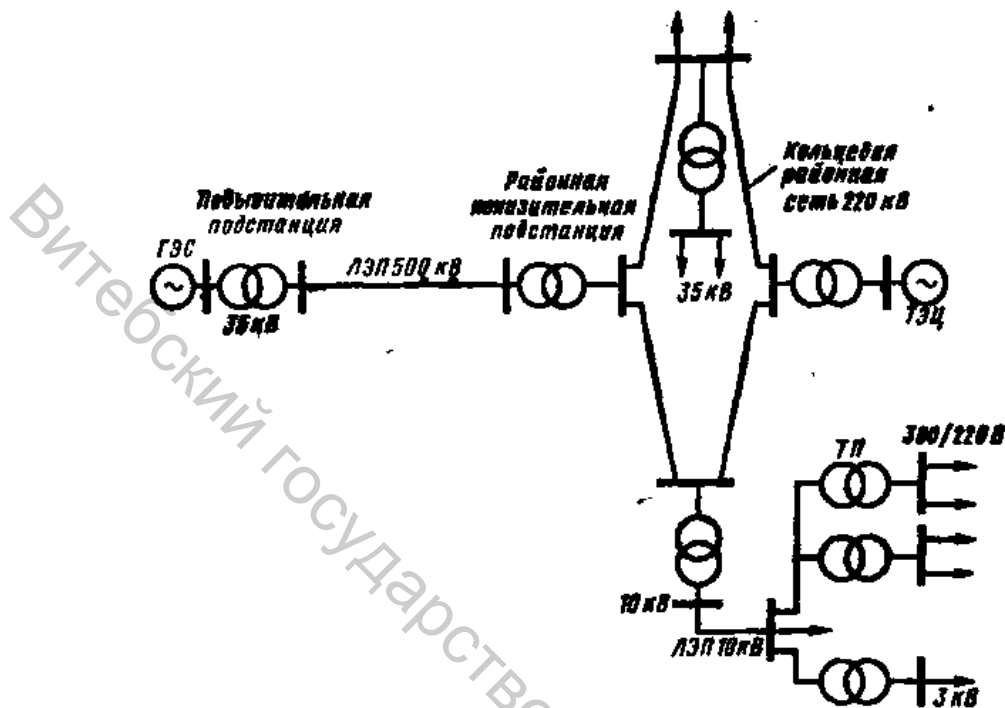


Рисунок 4.10 – Районная электрическая сеть

В устройствах промышленной электроники применяются силовые трансформаторы малой мощности (10 – 300 ВА) с несколькими вторичными обмотками, предназначенными для питания.

7 Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

Асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором является наиболее распространенным типом электрического двигателя (рис.7.1). Он относительно небольшой стоимости, надежен в работе. Двигатель преобразует энергию переменного синусоидального тока в механическую энергию [4,10,12].

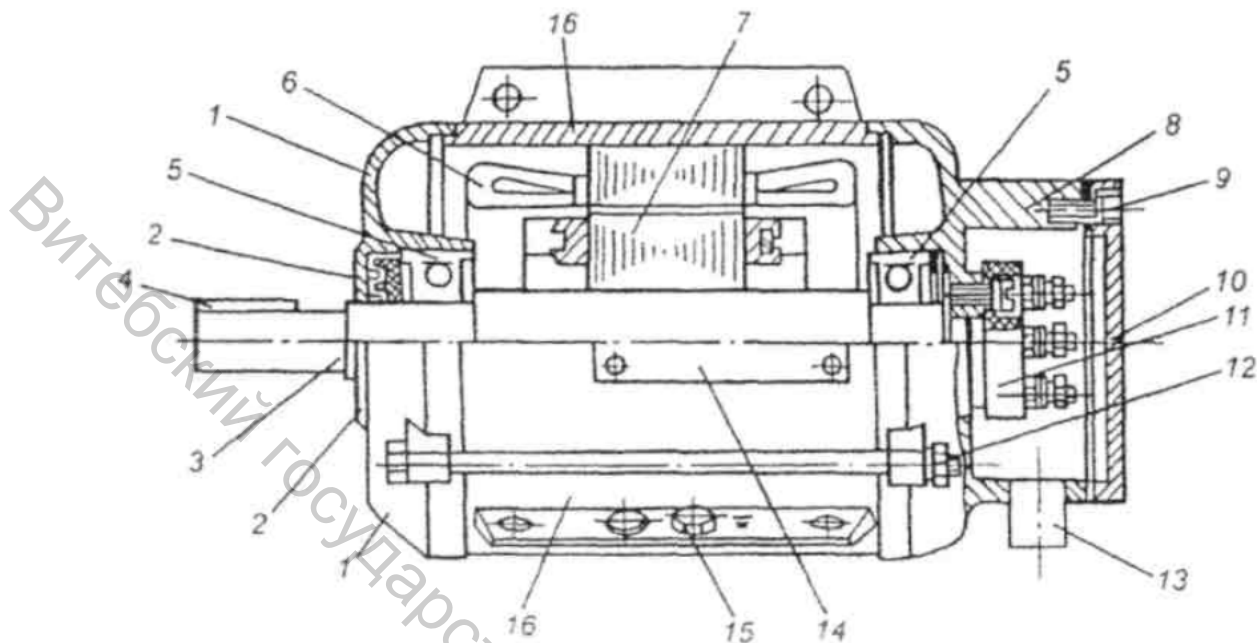


Рисунок 7.1 – Асинхронный двигатель
с короткозамкнутым ротором:

1 – щит подшипниковый передний; 2 – крышка защитная; 3 – вал; 4 – шпонка; 5 – подшипник; 6 – статор; 7 – ротор; 8 – щит подшипниковый задний; 9 – болт; 10 – крышка блока зажимов; 11 – блок зажимов; 12 – болт стяжной; 13 – патрубок; 14 – табличка; 15 – болт заземления; 16 – станина

Статор состоит из стального, чугунного или алюминиевого корпуса, внутри которого находится полый цилиндр, называемый сердечником статора. Сердечник статора набирается из отдельных тонких пластин электротехнической стали, изолированных друг от друга с помощью лака для уменьшения потерь от вихревых токов. В пазах сердечника статора помещается обмотка из медного или алюминиевого изолированного провода. В простейшем случае обмотка статора состоит из трех катушек (фаз), которые смещены в пространстве друг относительно друга на 120° .

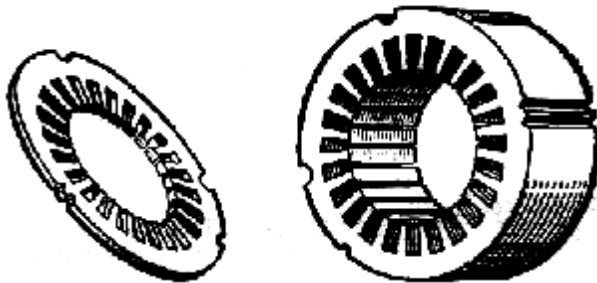


Рисунок 7.2. – Пакет статора и штампованный лист

Пакет статора с обмоткой запрессован в алюминиевый или чугунный корпус-оболочку, неподвижно закрепляемый при установке машины на фундаментной плите. С корпусом прочно соединены два боковых литых щита со сквозными центральными отверстиями для подшипников, в которых вращается вал ротора.

Начала и концы фаз обмотки статора присоединены к зажимам, расположенным в коробке выводов, укрепленной на корпусе. Большинство машин имеет коробку выводов с шестью зажимами, что позволяет соединять фазы обмотки треугольником или звездой.

Часть трехфазных асинхронных машин снабжена коробкой выводов с тремя зажимами. Соответствующие соединения фаз обмотки статора сделаны внутри этих машин. Они рассчитаны на включение обмотки в сеть с линейным напряжением, указанным в качестве номинального на паспортном щитке.

Конструктивные элементы ротора. Роторы трехфазных асинхронных машин состоят из пакета магнитопровода цилиндрической формы, набранного из тонких стальных дисков с пазами, и обмотки, расположенной в этих пазах. Пакет магнитопровода с обмоткой насажен на вал. Пакет ротора отделен от пакета статора небольшим равномерным зазором.

В пазы пакета ротора вставляют медные стержни, лишенные изоляции, а все концы стержней на обоих торцах пакета замыкают накоротко при помощи двух медных колец (рис. 7.3 а). Такие медные стержни и кольца применяют в современных асинхронных машинах мощностью более 100 кВт (рис. 7.3 б).

Ротор представляет собой цилиндр, находящийся на валу двигателя и набранный из тонких листов электротехнической стали. В пазах или отверстиях сердечника ротора помещается обмотка ротора. В зависимости от конструкции обмотки АД делятся на два вида: с короткозамкнутым и фазным роторами. Наиболее просты, надежны в работе и широко распространены двигатели с короткозамкнутой обмоткой ротора.

Принцип действия АД базируется на использовании вращающегося магнитного поля, которое создается тремя катушками, смещенными в пространстве, при питании их трехфазным током, т.е. тремя синусоидальными токами сдвинутыми во времени на треть периода. В данном случае вращающееся поле будет иметь два полюса, двигатель называется двухполюсным. За один период тока T это поле совершает один оборот. Т.е. частота вращения магнитного поля будет равна

$$n_1 = \frac{1}{T} \cdot 60 = 60 f_1, \text{ об/мин,}$$

где f_1 – частота тока.

Для изготовления двигателей с меньшими частотами вращения магнитного поля каждая фаза обмотки статора выполняется в виде нескольких катушек, кото-

рые располагаются так, чтобы магнитное поле имело p пар полюсов. Тогда частота вращения магнитного поля, называемая синхронной, будет равна

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \text{ об/мин.}$$

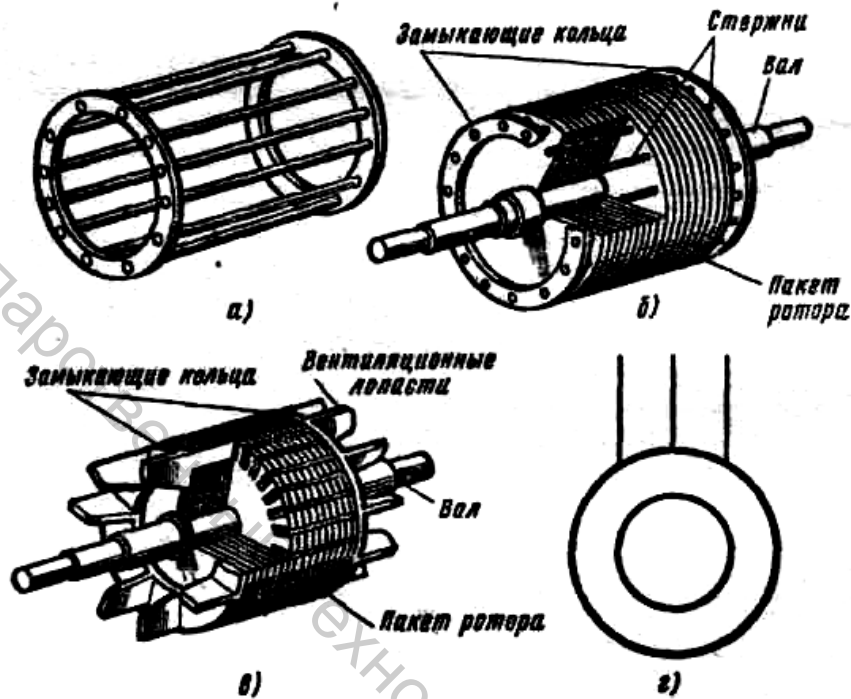


Рисунок 7.3 – Короткозамкнутый ротор:

а — «белочья клетка»; б — медная стержневая клетка; в — алюминиевая литая клетка; г — стандартный символ асинхронной машины с короткозамкнутым ротором

При частоте тока $f_1 = 50$ Гц и разным значением полюсов p будут соответствовать различные синхронные частоты вращения.

Таким образом, при подключении обмотки статора к сети трехфазного тока в двигателе создается вращающееся магнитное поле, которое возбуждает в проводниках неподвижного ротора ЭДС. Поэтому в обмотке ротора возникает ток, который, взаимодействуя с магнитным полем, создает вращающий момент M , приводящий ротор в движение в направлении вращения поля. По мере разгона ротора частота его вращения n будет приближаться к синхронной n_1 . Поэтому скорость движения поля по отношению к проводникам обмотки ротора будет уменьшаться. Это обусловит уменьшение ЭДС и тока в обмотке, а следовательно, M . При неко-

торой частоте вращения n , близкой к n_1 , наступит равновесие между вращающим моментом АД и моментом сопротивления M_c , который создается рабочей машиной

$$M = M_c.$$

Разгон двигателя прекратится, и он будет вращаться с частотой $n < n_1$. При $n = n_1$ ЭДС и ток в обмотках ротора будут отсутствовать, и $M = 0$. Т.е. ротор вращается не синхронно с магнитным полем, и поэтому двигатель называется асинхронным. Степень отставания ротора от магнитного поля характеризуют величиной, которая называется скольжением:

$$s = \frac{n_1 - n}{n}. \quad (7.1)$$

При холостом ходе двигателя, когда величина M_c очень мала, $n \gg n_1$ и $s \gg 0$. С увеличением M_c скольжение возрастет, и при номинальной нагрузке достигает значений $s_{ном} = 0,02 - 0,08$. При пуске, когда $n = 0$, $s = 1$.

Зависимость вращающего момента от скольжения $M(s)$ показана на рис. 7.4

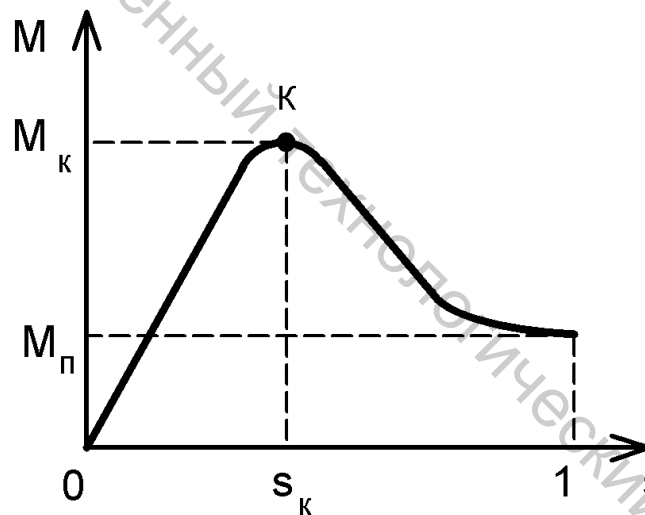


Рисунок 7.4 – Зависимость вращающего момента от скольжения

С ростом s вращающий момент возрастает в точке K (рисунок 7.4), достигает максимума, точка называется критической, а все величины, относящиеся к ней, – критическими: M_k – критический момент, s_k – критическое скольжение. У АД критический момент превышает значение номинального момента $M_{ном}$ в 1,7, 2,2 раз. При $s > s_k$ момент уменьшается, достигая в момент пуска ($s = 1$) значения $M_n = (1,1, 1,5)M_{ном}$.

Основной характеристикой АД является механическая характеристика, выражающая зависимость $n(M)$ (рис 7.5). Из формулы (7.1) следует:

$$n = n_1(1 - s) \quad (7.2)$$

При пуске двигателя ($n = 0, s = 1$) Э.Д.С. в обмотке ротора достигает максимальной величины, и поэтому пусковой ток значительно превышает ток в номинальном режиме ($I_n = (5, 7)I_{ном}$).

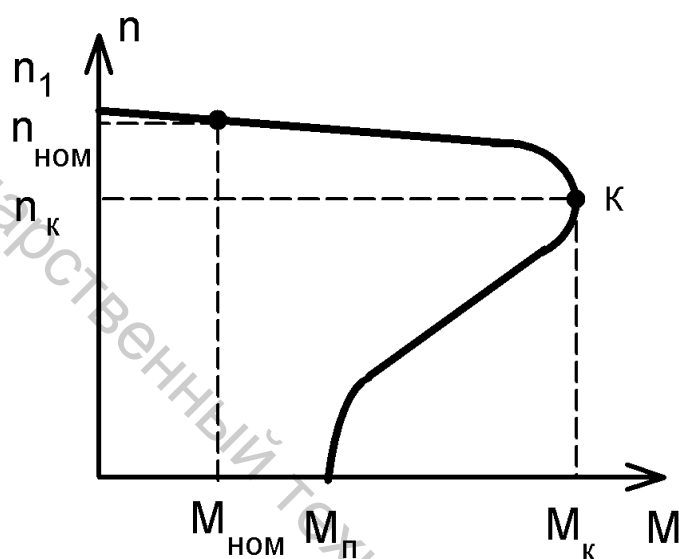


Рисунок 7.5 – Механическая характеристика

Эксплуатационные свойства асинхронного двигателя определяются рабочими характеристиками (рис.7.6), которые представляют собой зависимость основных величин АД от полезной механической мощности P на валу:

$$n(P), s(P), M(P), I_1(P), \cos j(P), h(P),$$

где I_1 – ток, потребляемый из сети; $\cos j$ – коэффициент мощности двигателя; h – КПД двигателя.

Из рис.7.6 можно сделать вывод, что при нагрузке, равной номинальной мощности двигателя $P_{ном}$, обеспечивается работа при высоких h и $\cos j$. При недостаточной нагрузке двигателя эти величины значительно уменьшаются, что увеличивает потери электроэнергии при работе двигателя.

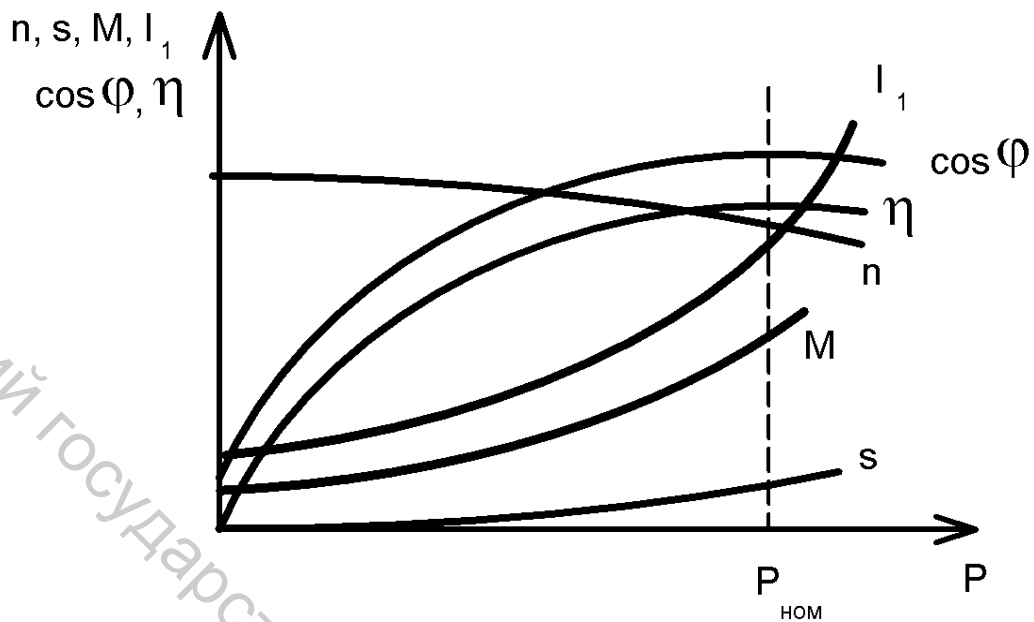


Рисунок 7.6 – Рабочие характеристики

Расчетные величины:

$P_1 = 3P_{1\phi}$ – активная мощность, потребляемая АД из сети, а $P_{1\phi}$ – мощность, потребляемая одной фазой двигателя и измеряемая с помощью ваттметра;

$P_2 = U_2 I_2$ – мощность, потребляемая нагрузкой генератора;

$P = 0,5(P_1 + P_2)$ – мощность на валу АД, которая определяется приближенно, исходя из равенства потерь в двигателе и генераторе;

$M = 9,55 \frac{P}{n}$ – вращающий момент двигателя;

$h = \frac{P}{P_1}$ – КПД двигателя;

$\cos j = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_1 I_1}$ – коэффициент мощности АД;

$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$ – скольжение, а n_1 – частота вращения магнитного поля, равна

1500 об/мин.

8 Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением

Двигатель постоянного тока (ДПТ) преобразует энергию постоянного тока в механическую энергию. Он состоит из неподвижной части – статора и вращаю-

щейся – якоря. Статор имеет станину в виде отрезка стальной трубы, на внутренней поверхности которой установлены главные полюсы. Они имеют обмотку возбуждения и служат для создания в двигателе магнитного поля. Якорь состоит из цилиндрического сердечника, который крепится на валу ДПТ. Сердечник набирается из листовой электротехнической стали, на внешней поверхности выполнены пазы. В пазы укладывается обмотка якоря, которая состоит из отдельных секций. Концы секций припаиваются к медным пластинам коллектора, которые уложены на цилиндр и изолированы друг от друга. К коллектору прижимаются подпружиненные щетки [4,12].

В зависимости от способа включения обмоток ДПТ разделяют: двигатели независимого возбуждения; двигатели последовательного возбуждения; двигатели параллельного возбуждения.

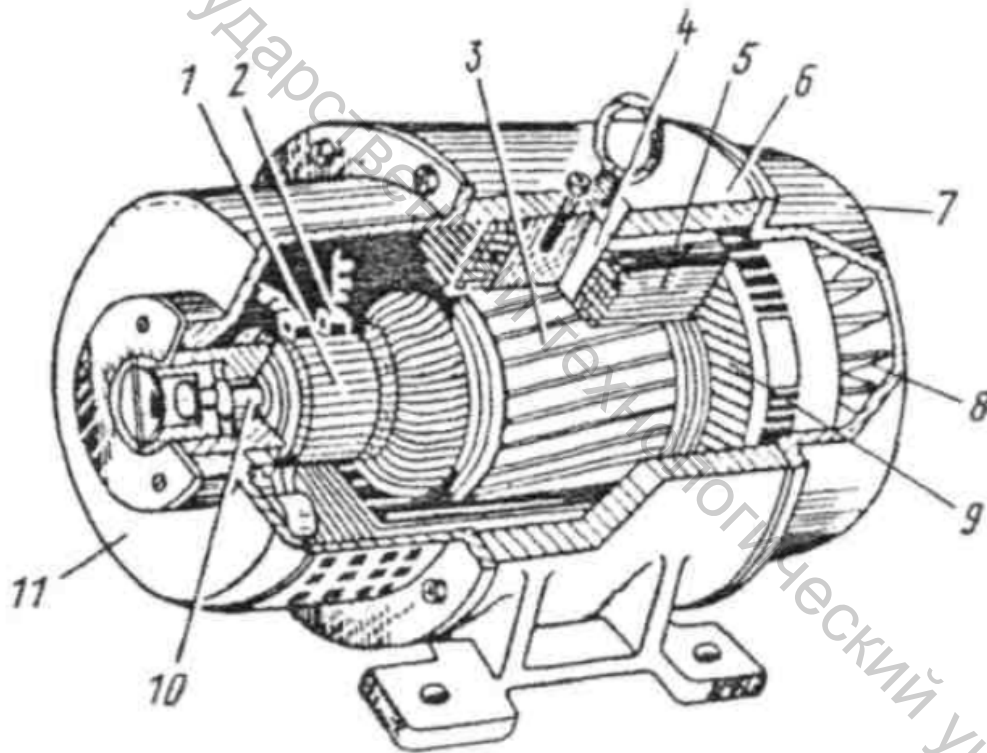


Рисунок 8.1 – Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением:

1 – коллектор; 2 – щетки; 3 – сердечник якоря; 4 – сердечник главного полюса; 5 – катушка обмотки возбуждения; 6 – корпус; 7 – щит задний подшипниковый; 8 – вентилятор; 9 – обмотка якоря; 10 – вал; 11 – щит подшипниковый передний

На рис. 8.2 приведена схема включения наиболее часто используемого в технологическом оборудовании двигателя независимого возбуждения. Он питается от двух источников, что позволяет независимо изменять напряжения на обеих обмотках.

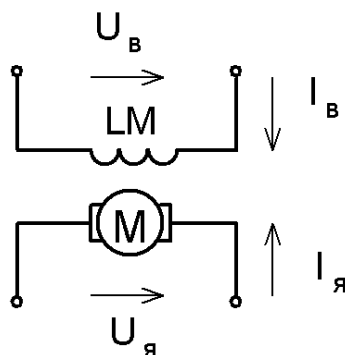


Рисунок 8.2 – Схема включения двигателя независимого возбуждения

При протекании тока возбуждения I_B в обмотке возбуждения LM в двигателе между полюсами создается магнитное поле с потоком Φ . При подаче на щетки двигателя напряжения $U_я$ в обмотке якоря M появится $I_я$ и возникнет вращающий момент:

$$M = K\Phi I_я, \quad (8.1)$$

где K – постоянная двигателя, зависящая от его конструктивных данных.

Якорь двигателя придет в движение, и проводники обмотки якоря будут перемещаться в магнитном потоке Φ . Поэтому в обмотке якоря возникнет ЭДС, которая направлена навстречу току и равна:

$$E = K\Phi\omega, \quad (8.2)$$

где ω – угловая скорость двигателя.

Напряжение $U_я$ будет равно сумме этой противо-ЭДС E и падению напряжения на сопротивлении якорной цепи $R_я$:

$$U_я = E + R_я I_я, \quad (8.3)$$

Из выражения (8.3), (8.2) следует, что

$$I_я = \frac{U_я - K\Phi\omega}{R_я}. \quad (8.4)$$

По мере разгона двигателя $I_я$ и M уменьшаются. Поэтому, когда наступит равновесие между M и моментом сопротивления нагрузки M_C , изменение скорости прекратится. Как следует из выражения (8.3), она будет равна:

$$w = \frac{U_{\text{я}}}{K\Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{K\Phi} I_{\text{я}}, \quad (8.5)$$

Выражение (8.5) определяет зависимость $w(I_{\text{я}})$, которая получила название электромеханической характеристики двигателя.

Находя ток $I_{\text{я}}$ из (8.1) и поставляя в (8.5), получаем

$$w = \frac{U_{\text{я}}}{K\Phi} - \frac{R_z}{(K\Phi)^2} M, \quad (8.6)$$

Зависимость $w(M)$ называется механической характеристикой двигателя. Из выражений (8.5) и (8.6) следует, что угловую скорость двигателя можно регулировать следующими методами:

- изменением величины напряжения $U_{\text{я}}$ на обмотке якоря;
- изменением магнитного потока Φ , что можно обеспечить изменением тока $I_{\text{в}}$ в обмотке возбуждения;
- включением дополнительного реостата в цепь обмотки якоря (реостатное регулирование).

В первом случае механическая и электромеханическая характеристики при разных значениях $U_{\text{я}}$ и $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$ как следует из выражений (8.5), (8.6), будут иметь одинаковый вид. Они представлены на рис. 8.3.

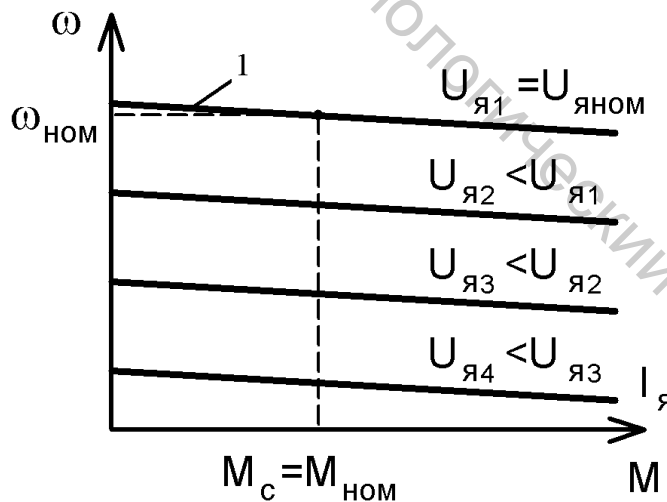


Рисунок 8.3 – Графики механических и электромеханических характеристик

Автоматическое управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Аппараты ручного управления (выключатели, рубильники, пакетные пе-

реключатели, кнопки и др.) служат для включения и отключения электрических цепей. Включение и отключение аппаратов ручного управления осуществляется путем воздействия на рычаги с установленными на них подвижными контактами, с помощью которых происходит замыкание или размыкание (коммутация) цепи [3, 4, 7].

При автоматическом управлении электродвигателем переключения в цепи производят аппаратами, контакты которых приводятся в действие усилием тяги электромагнитов.

К аппаратам, обеспечивающим автоматическое управление двигателями, относятся контакторы. Контактор – электромагнитный аппарат, который служит для коммутаций в силовых цепях электродвигателей, где протекают большие токи. Он состоит из неподвижного сердечника с катушкой и подвижного якоря. Имеет главные и вспомогательные контакты. Главные контакты служат для переключений в силовых, а вспомогательные (блок-контакты) – для переключений в цепях управления. При подаче на катушку контактора напряжения контактор срабатывает – якорь притягивается к сердечнику, главные контакты замыкаются и присоединяют двигатель к сети. Одновременно с главными происходит переключение и вспомогательных контактов, одни из которых замыкаются, а другие размыкаются. Контакты, которые при этом замыкаются, называются замыкающимися или нормально разомкнутыми. Контакты, которые замыкаются, – размыкающимися или нормально замкнутыми.

Если катушка контактора отключается от питающей сети, или напряжение на катушке становится меньше половины номинальной величины, то якорь под влиянием силы тяжести или пружин возвращается в исходное состояние. Нормально разомкнутые контакты размыкаются, а нормально замкнутые контакты замыкаются, якорь двигателя останавливается.

Управление контактором выполняют с помощью двух кнопок: одна – «Пуск» – имеет замыкающий контакт, другая – «Стоп» имеет размыкающий контакт. Обе кнопки имеют автоматический возврат в исходное положение после их нажатия благодаря возвратным пружинам.

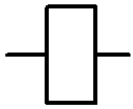
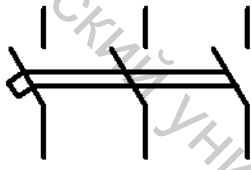
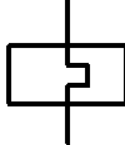
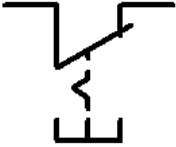
Для защиты двигателя от коротких замыканий в цепь питания включают плавкие предохранители или автоматический выключатель, называемый автоматом. Повторное включение автомата после срабатывания производится нажатием кнопки.

Для защиты двигателей от токов перегрузок применяют тепловые реле или автоматы с тепловыми расцепителями. Основным элементом этого расцепителя и теплового реле является биметаллическая пластина, охваченная спиралью, по которой протекает ток двигателя. Если ток длительно превышает номинальное значение, пластинка от нагрева изгибается и механически воздействует на устройство, размыкающее электрическую цепь. Выпускаются автоматы, которые одновре-

менно защищают от коротких замыканий (максимальная защита) и от перегрузок (тепловая защита).

Аппараты управления и защиты состоят из однотипных элементов: катушек, контактов и т.д. Для элементов установлены условные графические обозначения. Некоторые из них приведены в таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Условные графические обозначения катушек и контактов

Наименование элемента	Обозначение
1	2
Катушка электромеханического устройства (контактора, реле).	
Контакты коммутирующего устройства	
а) замыкающие	
б) размыкающие	
в) замыкающий в силовой цепи	
Выключатель кнопочный нажимной	
а) с замыкающим контактом	
б) с размыкающим контактом	
Выключатель трехполюсный с автоматическим отключением	
Нагреватель теплового реле	
Контакт теплового реле с возвратом посредством нажатия кнопки.	

Элементы аппарата могут находиться в разных частях схемы, буквенные обозначения всех элементов одного аппарата должны быть одинаковыми. При этом контакторы обозначаются буквами *КМ*, тепловое реле – *КК*, кнопки – *SB*, автоматы – *QF*.

На принципиальной схеме все контакты аппаратов и кнопок принято изображать в том состоянии, в котором они находятся при отсутствии электромагнитного или механического воздействия.

На рис.8.4 представлена принципиальная схема управления асинхронным короткозамкнутым двигателем с помощью контактора, позволяющая производить включение и отключение двигателя.

Работает схема следующим образом. При включении автомата *QF* кратковременным нажатием кнопки *SB2* (Пуск) получает питание катушка контактора *КМ*. Контактор срабатывает, и три его силовых контакта подключают обмотку статора к сети, двигатель начинает вращаться. Одновременно блок-контакт *КМ* шунтирует кнопку *SB2*, предотвращая размыкание цепи при опущенной кнопке.

Остановка электродвигателя осуществляется кратковременным нажатием кнопки *SB2* (Стоп), что приводит к отключению катушки контактора. При этом все контакты *КМ* размыкаются, двигатель теряет питание и останавливается.

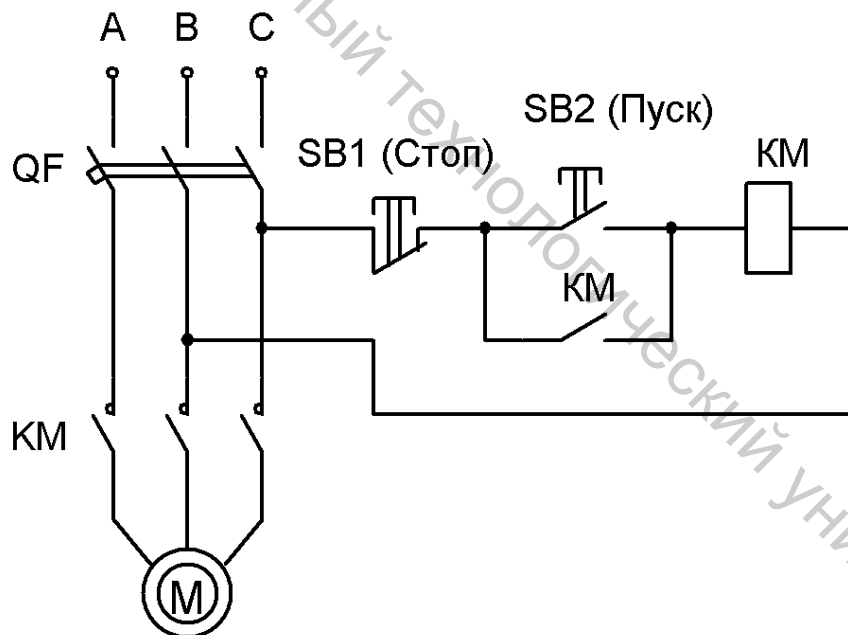


Рисунок 8.4 – Схема управления асинхронным короткозамкнутым двигателем с помощью контактора

Схема обеспечивает максимальную (от коротких замыканий), тепловую (от длительных, но небольших перегрузок двигателя) и нулевую защиты. Максимальная и тепловая защиты обеспечиваются автоматом *QF*. Нулевая защита обеспечи-

вается схемным решением. При наличии этой защиты невозможен самопроизвольный пуск электродвигателя при случайном исчезновении и возникновении напряжения на обмотке статора двигателя. Если напряжение в сети исчезнет, то вал двигателя остановится, а контакты *КМ* разомкнутся. При повторном появлении напряжения контактор не сработает, т.к. кнопка *SB2* и контакт *КМ* разомкнуты.

Используемую для пуска двигателя совокупность контактора, кнопок управления и тепловых реле (если они применяются) называют магнитным пускателем. В данном случае пускатель обеспечивает включение двигателя для работы только в одном направлении, поэтому он называется нереверсивным.

Если необходимо включение двигателя в двух направлениях, то используют реверсивный магнитный пускатель. Схемы электропривода с таким пускателем представлены на рис. 8.5.

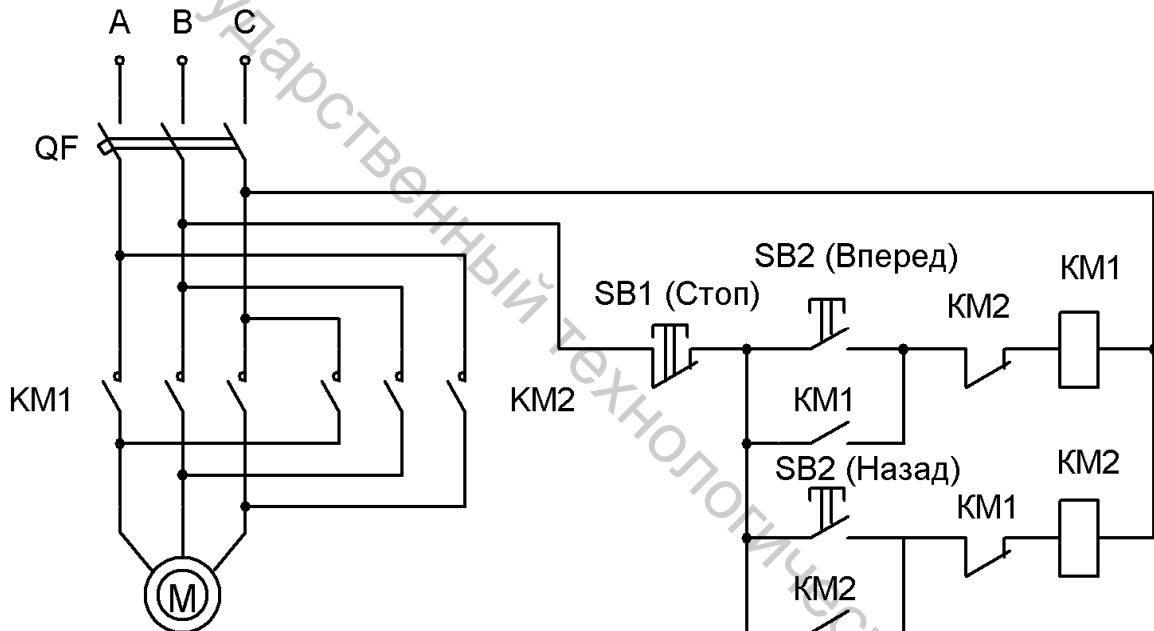


Рисунок 8.5 – Схемы электропривода с реверсивным магнитным пускателем

В этой схеме для каждого направления вращения используется отдельный контактор: КМ1 – «вперед», а КМ2 – «назад». При включении электродвигателя нажимается кнопка *SB2* (вперед), срабатывает контактор КМ1. Провода сети подключаются к двигателю в порядке А, В, С и вал двигателя будет вращаться. Если при пуске нажать кнопку *SB3* (назад), то двигатель тоже подключится к сети, но с другим порядком фаз С, В, А. Поэтому магнитное поле и ротор двигателя будет вращаться в другом направлении.

При одновременной работе контакторов КМ1 и КМ2 фазы А, В, С оказываются соединенными накоротко, в схеме возникнет аварийный режим короткого замыкания. Чтобы этот режим исключить, в схеме предусмотрены два размыкаю-

щих контакта КМ1 и КМ2. При работе двигателя «вперед» контакт КМ1 в цепи катушки контактора КМ2 разомкнут. По этой причине при нажатии кнопки SB3 (назад) контактор КМ2 не сработает, и двигатель будет вращаться в прежнем направлении.

Для изменения направления вращения сначала отключают двигатель нажатием кнопки SB1 (стоп), а затем нажимают кнопку SB3 (назад).

9. Электротехническое оборудование

9.1 Условные обозначения

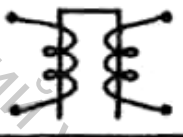
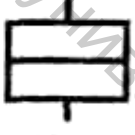
Электрооборудование классифицируется в зависимости от рода тока, условное обозначение которого наносится на оборудование.

Таблица 9.1 – Условные обозначения указывающие род тока

Род тока	Условное обозначение
Постоянный	
Переменный (однофазная система)	
Постоянный и переменный	
Трёхфазная система (общее обозначение)	
Трёхфазная система (при несимметричной нагрузке фаз)	

Электроизмерительные приборы классифицируются по физическому принципу действия измерительного механизма прибора, т.е. по способу преобразования электрической энергии в механическое воздействие подвижной части прибора.

Таблица 9.2 – Условные обозначения, указывающие тип прибора

Тип прибора	Условное обозначение
Магнитоэлектрический с подвижной рамкой	
Магнитоэлектрический логометр с подвижными рамками	
Магнитоэлектрический с подвижным магнитом	
Электромагнитный	
Электромагнитный логометр	
Электродинамический	

Продолжение таблицы 9.2

Тип прибора	Условное обозначение
Электродинамический логометр	
Ферродинамический	
Ферродинамический логометр	
Индукционный	
Электростатический	
Вибрационный (язычковый)	
Термоэлектрический	
Термоэлектрический с магнитоэлектрическим измерительным механизмом	
Выпрямительный с магнитоэлектрическим измерительным механизмом	

9.2 Устройство счетчика индукционной системы

Однофазный индукционный счетчик электрической энергии

Принцип действия индукционных приборов основан на взаимодействии переменного магнитного поля с вихревыми токами, индуцируемыми этим же полем в проводящем подвижном диске или цилиндре. Индукционные приборы пригодны для переменных токов, так как ток в диске или цилиндре может индуцироваться только действием переменного магнитного потока. В настоящее время промышленность выпускает только индукционные счетчики электрической энергии.

Индукционный счетчик имеет две катушки с сердечниками: токовую катушку и катушку напряжения. Переменное магнитное поле создается двумя магнитными потоками Φ_1 и Φ_2 , сдвинутыми на некоторый угол по фазе в пространстве. При этом осуществляется взаимодействие потоков с другими индукционными токами.

Токовую катушку (рис. 9.1) навивают толстым проводом на стальной сердечник и включают последовательно с нагрузкой. Магнитный поток Φ_1 в ней пропорционален току нагрузки.

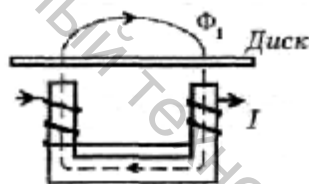


Рисунок 9.1 – Токовая катушка

Катушку напряжения (рис. 9.2) навивают большим числом витков тонкого провода на стальной сердечник. Индуктивное сопротивление этого электромагнита намного больше активного, поэтому данную цепь можно считать чисто индуктивной (ток в катушке напряжения отстает по фазе на $\pi/2$).

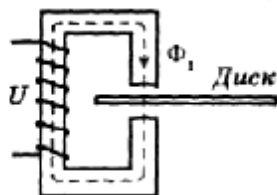


Рисунок 9.2 – Катушка напряжения

Таким образом, счетчик состоит из двух электромагнитов и подвижного алюминиевого диска. Схематически устройство индукционного однофазного счетчика показано на рис. 9.2. Легкий алюминиевый диск Д укреплен на оси, которая

вязана с помощью червячной передачи со счетным механизмом и вращается в зазоре электромагнитов. Магнитный поток Φ_1 электромагнита г-образной формы (рис. 8.1) создается током приемника электрической энергии, так как его обмотка включена последовательно в цепь нагрузки. Можно считать, что поток Φ_1 пропорционален току: $\Phi_1 \sim I$.

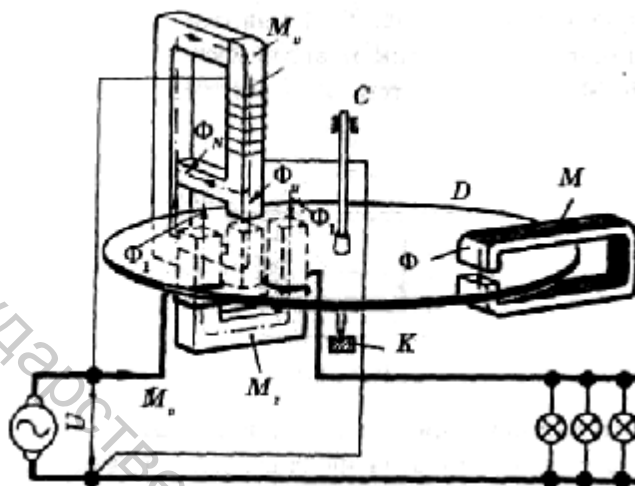


Рисунок 9.3 – Схема счетчика индукционной системы

На втором электромагните (рис. 9.3) расположена обмотка, включенная параллельно приемнику электрической энергии, ток в ней пропорционален напряжению сети U . Обмотка состоит из большого числа витков тонкого провода и создает магнитный поток Φ_2 , значение которого пропорционально U : $\Phi_2 \sim U$. Индуктивное сопротивление этого электромагнита несравненно больше активного, поэтому можно считать, что ток в его обмотке сдвинут по фазе от напряжения на $\pi/2$. Таким образом, магнитные потоки, сдвинутые по фазе и в пространстве, образуют «бегущее» магнитное поле, пересекающее диск.

Вихревые токи, индуцируемые в диске магнитными потоками, пропорциональны им: $I_{e1} \sim \Phi_1$ и $I_{e2} \sim \Phi_2$. Среднее за период значение электромагнитной силы, возникающей при взаимодействии магнитного поля и вихревого тока и действующей на диск, определяется формулой $F = \Phi I \cos \gamma$, где γ — угол сдвига по фазе между потоком Φ и током I . По этой формуле видно, что взаимодействие между индуцированным током в диске и созданным им магнитным полем не создает электромагнитной силы, так как $\gamma = 0$. Электромагнитные силы появляются только в результате взаимодействия магнитного потока Φ_1 с током I_{e2} и потока Φ_2 с током I_{e1} и создают вращающий момент.

Под действием этого вращающего момента диск пришел бы в ускоренное вращение, и число оборотов не соответствовало бы израсходованной электрической энергии. Поэтому необходимо наличие противодействующего момента.

Противодействующий момент создается постоянным магнитом, в поле которого вращается диск, и является тормозным моментом, пропорциональным частоте вращения диска. Когда моменты равны, частота вращения диска постоянна (установившийся режим), и число оборотов диска пропорционально расходу электроэнергии.

Индукционные счетчики обладают слабой чувствительностью к внешним магнитным полям и изменениям температуры окружающей среды и хорошо выдерживают перегрузки.

Однако они очень чувствительны к изменению частоты переменного тока в сети, поэтому предназначены для работы только на определенной частоте (обычно 50 Гц). На рисунке 9.4 представлено конструктивное исполнение счетчика электрической энергии индукционной системы.

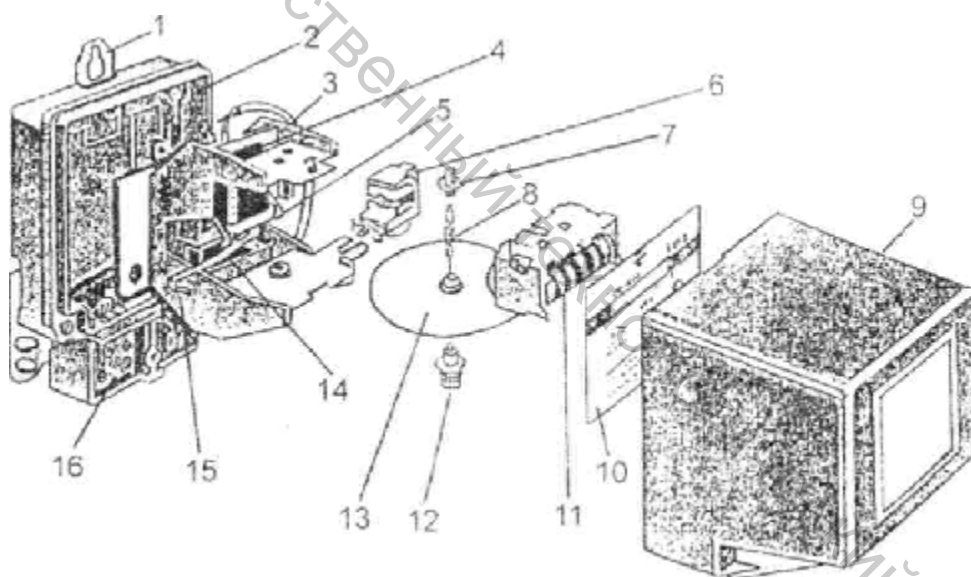


Рисунок 9.4 – Конструктивное исполнение счетчика:

1 – подвес; 2 – основание; 3 – несущая стойка; 4 – регулятор узла фазового сдвига; 5 – сердечник с токовой катушкой; 6 – тормозная система с двумя постоянными магнитами; 7 – опора диска верхняя; 8 – винт червячной передачи; 9 – защитная крышка; 10 – щиток приборный; 11 – счетный механизм; 12 – подшипник нижней опоры; 13 – алюминиевый диск; 14 – сердечник с катушкой напряжения; 15 – регулятор малой нагрузки; 16 – блок токоподводящих контактов.

На приборной панели электрического счетчика нанесены обозначения: логотип завода-изготовителя, знак сертификата качества, номинальный ток, максимально допустимый ток, класс точности прибора, частота переменного тока,

напряжение сети, тип счетчика, число оборотов диска на 1 кВт*ч израсходованной электроэнергии, обозначение примененного в нижнем подшипнике диска опоры, числовые значения полных киловатт-часов с десятыми долями, направление вращения диска, условное обозначение двойной изоляции, номер прибора и год его изготовления.

9.3 Электронные счетчики электроэнергии

Отличительные особенности:

- счетчик измеряет мощность и энергию цифровым методом;
- возможность измерения мгновенных значений мощностей и действующих значений токов, напряжений, частоты;
- учет технических потерь в линиях электропередач и силовых трансформаторах;
- цифровые интерфейсы: оптопорт, двухпроводный RS-485 или два RS-485 с внешним или внутренним питанием, интегрированный в счетчик модем PLC;
- гальванически развязанные телеметрические выходы (DIN43864), по одному на каждый вид энергии (прямого и обратного направления в зависимости от варианта исполнения);
- автоматическая самодиагностика с индикацией ошибок;
- электронная пломба;
- имеется вариант исполнения с подключением внешнего резервного питания;
- имеется функция хранения журнала событий, профиля мощностей (активной и реактивной) с программируемой длительностью;
- имеется вариант исполнения со встроенным модемом передачи информации по силовой сети 220/380 В;
- наличие выхода для отключения нагрузки или внутреннего реле отключения нагрузки;
- антенна GSM модема;
- подсветка ЖКИ.

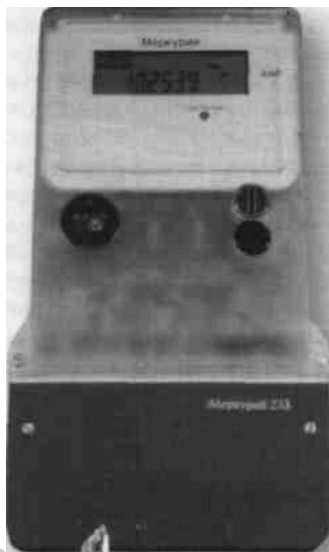


Рисунок 9.5 – Модель Меркурий 232ART

Модель Меркурий 201

Счетчики предназначены для учета активной электрической энергии в однофазных двухпроводных сетях переменного тока с частотой 50 Гц. Эксплуатируются автономно и в составе автоматизированных информационно-измерительных систем (АИИС).



Рисунок 9.6 – Модель Меркурий 201

Отличительные особенности:

- крепление на DIN-рейку;
- счетчик измеряет мощность цифровым методом и соответствует требованиям стандартов ГОСТ 30207 и МЭК 1036;
- счетный механизм – отсчетное устройство (ОУ) антиреверсного типа с магнитным экраном или ЖК-индикатор с запоминающим устройством;

- счетчики с ЖК-индикатором имеют модификацию со встроенным PLC-модемом для работы в составе АИИС «Меркурий-Энергоучет» и других системах;
- гальванически развязанный телеметрический выход (DIN43864);
- в качестве датчика тока используется шунт, чем обеспечивается требуемая точность измерений при наличии в цепи нагрузки постоянной составляющей;
- счетчики работают в сторону увеличения показаний при любом нарушении фазировки подключения токовых цепей;
- малые габариты;
- комплектуется переходной планкой с присоединительными размерами индукционных счетчиков.

Электронные компоненты приобретаются только у ведущих мировых производителей, хорошо известных специалистам: Texas Instruments, Analog Divices, Epcos, Vishay, Philips. Для поверхностного монтажа используются высокоскоростные линии SMT-монтажа японской компании Juki.

Модель ПСЧ-ЗТА-07.112 или (612) – современный трехфазный электронный счетчик, учитывающий активную электроэнергию и предназначенный для установки в бытовом и мелкомоторном секторе.

Позволяет вести:

- обмен информацией с ПЭВМ через интерфейс связи RS 485 или оптический порт;
- фиксацию времени подачи питания на зажимы счётчика и времени вскрытия клеммной крышки;
- автопереход на «летнее» и «зимнее» время;
- запись тарифных зон суток, текущего времени, дня недели, числа, месяца, года, категории потребителя;
- установку лимита мощности и электрической энергии;
- регистрацию и хранение значений количества потреблённой электроэнергии с превышением лимита мощности по тарифам;
- выдачу сигнала на исполнительное устройство включения/отключения;
- регистрацию и хранение учтенной электрической энергии по тарифным зонам на начало месяца в течении 24 месяцев и на начало каждого получаса в течении 2 месяцев и т.д. потребителя при превышении им установленных лимитов;
- защиту от несанкционированного изменения введенной информации.



Рисунок 9.7 – Модель ПСЧ-4ТМ.05

Модель ПСЧ-4ТМ.05 – это многофункциональный прибор, сочетающий микропроцессорный счетчик электрической энергии и прибор для измерения параметров трехфазной сети, работающий как автономно, так и в составе автоматизированных систем контроля и управления потреблением электроэнергии (АС-КУЭ), который обеспечивает учет прямого и обратного направления активной и реактивной электрической энергии в трехпроводных и четырехпроводных сетях переменного тока частотой **50 Гц**.

Ведется журнал событий. Имеет: встроенный тарификатор; часы реального времени; возможность подключения резервного питания; электронную пломбу.



Рисунок 9.8 – Модель СЭБ 2А-01

Модель СЭБ 2А-01

Имеет:

- Внутренний тарификатор на 4 тарифа.
- Счетчик отображает количество потребленной электрической энергии с точностью до десятых долей кВт*ч. Точность до тысячных долей кВт*ч доступна по интерфейсу RS-485 или через оптопорт.
- Энергонезависимую память.
- Программируемый импульсный выход (4 режима).
- Электронную пломбу.

Счетчик сохраняет в энергонезависимой памяти и отображает на ЖКИ:

- значение учтенной активной энергии нарастающим итогом с момента изготовления по всем тарифам;
- значение учтенной активной энергии за текущий и предыдущие 24 месяца (на начало каждого месяца) по всем тарифам;
- значение мгновенной мощности нагрузки;
- регистрацию и хранение времени включения / отключения питания;
- регистрацию времени вскрытия защитной крышки клеммной колодки.

Для программного обеспечения «верхнего уровня» АСКУЭ используют систему «Энергоресурсы», которая предназначена для организации коммерческого учёта потребления электрической (по многотарифной системе), тепловой энергии, а также учёта расхода воды и газа (рисунок 9.9).

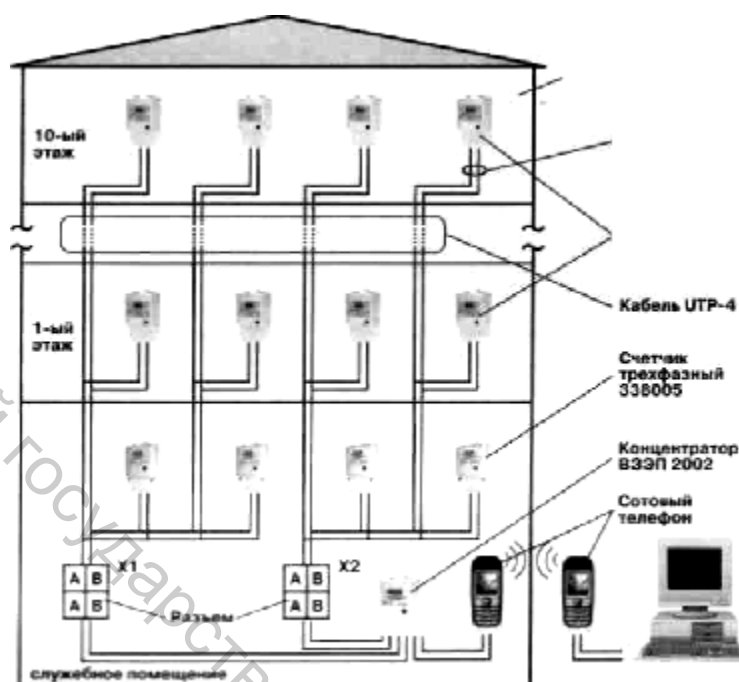


Рисунок 9.9 – Система «Энергоресурсы»

Система имеет возможность перенастраиваться с одного рабочего места и оснащена системой самодиагностики.

9.4 Оборудование идентификации коммуникаций

Трассоискатель

Кабельное хозяйство, независимо от его назначения, требует постоянного внимания в течение всего срока службы, периодического ремонта, модернизации. Для того чтобы однозначно установить, в каком направлении идет нужный вам кабель или кабельный канал, необходимы трассировка и идентификация подземных коммуникаций.



Рисунок 9.10 – Трассоискатель

Данные приборы (рисунок 9.10) используются также для выяснения местоположения неисправностей кабельных линий (обрыв, короткое замыкание, нарушение изоляции). Приборы регистрируют электромагнитное поле, порождаемое сигналом в искомом кабеле, но не сам кабель. Кабельный локатор состоит из двух частей: генератора сигнала и приемника.

Выбор рабочей частоты осуществляется в зависимости от условий работы. Если район насыщен коммуникациями, лучше работать на низких частотах, так как при этом уменьшаются наводки на соседние линии. Низкая частота позволяет увеличить дальность обнаружения трассируемой линии от места подключения генератора к коммуникации.

Прибор автоматически определяет глубину залегания коммуникации, показывает оператору его положение относительно оси при помощи индикации «влево/вправо».

Использование трассоискателя «Сталкер 75-02» позволяет значительно сократить время выполнения работ по обследованию подземных коммуникаций.

В состав трассоискателя «Сталкер 75-02» входит мощный 75-ваттный 4-частотный генератор, питающийся от сети 220 В или от встроенного аккумулятора (6 В 12 А/ч – 2 шт.), цифровой 4-частотный приемник (частоты: 273 Гц, 526 Гц, 1024 Гц и 8928 Гц) с возможностью работы в пассивном режиме по сигналу 50 Гц, индуктивная рамочная антенна для бесконтактного подключения к коммуникациям и обследования участков местности

Детектор

Профессиональный детектор поиск – скрытых пластиковых и металлических труб; определение безопасной глубины сверления (на рис. 9.11 представлена модель WallScanner D-tect 100).

ОБНАРУЖИВАЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ: черные и цветные металлы, пластик, кабели, древесина, пустоты. **ГЛУБИНА ОБНАРУЖЕНИЯ (макс):** 100 мм.

ПОГРЕШНОСТЬ: определения положения объекта допустимой глубины сверления – 5 мм; пространственное разрешение (минимальное расстояние между двумя соседними объектами, распознаваемыми как разные объекты) – 40 мм.



Рисунок 9.11 – Детектор

Возможность обнаружения неметаллических конструкций обусловлена принципом действия прибора. Он сканирует поверхность с помощью СВЧ-излучения и отслеживает изменения в характеристиках отраженного сигнала. Отметим, что физические законы все же накладывают ряд ограничений на сферу применимости D-tect 100. Так, он не в состоянии обнаружить предметы, расположенные один за другим; не может сканировать пространство, закрытое металлической сеткой, и конструкции с повышенным уровнем влажности. К тому же сырые места и пустоты в стенах могут быть ошибочно опознаны как объекты. Пластиковые трубы большого диаметра иногда отображаются на дисплее как трубы меньшего размера. В остальных случаях D-tect 100 функционирует безошибочно. В частности, при сканировании стен, состоящих из нескольких слоев (например, облицованных плиткой – рисунок 9.12).



Рисунок 9.12 – Сканирование стен

В зависимости от типа обследуемой поверхности выбирают один из трех режимов работы. Стандартный подходит для стен из кирпича. Максимальная глубина обнаружения составляет 60 мм, причем сканируются все материалы (пластик, дерево, металл) и отслеживаются электрические цепи.

9.5 Оборудование включения и защиты

Автоматические выключатели ВА 47-29

Автоматические выключатели предназначены для защиты распределительных и групповых цепей.

Контакты, подвижные и неподвижные, выполнены из серебросодержащего материала, это повышает износостойчивость контактов, увеличивая срок службы, уменьшает переходное сопротивление, снижая потери.

Обмотка катушки электромагнитного расцепителя выполнена из высококачественной меди с оптимальным количеством витков.

Насечки на контактных зажимах предотвращают перегрев и оплавление проводов за счет более плотного переходного сопротивления контакта и, как следствие, потери. Кроме того, увеличивается механическая устойчивость соединения, предельная коммутационная способность. Защелка с фиксацией облегчает монтаж изделия на DIN-рейку. Индикатор положения контактов позволяет получить точную информацию о положении контактов (замкнуто/разомкнуто).



Рисунок 9.13 – Автоматические выключатели ВА 47-29

Автомат дифференциальный АД12/АД14

Быстродействующий защитный выключатель, реагирующий на дифференциальный ток, со встроенной защитой от сверхтоков. Обеспечивает три вида защиты – защиту человека от поражения электрическим током при случайном непреднамеренном прикосновении к токоведущим частям электроустановок при повреждениях изоляции; предотвращение пожаров вследствие протекания токов утечки на землю; защиту от перегрузки и короткого замыкания. Аппарат сохраняет работоспособность при пониженном напряжении сети (до 50 В) и обладает высокой механической износостойкостью. В аппарате предусмотрена индикация срабатывания от дифференциального тока.

Конструкция дифференциального автомата представляет собой соединение двух функциональных узлов: электронного модуля дифференциальной защиты и автоматического выключателя серии ВА47-29. Электронный модуль состоит из дифференциального трансформатора тока, электронного усилителя с пороговым устройством, исполнительного электромагнита сброса и источника питания. При установке рукоятки управления автоматического выключателя в положение «ВКЛ» на электронный модуль поступает напряжение питания. В нормальном режиме работы, при отсутствии дифференциального тока (тока утечки), в силовой цепи по проводникам,

проходящим сквозь окно магнитопровода трансформатора тока и являющимися его первичной обмоткой, протекает рабочий ток нагрузки. Равные токи во встречно включенных обмотках наводят в магнитном сердечнике трансформатора тока равные, но векторно противоположно направленные магнитные потоки. Результирующий магнитный поток равен нулю, и ток во вторичной обмотке дифференциального трансформатора также равен нулю. При случайном прикосновении человека к открытым проводящим частям или пробое изоляции на корпус электроустановки по фазному проводнику, кроме тока нагрузки, протекает дополнительный ток, являющийся для трансформатора тока дифференциальным. Если этот ток превышает значение установки порогового устройства, последнее подает ток от источника питания на катушку электромагнита сброса, который сдергивает защелку механизма независимого расцепления выключателя, и электрическая цепь размыкается.

Ограничители импульсных перенапряжений ОПС1

Ограничитель импульсных перенапряжений (устройство защиты от импульсных перенапряжений — УЗИП) ОПС1 предназначен для защиты от грозовых импульсных перенапряжений.



Рисунок 9.14 – Ограничители импульсных перенапряжений ОПС1:

- 1 – корпус. 2 – встроенный предохранитель. 3 – сменный защитный элемент. 4 – указатель «износа» защитного элемента. 5 – насечки на контактных зажимах

Корпуса модульные пластиковые с повышенной степенью защиты (КМПн IP55)

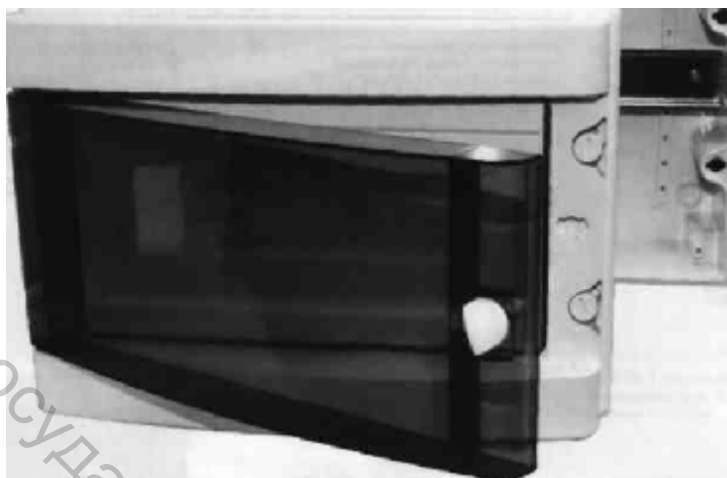


Рисунок 9.15 – Корпус модульный

Щитки распределительные для производственных и общественных зданий

Предназначены для приема и распределения электроэнергии в жилых и производственных помещениях, а также для защиты линий при перегрузках и коротких замыканиях в сетях переменного тока напряжением 380/220В.

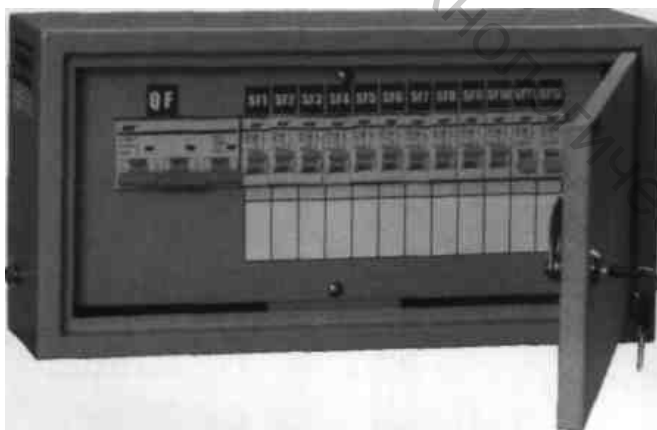


Рисунок 9.16 – Щиток распределительный

Предохранители плавкие ППНИ

Предохранители плавкие серии ППНИ типа gG общего применения предназначены для защиты промышленных электроустановок и кабельных линий от перегрузки и короткого замыкания и выпускаются на номинальные токи от 2 до 630А. Используются в однофазных и трехфазных сетях напряжением до 660 В частоты 50 Гц.



Корпус подходит для установки в помещениях с высоким уровнем влажности или со значительной запыленностью, а также для установки на открытом воздухе.

Идеальны для эксплуатации в гаражах, автомойках, подвалах, лабораториях, мастерских и т.д.

Контакты предохранителя и держателя выполнены из электротехнической меди с гальваническим покрытием сплавом олово-висмут, что предотвращает их окисление в процессе эксплуатации. Все габариты плавких вставок ППНИ удобно устанавливать или демонтировать универсальной рукояткой съема РС-1, изоляция которой выдерживает напряжение до 1000 В. Предохранители ППНИ с отключающей способностью во всем диапазоне надежно срабатывают. Для быстрого и эффективного дугогашения корпус плавкой вставки наполнен кварцевым песком высокой химической очистки.

Плавкий элемент выполнен из фосфористой бронзы (сплав меди с цинком с добавлением фосфора) и надежно соединен точечной сваркой с выводами предохранителя.

Рисунок 9.17 – Предохранители плавкие ППНИ

В конструкции плавкой вставки есть специальный индикатор, выполненный в виде выдвижного штока, который позволяет визуально определять сработавшие предохранители.

Переносные устройства защитного отключения, управляемые дифференциальным током

Устройства отключают напряжение сети, если человек случайно прикоснется к оголенному проводу или к металлическому корпусу поврежденного электроприбора. Использование переносных УЗО – это защита от возможного возгорания электроприбора, в котором повреждена изоляция (износ, сырость, механическое воздействие и т.д.)



Рисунок 9.18 – Переносное устройство защитного отключения

Катушки переносные

При помощи катушки легко подключить удаленные на расстояние до 50 м от стационарной розетки электроприборы, имеющие шнур с плоской или круглой вилкой.



Рисунок 9.19 – Катушка переносная

Контакторы малогабаритные серии КМИ

Малогабаритные контакторы переменного тока общепромышленного применения КМИ на ток нагрузки от 9 до 95А предназначены для пуска, остановки и реверсирования асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором на напряжение до 660 В (категория применения АС-3), а также для дистанционного управления цепями освещения, нагревательными цепями и различными индуктивными нагрузками (категория применения АС-1). Все исполнения на ток нагрузки до 40 А имеют одну группу замыкающих или размыкающих дополнительных контактов. Исполнения на ток нагрузки свыше 40 А – две группы (замыкающую и размыкающую).

Область применения малогабаритных контакторов серии КМИ – управление вентиляторами, насосами, тепловыми завесами, печами, кран-балками, станками, освещением.



Рисунок 9.20 – Контакторы малогабаритные серии КМИ

Контактор КМИ является электромагнитным аппаратом переменного тока, магнитная система которого разделена на две части: неподвижную, эластично закрепленную в основании из пластмассы, и подвижную с контактами для коммутации силовой цепи. Управление работой контактора осуществляется с помощью многовитковой катушки, расположенной на среднем стержне неподвижной части Ш-образной магнит-

ной системы. Присоединительные контакты специальной овальной формы обеспечивают надежное фиксирование проводников для 1 и 2 габарита – с закаленными тарельчатыми, для 3 и 4 габарита – с зажимной скобой, позволяют подсоединить контакт большего сечения. Насечки на присоединительных контактах снижают нагрев проводов благодаря надежной фиксации в местах присоединения.

Короткозамкнутые алюминиевые кольца, запрессованные в полюсные наконечники неподвижной части магнитной системы, предусмотрены для предотвращения детонации.

С целью повышения эффективности работы магнитной системы контактора при ее изготовлении выполняют следующие операции. Сталь проходит термическую обработку, в результате чего листы покрываются окалиной. Затем листы стали набираются в пакеты и плотно склепываются, а полюса шлифуются до зеркального блеска. В результате выполнения описанных операций магнитная система в рабочем положении обеспечивает оптимальный режим эксплуатации (отсутствие шумов и повышенная надежность контактной системы).

Контакторы КМИ с электротепловым реле в защитной оболочке

Контакторы КМИ в сборе с электротепловым реле в защитной оболочке являются комплектным устройством, состоящим из малогабаритного контактора КТИ, теплового реле РТИ, оболочки с сальниками и кнопок управления. Предназначены для дистанционного пуска непосредственным подключением к сети и остановки трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором на напряжение переменного тока до 400 В, а также для защиты электродвигателей от перегрузок недопустимой продолжительности и сверхтоков, возникающих при обрыве одной из фаз. При применении контакторов КМИ 10910+КМИ 23211 используется пластиковая оболочка, контакторов КМИ 34012+КМИ 49512 – металлическая оболочка.

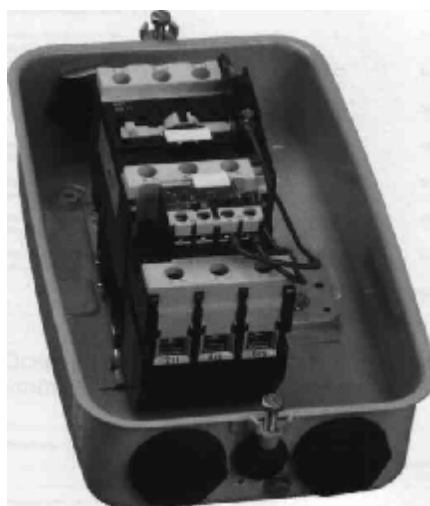


Рисунок 9.21 – Контакторы КМИ

Выключатели кнопочные с блокировкой серии ВКИ

Выключатели кнопочные с механической блокировкой серии ВКИ предназначены для нечастых коммутаций одно- и трехфазных нагрузок индуктивного и активного характера (электродвигателей, осветительных и нагревательных приборов). Область применения – управление электрифицированными строительными машинами и механизмами (бетономешалки малых объемов, электроинструмент, цепи временного и уличного освещения, в том числе люминесцентного, мобильные тепло-вентиляторы, насосы.



Рисунок 9.22 – Выключатели кнопочные

При нажатии кнопки "Пуск" давление через тело кнопки передается траверсе с подвижными контактами. Траверса опускается, сжимая две возвратные пружины, замыкая и прижимая к неподвижным контактам подпружиненные мостиковые контакты. После замыкания контактов выключателя происходит срабатывание механизма блокировки кнопки "Пуск" в нажатом состоянии. При нажатии кнопки "Стоп" механизм блокировки освобождает кнопку "Пуск", которая возвращается в исходное состояние под действием возвратных пружин траверс.

Реле электротепловое серии РТИ

Реле электротепловое серии РТИ является электрическим коммутационным устройством, имеющим собственное потребление энергии. Электротепловое реле серии РТИ предназначено для защиты электродвигателей от перегрузки, асиммет-

рии фаз, затянутого пуска и заклинивания ротора. Устанавливается непосредственно на контакторах серии КМИ. Для защиты от короткого замыкания должны быть предусмотрены предохранители или автоматические выключатели на соответствующее значение номинального тока срабатывания. Электротепловое реле серии РТИ относится к новому поколению коммутационной аппаратуры и выпускается в трех типоразмерах на токи до 93А.

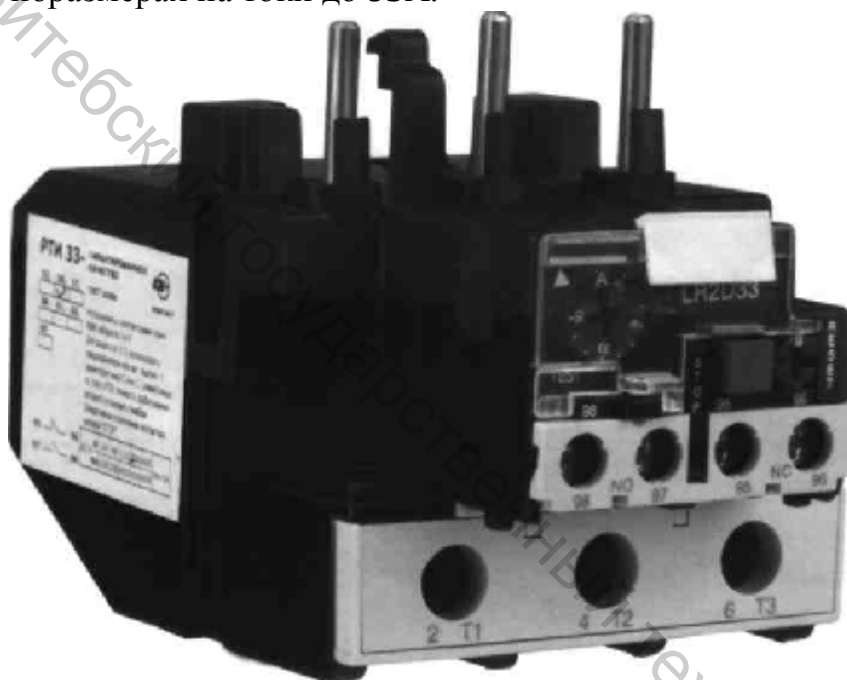


Рисунок 9.23 – Реле электротепловое

Светосигнальные индикаторы, кнопки управления и переключатели

Светосигнальные индикаторы предназначены для индикации состояния электрических цепей. Применяются в электроцитах, промышленном оборудовании и на объектах энергоснабжения.

Кнопки управления и переключатели предназначены для оперативного управления контакторами (магнитными пускателями) и реле автоматики в электрических цепях переменного тока частотой 50 Гц, напряжением до 660 В или постоянного тока напряжением до 400 В.

Разнообразные цветовые варианты позволяют наиболее эффективно компоновать щиты и панели. Все изделия состоят из двух узлов – быстросъемной головки и контактного модуля. Контактная группа черного цвета замыкающая, коричневого цвета – размыкающая.



Рисунок 9.24 – Кнопки управления и переключатели

Посты и пульты кнопочные

Пульты кнопочные предназначены для коммутации электрических цепей управления подъемными механизмами. Представляют собой герметичный корпус из термостойкой ABS-пластмассы с установленными кнопками. Для герметизации ввода кабеля предусмотрен защитный сальник, а между корпусом и панелью устанавливается герметизирующая прокладка.



Рисунок 9.25 – Пульт кнопочный

9.6 Светильники



Рисунок 9.26 – Светильники серии НПБ для ламп



Рисунок 9.27 – Светильники с люминесцентными лампами серии ЛПБ

Соединительные шнуры и сетевые шнуры поставляются в комплекте (с моделями, в которых конструкционно предусмотрены).

В комплекте поставляются саморезы, скобы крепления (с моделями, в которых предусмотрено крепление на скобах).

Светильники с электронным пускорегулирующим аппаратом имеют ряд преимуществ в сравнении с традиционным: повышенная на 20 % светоотдача люминесцентных ламп; пониженный (до 25 %) расход энергии; увеличение срока службы люминесцентной лампы на 20 % и более за счет оптимального режима ее работы; бесшумная работа светильника; мгновенный старт; ровный, без мерцания, не утомляющий зрение свет; отсутствие стробоскопического эффекта и отсутствие пульсаций света.



Рисунок 9.28 – Светильники с люминесцентными лампами серии ЛПБ

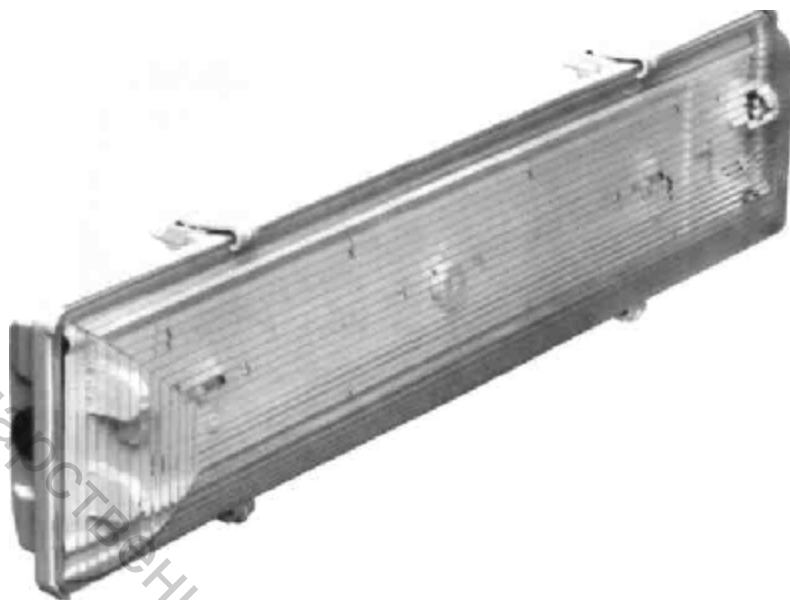


Рисунок 9.29 – Светильники с люминесцентными лампами серии ЛСП

Материал исполнения рассеивателя – УФ-стабилизированный поликарбонат. Не подвержен воздействию солнечных лучей. Поликарбонат – наиболее прочный материал из пластиков. Обладает наивысшей степенью прозрачности из имеющихся аналогов. Выдерживает высокие температурные (до 135 °С), химические, ударные нагрузки. Уплотнитель между рассеивателем и корпусом светильника – материал исполнения полиуритан.

Удобное соединение панели с корпусом светильника поворотными креплениями. Экономит время обслуживания светильника. В комплекте со светильником поставляются монтажные болты, саморезы, гибкие подвесы для удобства обслуживания светильника на высоте. Имеет технический паспорт с подробной инструкцией по монтажу.



Рисунок 9.30 – Светильники встраиваемые для тяжелых условий применения НСВ

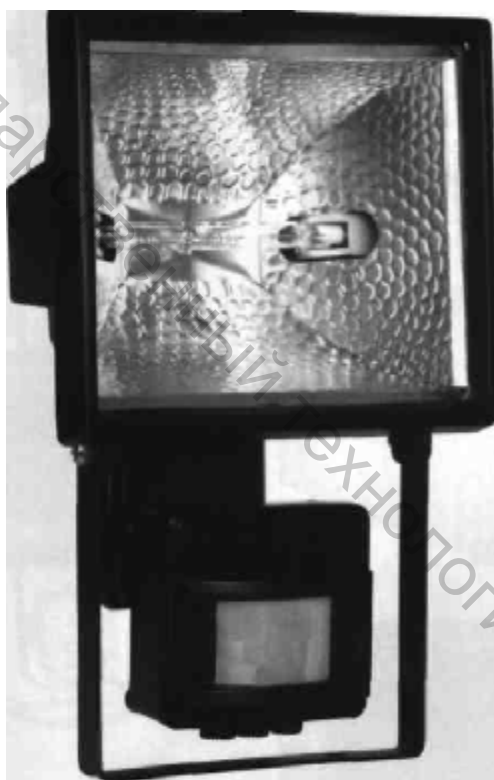


Рисунок 9.31 – Прожекторы галогенные

9.7 Разъемы, зажимы, крепежные изделия

Силовые штепсельные разъемы

Силовые штепсельные разъемы незаменимы при эксплуатации внутри помещений и на открытом воздухе совместно с мобильным электрооборудованием с кабельной системой питания и стационарным электрооборудованием однофазного и трехфазного исполнения. Подходят для подключения строительного электрооборудования и электроинструмента, станков и другого промышленного оборудования, для электроснабжения бытовок и киосков. Изолирующие детали, несущие токовые

дущие части силовых разъемов выполнены из термостойких и самозатухающих материалов. Крышки обеспечивают защиту от попадания внутрь разъема пыли, влаги и надежно закреплены. Пружины защищены от коррозии. Винты, применяемые для механических и электротехнических соединений, защищены от самоотвинчивания. Возможность эксплуатировать во влажной среде (IP44, IP54).



Рисунок 9.32 – Силовые штепсельные разъемы

Наличие специального сальника для кабеля различного сечения. Наличие пространства для размещения кабеля.

Стационарные вилки и розетки

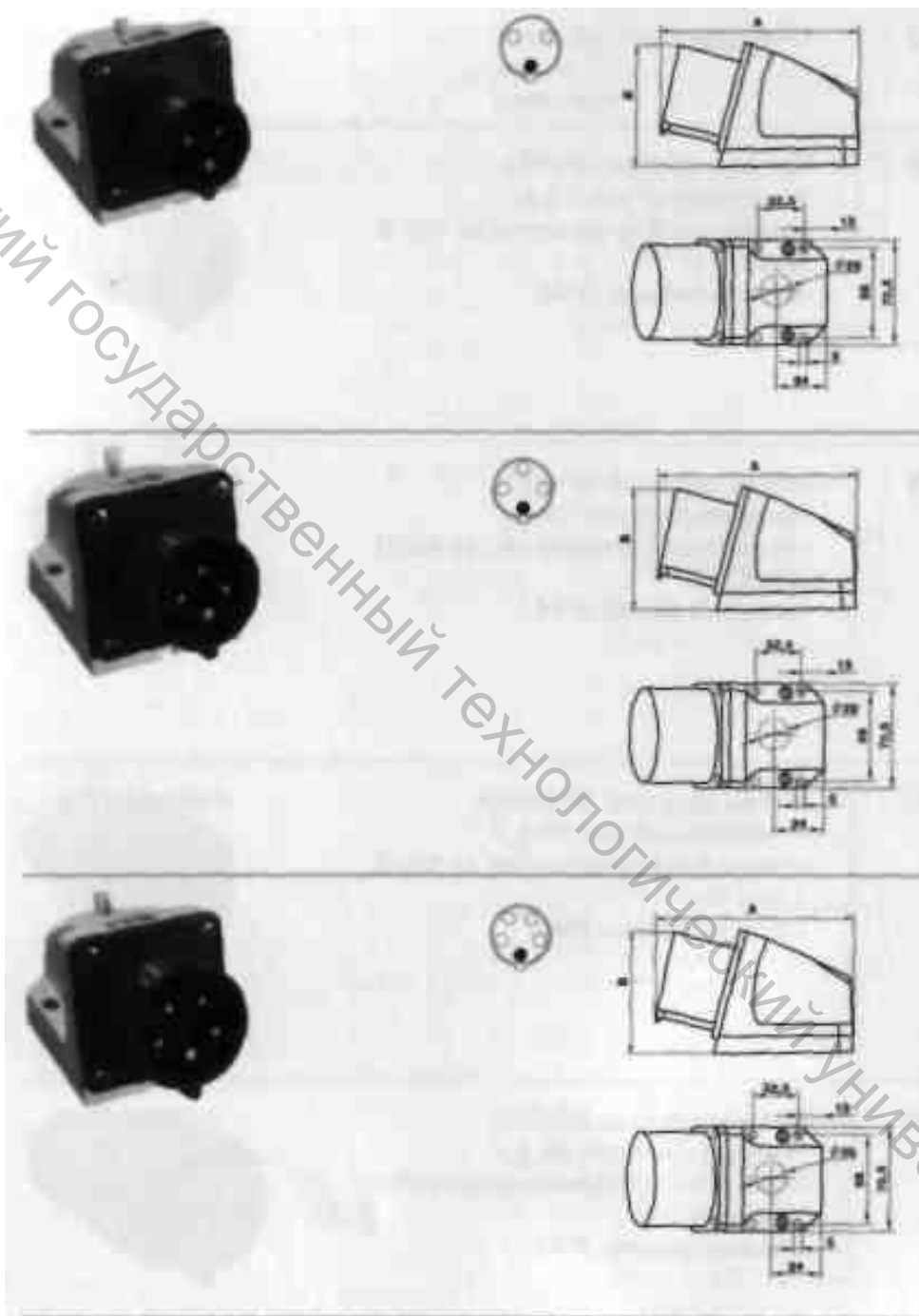
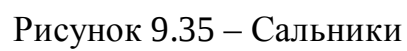


Рисунок 9.33 – Стационарные вилки



Предназначены для ввода проводов и кабелей в электрошитовое оборудование с целью защиты проводников от механического повреждения и защиты самой сборки от проникновения пыли и влаги в месте ввода.



Сальник состоит из корпуса (1), уплотнителя (2), гайки уплотнения (3), прокладки (4) и фиксирующей гайки (5). Уплотнитель и прокладка выполнены из неопрена. Корпус, гайка уплотнения и фиксирующая гайка выполнены из нейлона. Установка сальника производится при помощи трубного (газового) ключа. Диапазон рабочих температур – от -40 до $+80^{\circ}\text{C}$.

Зажимы

Клемные зажимы серии ЗНИ. Служат для безопасного и компактного подключения фазных, нулевых и защитных (земля) проводников различного сечения.

Устанавливаются на DIN-рейку. Комплекуются маркером для нанесения номера. Также поставляются боковые заглушки для клеммных зажимов серии ЗНИ. Цвет: синий, серый, зеленый.

Оконечные зажимы могут закрываться пластиковыми заглушками соответствующего размера и цвета.

Выполнены из цветного негорючего полиамида — желто-зеленого (земля), синего (ноль), серого, зеленого (фаза) цвета.



Рисунок 9.36 – Зажимы

Шина нулевая

Применяется в щитовом оборудовании для подсоединения нулевых рабочих (N) и нулевых защитных проводов (PE). Крепление шины предусмотрено по центру (типы 8/1; 14/1) и по краям (типы 8/2 и 14/2) через изолятор нулевой шины на 35 мм, монтажную DIN-рейку и через угловые изоляторы нулевой шины, а также непосредственно на панель щита. При подключении к шине медных многожильных проводов рекомендуется оканцование их наконечниками-гильзами. Выполнена из высококачественной электротехнической бронзы.

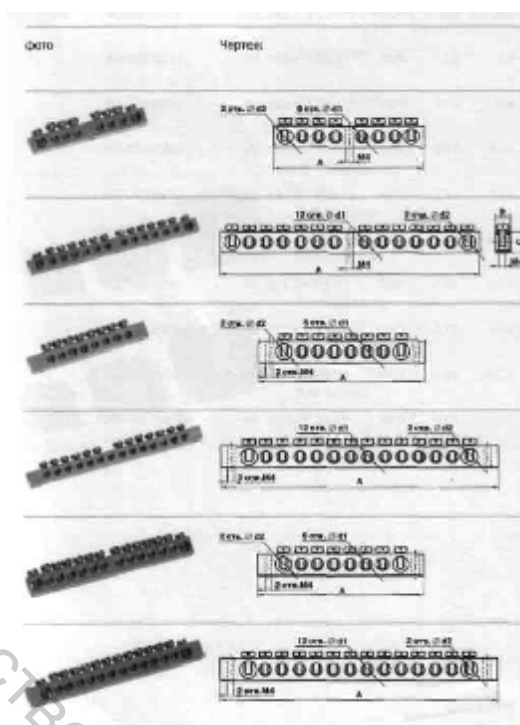
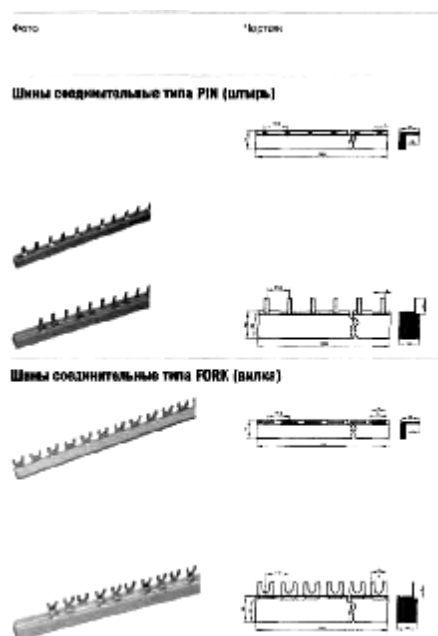


Рисунок 9.37 – Шина нулевая

Шина соединительная



Применяются для удобного и безопасного соединения групп: ВА (выключатели автоматические), АД (автоматы дифференциальные), ВД (выключатели дифференциальные), ВН (выключатели нагрузки).

Рисунок 9.38 – Шина соединительная

Крепежные изделия из пластика

Скобы пластиковые

Предназначены для быстрого и надежного крепления круглых и плоских кабелей. Возможно крепление к дереву, прессованному картону и швам кирпичной кладки, к штукатурке, бетону, кирпичу.

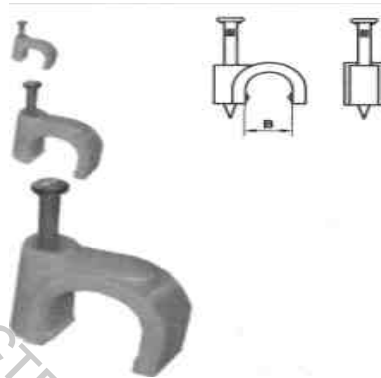


Рисунок 9.39 – Скобы пластиковые

Маркеры кабельные

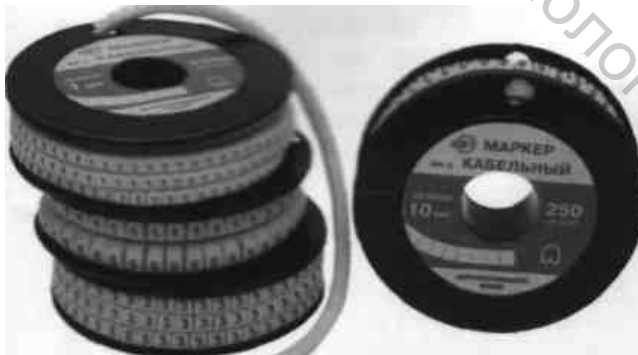


Рисунок 9.40 – Маркеры кабельные

9.8 Люминесцентные лампы

Люминесцентные лампы разработаны и используются с середины XX столетия, получили название «лампы дневного света». Современные люминесцентные лампы потребляющие от электрической сети 15-25 ватт, выделяют количество световой энергии

равное 100-ваттной лампочке накаливания. Это предопределило их название «энергосберегающие».

Принцип их работы и устройство сложнее ламп накаливания. Стеклообразная трубка люминесцентной лампы наполнена инертным газом, в который добавлены пары ртути. На противоположных сторонах стеклянной трубки имеются два электрода, между которыми возбуждается холодный газовый разряд. В отличие от «горячего» разряда – яркой электрической дуги, холодный разряд нагревает среду меньше и светится довольно слабо. При холодном разряде излучается много невидимых ультрафиолетовых лучей, которые попадая на специальное вещество, нанесенное на стекло лампы изнутри – люминофор, вызывают его свечение видимой цветовой частью спектра электромагнитных волн. Цвет свечения люминофора зависит от его химического состава, в лампах он подобран так, чтобы суммарно получать свечение подобное белому свету. При этом легко получается свечение близкое по оттенку к солнечному. В излучении люминесцентных ламп отсутствуют некоторые цвета спектра (например, желтый), предметы в их свете могут менять окраску или приобретать неестественный оттенок. В основном срок их службы зависит от того, насколько часто лампу включают и выключают. Чтобы зажечь холодный газовый разряд, недостаточно просто подать напряжение на выводы: сначала нужно провести специальную процедуру запуска. Сначала стартер незначительное время разогревает электроды. Стартер размыкается, в работу вступает устройство – балласт, которое выдает импульс высокого напряжения, достаточного для того, чтобы в лампе возник холодный разряд. Затем этот разряд поддерживается самостоятельно, а балласт ограничивает ток через лампу, не давая разряду слишком разогреться, иначе лампа быстро вышла бы из строя.

В современных люминесцентных лампах стартер и балласт объединены в одно целое, в виде микросхемы, расположены внутри лампы – эту конструкцию называют «электронным балластом». Встроенная электроника повышает частоту мерцания до десятков тысяч раз в секунду, что не оказывает вредное воздействие на глаза человека. Сложность конструкции намного повышает стоимость люминесцентной лампы, а содержащаяся внутри стеклянной трубки ртуть делает лампочку небезопасной для окружающей среды.

Литература

1. Касаткин, А. С. Электротехника / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – Москва : Высшая школа, 2003. – 542 с.
2. Электротехника / В. Г. Герасимов [и др.] ; под ред. В. Г. Герасимова. – Москва : Высшая школа, 1985. – 768 с.
3. Москаленко, В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко. – Москва : Высшая школа, 2000. – 368 с.
4. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск : Техноперспектива, 2006. – 363 с.
5. Рыбаков, Н. С. Электротехника / Н. С. Рыбаков. – Москва : РИОР, 2007. – 160 с.
6. Электротехника / Ю. М. Борисов [и др.]. – Москва : Энергоиздат, 1985. – 559 с.
7. Ильинский, Н. Ф. Общий курс электропривода / Н. Ф. Ильинский, В. Ф. Козаченко. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.
8. Бутырин, П. А. Электротехника / П. А. Бутырин. – Москва : Академия, 2007. – 272 с.
9. Рыбаков, Н. С. Электротехника. / Н. С. Рыбаков. – Москва : РИОР, 2007. – 160 с. Электронный ресурс <http://www.classes.ru/books - hugahuga/127/782>.
10. Ильинский, Н. Ф. Основы электропривода. / Н. Ф. Ильинский – Москва : Издат. дом МЭИ, 2007. – 224 с. Электронный ресурс <http://www.electrolibrary.info>.
11. Журнал «Про электричество». – № 4 / 28. – октябрь-декабрь. – 2008. – Минск. 76 с.
12. Электрические машины : методические указания к лабораторным работам по электротехнике для студентов специальностей 1-360101, 1-360103, 1-360104, 1-360801, 1-500101 - 1-500105 / сост. Ю. В. Попов, А. С. Кусков. – Витебск : УО «ВГТУ», 2006. – 28 с.
13. Независимое специализированное издание «Электромагазин». – № 09 (78). – сентябрь. – 2007. – Минск, 68 с.
14. Журнал «Про электричество». – № 3 / 23. – июль-сентябрь. – 2007. – Минск, 78 с.
15. Журнал «SCIENCT & VIE.JUNIOR ». – № 12 (89). – декабрь. – 2009. – Париж, 33 с.

Учебное издание

Новиков Юрий Васильевич

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ
КУРС ЛЕКЦИЙ**

Редактор *Ю.В. Попов*

Технический редактор *Ю.В. Хлопков*

Корректор *Е.М. Богачева*

Компьютерная верстка *Ю.В. Новиков*

Подписано к печати 05.11.10 Формат 60х90 1/16 Бумага офсетная № 1
Гарнитура «Таймс». Усл.печ. листов 6,6 Уч.-изд. листов 5,8
Тираж 58 экз. Заказ № 434

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет» 210035, г. Витебск, Московский пр-т, 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования
«Витебский государственный технологический университет».
Лицензия № 02330/0494384 от 16 марта 2009 г.