

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И КАДРОВ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

К. Л. Пузевич

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА  
И ЭЛЕКТРОНИКА**

**ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

*Курс лекций  
для студентов, обучающихся по специальности  
1-74 06 04 Техническое обеспечение мелиоративных  
и водохозяйственных работ*

Горки  
БГСХА  
2020

УДК 621.3(075.8)

ББК 32.85я73

П88

*Рекомендовано методической комиссией факультета  
механизации сельского хозяйства 28.09.2020 (протокол № 1)  
и Научно-методическим советом БГСХА 30.09.2020 (протокол № 1)*

Автор:

кандидат технических наук, доцент *К. Л. Пузевич*

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *В. А. Шаршунов*;

кандидат технических наук, доцент *А. И. Филиппов*

**Пузевич, К. Л.**

П88 Электротехника и электроника. Теория электрических цепей : курс лекций / К. Л. Пузевич. – Горки : БГСХА, 2020. – 86 с.

ISBN 978-985-7231-95-9.

Приведены основные сведения о теории электрических цепей, методике их расчета и проведении измерений.

Для студентов, обучающихся по специальности 1-74 06 04 Техническое обеспечение мелиоративных и водохозяйственных работ.

**УДК 621.3(075.8)**

**ББК 32.85я73**

**ISBN 978-985-7231-95-9**

© УО «Белорусская государственная  
сельскохозяйственная академия», 2020

## ВВЕДЕНИЕ

Электротехника в широком понимании – это наука, изучающая способы использования электрических и магнитных явлений для практических целей. Электротехника охватывает большой комплекс вопросов и разделена на ряд областей.

Одной из важнейших областей электротехники является электроэнергетика, которая рассматривает вопросы производства электрической энергии (из других видов энергии), передачи энергии на дальние расстояния, распределение ее между потребителями и преобразование электрической энергии в другие виды энергии – механическую, тепловую, химическую и т. д.

На основе электрификации все шире внедряется комплексная механизация и автоматизация производственных процессов. Интенсивно развивается электротехнология – электротермические и электролитические способы получения и обработки металлов. Электроэнергия используется для электросварки, закалки стали токами высокой частоты, сушки древесины и т. д.

Электроника является областью электротехники и рассматривает движение заряженных частиц в вакууме, в газовой среде или твердом теле и управление этим движением с целью различного рода преобразования электрических величин или одного вида энергии в другой. Электроника охватывает вопросы производства и применения электронных приборов и других устройств, выполняющих функции преобразования энергии, управления отдельными механизмами, станками, точечными линиями, а также контроль над ними.

Обширное применение электротехники во всех отраслях народного хозяйства и все большее внедрение электроники в промышленность настоятельно требует знания молодыми работниками основных вопросов электротехники и электроники.

### СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касаткин, А. С. Электротехника: учеб. пособие / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – 8-е изд., испр. – М.: Академия, 2003. – 544 с.
2. Иванов, И. И. Электротехника: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. С. Равдоник. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Лань, 2003. – 496 с.
3. Электротехника и основы электроники / под ред. О. П. Глудкина и Б. П. Соколова. – М.: Высш. шк., 1993. – 466 с.

4. Горбачев, Г. Н. Промышленная электроника: учебник / Г. Н. Горбачев, Е. Е. Чаплыгин. – М.: Энергоиздат, 1988. – 330 с.
5. Козлов, С. И. Электротехника и электроника: метод. указания: в 2 ч. / С. И. Козлов, К. Л. Пузевич. – Горки: БГСХА, 2010. – Ч. 1. – 47 с.
6. Козлов, С. И. Электротехника и электроника: метод. указания: в 2 ч. / С. И. Козлов, К. Л. Пузевич. – Горки: БГСХА, 2011. – Ч. 2. – 56 с.
7. Козлов, С. И. Электротехника и электроника: метод. указания для студентов-заочников / С. И. Козлов, К. Л. Пузевич. – Горки: БГСХА, 2011. – 32 с.
8. Козлов, С. И. Электротехника и электроника: метод. указания по выполнению контрольной работы для студентов-заочников / С. И. Козлов, К. Л. Пузевич. – Горки: БГСХА, 2013. – 35 с.
9. Пузевич, К. Л. Электротехника и электроника. Электрические измерения и электроизмерительные приборы: метод. указания / К. Л. Пузевич, Н. И. Скакун. – Горки: БГСХА, 2016. – 40 с.

## Лекция 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 1.1. Область применения энергии постоянного тока

Несмотря на широкое распространение переменного тока, остаются отрасли науки и техники, где до сих пор применяется энергия постоянного тока:

1. Питание тяговых электродвигателей (трамвай, троллейбус, метро, подъемники). Электродвигатели постоянного тока обладают хорошими возможностями для плавного регулирования частоты вращения ротора в широком диапазоне. Это свойство необходимо для транспортных средств, особенно для городских маршрутов.

2. Технологические процессы, возможные только на постоянном токе (электролиз).

3. Зарядка аккумуляторных батарей.

4. Питание ламп освещения в шахтах, летательных аппаратах.

### 1.2. Электрическая схема

В простейшем случае электрическая цепь состоит из трех основных элементов (рис. 1.1):

*источника электрической энергии (И),*

*приемника (потребителя) электрической энергии (П),*

*соединительных проводов.*

Рис. 1.1. Основные элементы  
электрической цепи

выключающие устройства (выключатели и рубильники);  
 контрольно-измерительные приборы (А);  
 приборы защиты (плавкие предохранители).

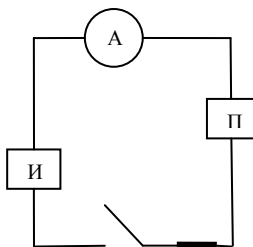


Рис. 1.2. Структурная схема реальной электрической цепи

При расчете электрические цепи заменяются схемами замещения или просто электрическими схемами. Реальные элементы изображаются на них условными обозначениями. Линии, которыми они соединены, изображают провода с бесконечно малым сопротивлением.

### 1.3. Источники электрической энергии

Источник преобразует энергию неэлектрическую в электрическую. В зависимости от вида превращаемой энергии различают следующие типы источников:

1. Гальванические элементы и аккумуляторы (рис. 1.3, а). Получение электрической энергии путем преобразования химической энергии.

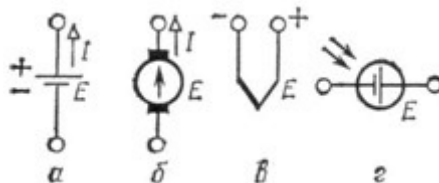


Рис. 1.3. Обозначения источников электрической энергии постоянного тока на схемах

2. Термоэлементы (рис. 1.3, *в*). Преобразование тепловой энергии в электрическую. К данному типу источников относятся термопары, термоэлектродгенераторы.

3. Фотоэлементы (рис. 1.3, *г*). Этот источник преобразует энергию лучистую (световую) в электрическую. Это фотодиоды, солнечные батареи.

4. Генераторы (рис. 1.3, *б*) – источник, преобразующий механическую энергию в электрическую.

В промышленности основным источником электрической энергии является генератор.

Любой источник электрической энергии характеризуется электродвижущей силой (ЭДС). Электродвижущая сила – сила, перемещающая заряды, – создается в источнике силами неэлектрического происхождения, сторонними силами, т. е. силами, подведенными к источнику извне. Например, у генератора – это механическая сила, у фотоэлемента – свет, у термоэлемента – тепло.

Возбуждаемая электродвижущая сила разделяет заряды в источнике на положительные и отрицательные и сообщает им потенциальную энергию  $W$ . ЭДС численно равна энергии, приходящейся на единицу заряда:

$$E = \frac{W}{q}.$$

Энергия  $W$  измеряется в джоулях (1 джоуль = 1 ньютон × метр), а заряд  $q$  – в кулонах. Единица ЭДС = 1 джоуль/1 кулон получила название вольт (В).

Один источник обозначается знаком «+», другой – знаком «-». Положительное направление ЭДС – от минуса к плюсу (рис. 1.4).

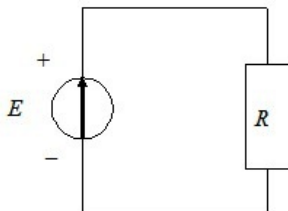


Рис. 1.4. Направление ЭДС в электрической цепи

## 1.4. Электрический ток

В замкнутой цепи, содержащей ЭДС, возникает направленное движение зарядов – электрический ток, т. е. ЭДС заставляет заряды двигаться через приемник электрической энергии  $R$  с некоторой силой.

Силой тока  $I$  называется количество электричества  $q$ , проходящее через поперечное сечение проводника в единицу времени  $t$ :

$$I = \frac{q}{t}.$$

Единица силы тока 1 ампер (А) – 1 кулон за 1 секунду. Она является основной электрической единицей в Международной системе единиц измерения (СИ).

За условно положительное направление тока принято считать направление движения положительных зарядов – от плюса источника к минусу. На схеме (рис. 1.5) оно совпадает с положительным направлением ЭДС и указывается стрелкой.

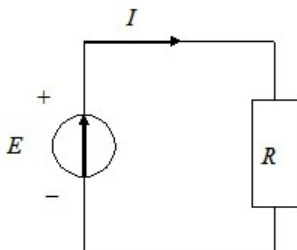


Рис. 1.5. Направление тока в электрической цепи

**Ток**, сила и направление которого во времени не изменяются, называется **постоянным**.

## 1.5. Закон Ома. Напряжение

Таким образом, мы установили, что направленное движение зарядов – электрический ток – возникает из-за воздействия ЭДС. Поэтому между значением ЭДС  $E$  и значением силы тока  $I$  должна существовать связь.

Немецкий физик Георг Симон Ом в 1827 г. установил экспериментально зависимость между током и ЭДС, известную под названием **закона Ома**: *ток в замкнутой цепи прямо пропорционален электродвижущей силе и обратно пропорционален сопротивлению всей цепи.*

$$I = \frac{E}{R + R_0},$$

где  $R$  – сопротивление приемника;

$R_0$  – внутреннее сопротивление источника (сопротивление электролита между пластинами, сопротивление обмоток генератора).

Ту же формулу можно записать в виде:

$$E = IR + IR_0.$$

Величина  $IR$  называется падением напряжения или просто напряжением  $U$ .

Под **напряжением** на некотором участке электрической цепи понимают разность потенциалов между крайними точками этого участка.

**Потенциал**  $\phi$  электрического поля в точке равен потенциальной энергии, которой обладает единица положительного заряда, помещенного в данную точку поля. Так, если потенциал точки  $a$  (рис. 1.6) равен  $\phi_a$ , потенциал точки  $b$  равен  $\phi_b$ , то разность потенциалов между точками  $a$  и  $b$ , или напряжение, равняется:

$$U_{ab} = \phi_a - \phi_b.$$

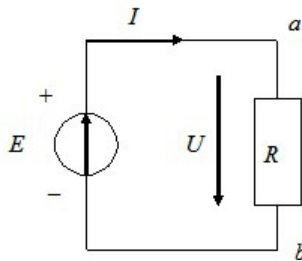


Рис. 1.6. Направление падения напряжения в электрической цепи

Положительные заряды перемещаются от точки с более высоким потенциалом к точке с более низким потенциалом, ток направлен от

точки  $a$  к точке  $b$ . Положительное направление падения напряжения совпадает с положительным направлением тока и на схеме (рис. 1.6) оно указано стрелкой.

С учетом сказанного запишем следующее:

$$E = U + IR_0.$$

где  $U$  – напряжение приемника;

$IR_0$  – падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника.

Чаще источник электрической энергии характеризуется не ЭДС, а напряжением на зажимах источника. Напряжение меньше ЭДС на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника:

$$U = E - IR_0.$$

Только при разомкнутой цепи (холостой ход), когда  $I = 0 (IR_0 = 0)$ , напряжение источника равно его ЭДС:  $U = E$ . При подключенном потребителе всегда  $U < E$ ; это очень важный вывод и его следует запомнить.

### 1.6. Работа и мощность электрического тока

Работа и энергия – понятия равноценные. Энергия – способность тела совершать работу. Например, поднятый на высоту какой-либо груз обладает некоторым запасом энергии и при падении производит работу. Энергия тела тем больше, чем большую работу может произвести это тело при своем движении. Энергия не исчезает, а переходит из одной формы в другую. Измерить энергию можно только измерив работу, которую совершает тело, расходуя эту энергию.

В источнике электрической энергии заряд в 1 кулон обладает потенциальной энергией, равной ЭДС, –  $E$ . Потенциальная энергия  $q$  зарядов электричества равна:

$$W = Eq.$$

Чтобы превратить эту потенциальную энергию в работу, нужно замкнуть цепь. Аналогично потенциальная энергия поднятого над землей груза превратится в работу, если груз получит возможность падать вниз.

В замкнутой цепи появится ток. За время  $t$  при силе тока  $I$  переместится количество зарядов

$$q = It.$$

Работа, произведенная источником электрической энергии, будет равна потенциальной энергии зарядов:

$$A = W = Eq = EIt.$$

Однако не вся эта энергия является полезной, т. е. не вся работа, произведенная источником энергии, сообщается приемнику энергии, так как часть ее расходуется на преодоление внутреннего сопротивления источника и проводов. Таким образом, полезная энергия – энергия, полученная потребителем, – будет равна:

$$W = UIt.$$

Размерность энергии  $[W] = [UIt] = В \cdot А \cdot с = Дж$ .

Джоуль (Дж) – работа, которую совершает постоянная сила, равная 1 Н, на пути 1 м, пройденном телом под действием этой силы по направлению, совпадающему с направлением силы.

Понятие «мощность электрического тока» характеризует скорость преобразования электрической энергии в другой вид энергии:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{EIt}{t} = EI$$

или

$$P = UI .$$

Единица мощности – ватт (Вт). 1 ватт – мощность, при которой за 1 секунду совершается работа в 1 джоуль.

Практическая единица мощности – 1 киловатт, сокращенно – кВт.

### 1.7. Тепловое действие тока

При прохождении электрического тока через металлический проводник электроны сталкиваются с молекулами. При этом расходуется энергия, которая превращается в тепло. Любое движение, при котором преодолевается сопротивление, требует затраты определенной энергии. Так, например, для перемещения какого-либо тела преодолевается сопротивление трения и работа, затраченная на это, превращается в тепло.

Электрическое сопротивление проводника играет ту же роль, что и сопротивление трения. Таким образом, для проведения тока через проводник источник тока затрачивает некоторую энергию, которая превращается в тепло. Количество выделенного тепла за время  $t$  определяется законом Джоуля – Ленца:

$$Q = RI^2t.$$

Так как  $I = U / R$  и  $R = U / I$ , то закон теплового действия тока может быть выражен как

$$Q = UIt.$$

В системе СИ тепло измеряется в джоулях (Дж).

На нагревании проводников электрическим током основано устройство электрического освещения, электронагревательных приборов, электрических печей, измерительной и медицинской аппаратуры различных типов и т. д.

Электрическое нагревание проводников не всегда оказывает полезное влияние. В проводах линий электропередач вследствие сильного нагрева их при больших токах может создаваться опасность возникновения пожаров. Во избежание чрезмерного нагрева проводов и потребителей электрической энергии для электрической аппаратуры установлены нормы максимальных значений сил токов, пропускаемых по данному проводу.

### 1.8. Сопротивление проводника. Проводимость

Направленному движению электрических зарядов в любом проводнике препятствуют его молекулы и атомы. Поэтому как внешняя цепь, так и сам источник энергии оказывают препятствие прохождению тока. Величина, характеризующая противодействие электрической цепи прохождению электрического тока, называется **электрическим сопротивлением**.

Сопротивление проводника подсчитывается по формуле:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материалов, Ом мм<sup>2</sup>/м;

$l$  – длина проводника, м;

$S$  – площадь поперечного сечения, мм<sup>2</sup>.

Сопротивление – это свойство проводника. Иногда термин «сопротивление» употребляется также для обозначения устройств, предназначенных для регулирования в цепи тока (реостаты) и напряжения (потенциометры). Чтобы разделить эти два понятия, в радиотехнике элемент цепи, создающий сопротивление, называют «резистор».

Сопротивление проводника зависит от температуры:

$$R_{\Theta} = R_0 [1 + \alpha (\Theta - \Theta_0)],$$

где  $R_{\Theta}$  – сопротивление проводника при температуре  $\Theta$ ;

$R_0$  – сопротивление проводника при температуре  $\Theta_0$ ;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления,  $1/^{\circ}\text{C}$ .

Приведенное соотношение справедливо при не очень высоких температурах (ниже 100–150  $^{\circ}\text{C}$ ).

Коэффициенты  $\rho$  и  $\alpha$  получены экспериментально для всех материалов и приведены в справочниках.

Свойство материалов изменять свое электрическое сопротивление при нагреве или охлаждении используется для измерения температур.

Способность проводника пропускать электрический ток характеризуется **проводимостью**, которая представляет собой величину, обратную сопротивлению:

$$g = \frac{1}{\rho}, \quad \frac{1}{\text{Ом}} = \text{сименс} = \text{См}.$$

1 См – электрическая проводимость участка цепи с сопротивлением 1 Ом.

Аналогично удельная проводимость

$$\gamma = \frac{1}{\rho}.$$

## 1.9. Цепи неразветвленные и разветвленные. Законы Кирхгофа

Схема неразветвленной цепи представлена на рис. 1.6. На всех участках такой цепи ток один и тот же.

Разветвленная цепь содержит участки (ветви) с различными токами. Место соединения трех и более проводов называют узлом. Ветвь – это участок цепи, заключенный между двумя узлами. При обходе по

ветвям цепи можно получить контур (ячейку) – замкнутое очертание, образующее неразветвленную цепь.

В 1847 г. немецкий физик Кирхгоф экспериментально установил следующие зависимости (законы) между токами и напряжениями.

**Первый закон Кирхгофа (закон для токов).** Он применим к любому узлу электрической цепи.

Сумма токов, приходящих к узлу, равна сумме токов, уходящих от узла, или алгебраическая сумма токов в узле равна нулю:

$$\sum I = 0.$$

Если рассмотреть электрическую схему (рис. 1.7), то на основании первого закона Кирхгофа можно записать, что:

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

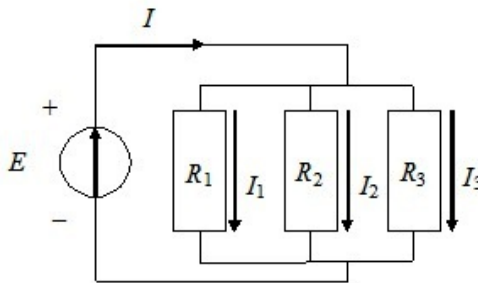


Рис. 1.7. Разветвленная электрическая цепь

**Второй закон Кирхгофа (закон для напряжений).** Он применим к любому контуру электрической цепи.

В контуре алгебраическая сумма электродвижущих сил равна алгебраической сумме падений напряжений:

$$\sum E = \sum IR.$$

Если рассмотреть электрическую схему (рис. 1.8), то на основании второго закона Кирхгофа можно записать, что:

$$E = U_1 + U_2 + U_3 + U_0,$$

где  $U_0 = IR_0$  – падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника.

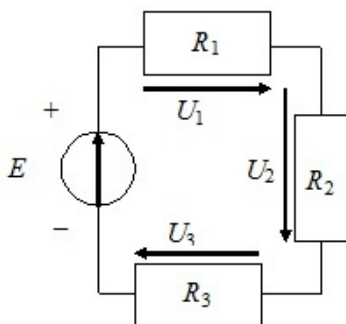


Рис. 1.8. Неразветвленная электрическая цепь

### 1.10. Цепи линейные и нелинейные

Ток в приемнике, согласно закону Ома, зависит от приложенного напряжения:  $I = U / R$ . Зависимость тока от напряжения называется вольтамперной характеристикой приемника. Для приемников, у которых сопротивление не изменяется ( $R = \text{const}$ ), вольтамперная характеристика описывается уравнением прямой ( $y = ax$ ), а на графике изображается прямой линией (рис. 1.9). Приемники, имеющие линейную вольтамперную характеристику, называются **линейными**.

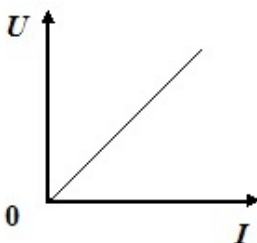


Рис. 1.9. Вольтамперная характеристика линейного элемента

Электрическая цепь, содержащая только линейные приемники, называется линейной.

Встречаются приемники, у которых сопротивление при изменении тока и напряжения не остается постоянным; вольтамперная характеристика такого приемника изображается некоторой кривой. Для примера на рис. 1.10 приведена вольтамперная характеристика диода – прибора для выпрямления тока. Приемники с нелинейной вольтамперной характеристикой называются нелинейными.

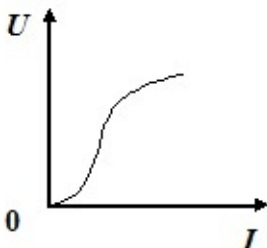


Рис. 1.10. Вольтамперная характеристика нелинейного элемента

К нелинейным приемникам относятся: полупроводниковые диоды, стабилитроны, электронные лампы и многие другие приборы. У них сопротивление уменьшается с увеличением силы тока. Тогда как у нагревательных приборов с увеличением силы тока сопротивление возрастает. Их вольтамперные характеристики приведены в электротехнических справочниках.

Электрическая цепь, содержащая хотя бы один нелинейный элемент, называется **нелинейной**.

Так как сопротивление проводника зависит от температуры, а последняя – от силы тока, то все реальные приемники в той или иной степени нелинейны.

Но в большом числе случаев изменением сопротивлений можно пренебречь и считать цепи линейными, т. е. состоящими из идеальных линейных приемников. Поэтому в дальнейшем мы будем изучать методы расчетов линейных цепей.

Вольтамперные характеристики источников электрической энергии, которые часто называют **внешними характеристиками**, также могут быть линейными и нелинейными. Внешняя характеристика линейного источника приведена на рис. 1.11.

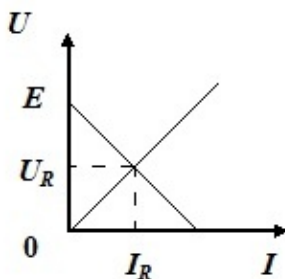


Рис. 1.11. Внешняя характеристика линейного источника

Для построения внешней характеристики источника постоянного тока по оси ординат в декартовой системе координат в масштабе нужно отложить напряжение  $U$ , а по оси абсцисс в соответствующем масштабе – силу тока  $I$ . Для этой цели мысленно проводят два опыта с простейшей цепью постоянного тока. Если сопротивление нагрузки  $R_n = \infty$ , то напряжение на клеммах источника равно ЭДС  $E$ , а сила тока  $I_n = 0$ ; если сопротивление нагрузки  $R_n = 0$ , то напряжение на клеммах источника равно нулю, а ток короткого замыкания  $I_{н.к}$  вычисляется по формуле

$$I_{н.к} = \frac{E}{R_0 + (R=0)} = \frac{E}{R_0}.$$

Таким образом получают крайние точки внешней характеристики источника постоянного тока: на оси ординат ( $U = E, I = 0$ ) и на оси абсцисс ( $U = 0, I = I_{н.к}$ ). Прямая, соединяющая эти точки, представляет собой искомую внешнюю характеристику источника постоянного тока, удовлетворяющую любому режиму его работы: от холостого хода до короткого замыкания.

На основании внешней характеристики можно определить возможность работы приемников электрической энергии с этим источником. Для этого совмещаем вольтамперную характеристику приемника электрической энергии с внешней характеристикой источника. Координаты точки пересечения этих характеристик дадут значения рабочей силы тока  $I_R$  и напряжения  $U_R$  на приемнике (рис. 1.11). Фактически на графике мы сразу видим, какое падение напряжения происходит на участке цепи с подключенным сопротивлением, и если оно большое,

то может произойти ситуация, когда второй подключенный приемник работать с данным источником не будет, так как оставшегося ему напряжения не хватает для полноценной работы.

### 1.11. Режимы работы источников и приемников электрической энергии

**Номинальный режим** – режим работы, на который рассчитан источник (или приемник) электрической энергии. Он определяется номинальным напряжением  $U_n$ , номинальным током  $I_n$ , номинальной мощностью  $P_n$ .

Номинальное напряжение по техническим и экономическим соображениям устанавливается Государственным стандартом. Для большинства генераторов постоянного тока приняты номинальные напряжения 115, 230 и 460 В; для приемников – 110, 220, 440 В. Номинальное напряжение  $U_n$  – основной параметр всякой электрической установки. По нему рассчитывается изоляция всех элементов цепи.

Номинальный ток  $I_n$  – предельный ток, при котором источник (приемник) может длительно работать, не перегреваясь сверх допустимой температуры. Ток, больший номинального, преждевременно выводит генератор или электроприемник из строя.

Эти два параметра – номинальный ток  $I_n$  и номинальное напряжение  $U_n$  – определяют номинальную мощность, т. е. наибольшую полезную мощность генератора, двигателя, ламп и нагревательных устройств:

$$P_n = U_n I_n.$$

**Режим холостого хода.** Цепь источника разомкнута,  $I_n = 0$ . Падение напряжения на внутреннем сопротивлении  $IR_0 = 0$ . Напряжение генератора равно его ЭДС.

**Режим короткого замыкания.** Он возникает при повреждении изоляции токоведущих частей или при случайном соединении зажимов источника. Сопротивление внешней цепи  $R$  практически станет равным нулю. В цепи установится ток короткого замыкания:

$$I_{н.к} = \frac{E}{R_0 + (R = 0)} = \frac{E}{R_0}.$$

Так как  $R_0$  очень мало, то  $I_{н.к} > I_{ном}$ . Это аварийный режим, т. е. режим, опасный для цепи. Он должен немедленно устраняться защитными устройствами, например, плавкими предохранителями. Иначе ток короткого замыкания приведет в негодность и сам источник, и включенные в цепь приборы.

**Согласованный режим.** Он создается искусственно в схемах радиоэлектроники и автоматики, где нужно передать от источника к приемнику наибольшую мощность. Это условие выполняется, если сопротивление приемника подобрать равным внутреннему сопротивлению источника:

$$I_{с.р} = \frac{E}{R_0 + (R = R_0)} = \frac{E}{2R_0}.$$

Таким образом получается, что  $I_{н.к} = 2I_{с.р}$ , т. е. сила тока при согласованном режиме в два раза меньше, чем при токе короткого замыкания.

Этот режим применяется в усилителях.

## 1.12. Расчет проводов

Под расчетом проводов обычно понимают выбор их сечения для заданных условий. Завышенное сечение вызывает перерасход металла, заниженное – перегрев проводов, изоляции, большие потери напряжения и мощности.

Чтобы чрезмерный нагрев провода не разрушил его изоляцию и не ослабил механические свойства, температура провода не должна превышать предельно допустимую температуру. Величина этой температуры нормируется ГОСТ. Например, провод с резиновой или полихлорвиниловой изоляцией не должен нагреваться выше  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , с бумажной изоляцией – не выше  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , голые провода – не выше  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Существует две методики расчета сечения провода: выбор проводов по нагреву и расчет на потерю напряжения.

**Выбор проводов по нагреву.** Величину допускаемого тока в проводе не рассчитывают, а определяют экспериментально и нормируют. Таблицы длительно допустимых токов на провода и кабели приведены во всех электротехнических справочниках. Весь расчет сводится к определению рабочего тока  $I_{раб}$  для заданного потребителя. Потом по

таблице справочника подбирается сечение провода, для которого допустимый ток равен или больше рабочего

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{раб}}$$

**Расчет на потерю напряжения.** Приемник рассчитан на номинальное напряжение  $U_{\text{н}}$ . Обычно он удален от генератора на расстояние  $l$ , и часть напряжения генератора теряется в линии. Поэтому напряжение генератора  $U_{\text{г}}$  поддерживают выше номинального напряжения приемника на 5 %. Так, если  $U_{\text{н}} = 220 \text{ В}$ , то  $U_{\text{г}} = 230 \text{ В}$ ;  $U_{\text{н}} = 110 \text{ В}$ , то  $U_{\text{г}} = 115 \text{ В}$ .

Любой приемник энергии очень чувствителен к изменениям напряжения, т. е. отклонениям его от номинального значения. Так, например, яркость лампы накаливания примерно пропорциональна четвертой степени напряжения, т. е. при понижении напряжения на 5 % световой поток лампы накаливания уменьшается на 18,5 %, а при повышении напряжения на 5 % сверх номинального – сокращает срок службы ее вдвое.

Сечение провода надо подобрать так, чтобы потеря напряжения в линии не превышала допустимого значения

$$\Delta U = U_{\text{г}} - U_{\text{н}}$$

В этом случае на приемнике будет номинальное напряжение.

Потеря напряжения в линии при силе тока  $I$  равна падению напряжения на сопротивлении проводов:

$$\Delta U = IR,$$

где сопротивление двух проводов линии

$$R = \rho \frac{2l}{s}$$

Отсюда для заданных значений длины линии  $l$ , тока в линии  $I$ , допустимого падения напряжения  $\Delta U$  и известном материале провода ( $\rho$ ) найдем сечение провода

$$s = \frac{2\rho I l}{\Delta U}$$

и округлим его до ближайшего стандартного.

Из двух сечений провода, найденных при расчете по нагреву и по потере напряжения, выбирают наибольшее.

Для защиты аппаратов, машин и приборов от чрезмерно больших токов устанавливают предохранительные устройства (предохранители, реле, автоматы), которые автоматически прерывают цепь тока, как только его величина превысит норму.

### 1.13. Расчет линейных цепей с одним источником питания

Суть расчета – найти один из трех параметров: либо ток  $I$ , либо напряжение  $U$  (ЭДС  $E$ ), либо сопротивление  $R$  при двух заданных параметрах. Будем различать задачи, когда к источнику подключен один приемник или несколько, соединенных между собой последовательно, параллельно или смешанно.

**Цепь с одним приемником (простая неразветвленная цепь)** (см. рис. 1.4). Задана ЭДС источника  $E$ , его внутреннее сопротивление  $R_0$ , мощность приемника  $P_n$  при номинальном напряжении  $U_n$ . Определить ток источника.

Мощность

$$P = UI,$$

а сила тока

$$I = \frac{U}{R}.$$

Тогда

$$P = \frac{U^2}{R}.$$

Определив отсюда сопротивление приемника, по закону Ома определяют силу тока в цепи:

$$I = \frac{E}{R_0 + R} = \frac{E}{R_0 + \frac{U^2}{P}}.$$

**Цепь с последовательно соединенными приемниками** (рис. 1.12, а).

Общее напряжение  $U$  равно сумме напряжений на отдельных участках (сопротивлениях):

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

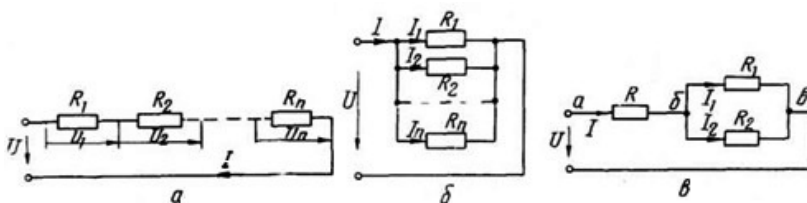


Рис. 1.12. Соединение приемников:  
*a* – последовательное; *б* – параллельное; *в* – смешанное

Применив для каждого участка закон Ома

$$I = \frac{U}{R} \rightarrow U = IR,$$

запишем это уравнение в виде:

$$U = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3) = IR_{\text{экв}},$$

где  $R_{\text{экв}}$  – общее (эквивалентное) сопротивление цепи.

Закон Ома для электрической цепи с последовательным соединением приемников примет следующий вид:

$$I = \frac{U}{R_{\text{экв}}}.$$

Если соединены последовательно  $n$  приемников, то их эквивалентное сопротивление равно сумме отдельных сопротивлений:

$$R_{\text{экв}} = \sum_{i=1}^n R_i.$$

**Цепь с параллельным соединением приемников** (рис. 1.12, *б*).

Все сопротивления присоединены к двум клеммам (узлам) и находятся под одним напряжением. По первому закону Кирхгофа

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Применяя для каждой ветви закон Ома, запишем:

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = U \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = U g_{\text{экв}},$$

где  $g_{\text{экв}}$  – эквивалентная проводимость цепи.

Если соединены параллельно  $n$  приемников, то их эквивалентная проводимость равна сумме проводимостей ветвей

$$g_{\text{эkv}} = \sum_{i=1}^n g_i.$$

Частные случаи:

1) разветвление, состоящее из двух приемников.

$$g_{\text{эkv}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}.$$

Отсюда

$$R_{\text{эkv}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Если  $R_1 = R_2$ , то

$$R_{\text{эkv}} = \frac{R}{2};$$

2) разветвление из  $n$  одинаковых приемников ( $R_1 = R_2 = \dots = R$ ).

$$g_{\text{эkv}} = \frac{1}{R_{\text{эkv}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} = \frac{n}{R}.$$

Отсюда

$$R_{\text{эkv}} = \frac{R}{n}.$$

Параллельное соединение – основная схема в электротехнике. По этой схеме нормально работают приемники любой мощности, рассчитанные на одно и то же напряжение. Включение либо отключение одного приемника не отражается на работе остальных приемников.

**Смешанное соединение** (рис. 1.12, *в*). Часть приемников соединена последовательно, часть – параллельно. Эквивалентное сопротивление такой цепи равно сумме сопротивлений последовательно включенных участков:

$$R_{\text{эkv}} = R_{\text{аб}} + R_{\text{об}} = R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Напряжения и токи отдельных ветвей определяются по формулам для последовательного и параллельного соединения.

## Лекция 2. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ В ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

### 2.1. Понятие о переменном токе

Электрическая энергия производится, распределяется и потребляется главным образом в виде энергии переменного тока. Это объясняется тем, что переменный ток высокого напряжения легко трансформировать (преобразовывать) в переменный ток низкого напряжения и обратно.

**Переменный ток** – ток определенной формы, периодически изменяющийся во времени. Из всех возможных форм периодических токов наибольшее распространение получили **синусоидальные токи**.

Если кривая изменения периодического тока описывается синусоидой или косинусоидой (рис. 2.1), то такой ток называют синусоидальным током. Синусоидальные токи позволяют наиболее экономично осуществлять производство, передачу и распределение электрической энергии. При этом форма кривых напряжений и токов всех участков цепи остается синусоидальной.

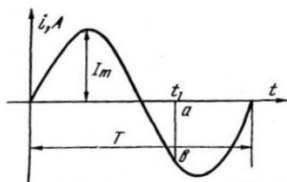


Рис. 2.1. График изменения синусоидального тока во времени

К основным понятиям синусоидальной функции относятся:

**Период  $T$**  – интервал времени, в течение которого функция проходит полный цикл своего изменения (измеряется в секундах, рис. 2.1).

**Частота  $f$**  – величина, обратная периоду. Численно равна числу периодов в одну секунду. Единица измерения – герц (Гц).

**Мгновенные значения** – значения изменяющихся во времени тока, напряжения, ЭДС, мощности в любой момент времени. Так, для

момента времени  $t_1$  (рис. 2.1) мгновенное значение тока равно отрезку  $ab$ . Очевидно, что на протяжении одного периода можно взять бесчисленное множество мгновенных значений. Мгновенные значения будем обозначать строчными буквами:  $i, u, e, p$ .

Основная особенность мгновенного значения в том, что на протяжении бесконечно малого промежутка времени  $\Delta t$  его можно считать величиной постоянной. Тогда к мгновенным значениям можно применять основные соотношения между электрическими величинами, установленными для цепей постоянного тока:

$$\begin{aligned}u &= Ri; \\ \Sigma i &= 0; \\ \Sigma e &= \Sigma u; \\ p &= ui = Ri^2.\end{aligned}$$

Амплитудное значение (**амплитуда**) – наибольшее (максимальное) мгновенное значение синусоидального тока (рис. 2.1), напряжения, ЭДС, мощности. Обозначается оно прописной буквой с индексом  $m$  (max):  $I_m, U_m, E_m, P_m$ .

## 2.2. Область применения синусоидальных токов различных частот

Производство и передача электрической энергии осуществляются с помощью трехфазного синусоидального тока с частотой 50 Гц (длительность периода 0,02 с).

Различные области техники используют диапазон частот в зависимости от технических потребностей. В авиации, например, успешно применяется синусоидальный ток с частотой 400 Гц, так как при такой частоте снижаются вес и габариты авиационного электрооборудования. В электротермических установках используют диапазон частот от 500 Гц до 50 МГц. Для нужд электрифицированного транспорта применяют пониженную частоту 25 и 16, 67 Гц.

Частоты можно разделить на 3 группы (рис. 2.2).

Обычно частоты от 20 Гц до 10 кГц называют низкими (НЧ). Частоты от 10 кГц до 100 МГц называют высокими (ВЧ). Частоты от 100 МГц и выше называют сверхвысокими (СВЧ).

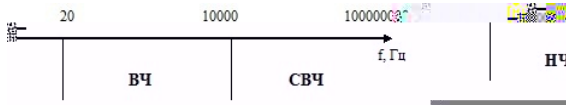


Рис. 2.2. Диапазоны частот

С увеличением частоты возрастает сопротивление проводника из-за явления, называемого **поверхностным эффектом**.

Если по проводу протекает постоянный ток, то плотность тока ( $A/cm^2$ ) по всей площади будет одинакова. Если пустить переменный ток, то из-за переменного магнитного потока возникают ЭДС, препятствующие основному напряжению. В результате этого ток в сечении провода распределяется не с одинаковой плотностью, а с увеличивающейся плотностью от оси к поверхности провода. Таким образом явление поверхностного эффекта как бы уменьшает полезное сечение провода и, следовательно, увеличивает сопротивление  $R$ .

При частоте тока 50 Гц и небольшом поперечном сечении проводника поверхностный эффект незначительно увеличивает сопротивление, поэтому сопротивление проводника в цепи переменного и постоянного токов примерно одинаково.

Радиотехника использует весь диапазон НЧ, ВЧ и СВЧ.

### 2.3. Получение синусоидальных ЭДС и тока

В равномерное магнитное поле поместим рамку, состоящую из одного витка (рис. 2.3). Рамка вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega = \text{const}$ . В соответствии с законом электромагнитной индукции в ней будет наводиться ЭДС, определяемая по формуле:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий рамку, зависит от положения рамки в магнитном поле, т. е. от угла  $\alpha$ :

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha = \Phi_m \cdot \cos \alpha,$$

где  $S$  – площадь рамки;

$\alpha$  – угол между направлением поля и нормалью к площади рамки;

$\Phi_m = B \cdot S$  – амплитудное (максимальное) значение магнитного потока.

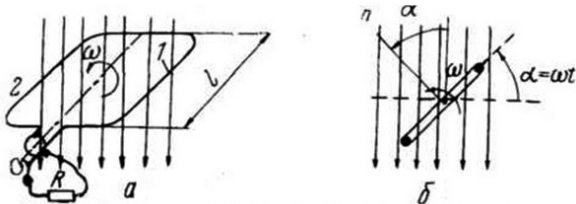


Рис. 2.3. Виток в однородном магнитном поле

Угол  $\alpha$  при вращении рамки изменяется:  $\alpha = \omega \cdot t$ . Значит, изменяется во времени и магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий рамку:

$$\Phi = \Phi_m \cdot \cos \omega t.$$

ЭДС в рамке:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(\Phi_m \cos \omega t) = \omega \Phi_m \sin \omega t.$$

Обозначив амплитуду  $\omega \Phi_m = E_m$ , запишем:

$$e = E_m \sin \omega t.$$

ЭДС витка, вращающегося в магнитном поле, изменяется во времени по синусоидальному закону. Если замкнуть цепь витка на внешнее сопротивление  $R$ , то в цепи возникнет синусоидальный ток, величина которого определится по формуле

$$i = I_m \sin \omega t.$$

## 2.4. Изображение синусоидальной величины вектором

Синусоидальную функцию времени можно выразить:

- а) графиком (рис. 2.1);
- б) уравнением  $i = I_m \cdot \sin \omega t$ ;
- в) вращающимся вектором, называемым радиус-вектором.

Последняя форма выражения синусоидальной функции наиболее наглядна и проста. Допустим, что вектор  $OA$  соответствует в принятом масштабе максимальному значению  $E_m$  синусоидальной функции  $e = E_m \cdot \sin \omega t$  (рис. 2.4).



Итак, изменение тока во времени определяется скоростью изменения угла при вращении вектора или скоростью вращения рамки (см. рис. 2.3) в магнитном поле. Эту скорость можно определить, измерив время, за которое рамка повернулась на угол  $\alpha$ :

$$\omega = \frac{\alpha}{t},$$

т. е. так же, как определяем, к примеру, скорость движущегося тела:

$$v = \frac{S}{t},$$

где  $S$  – расстояние, которое прошло тело за время  $t$ .

За время  $T$ , равное одному периоду изменения тока, рамка повернулась на угол  $\alpha = 360^\circ$ , т. е.  $2\pi$  рад:

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{T}.$$

Здесь  $1/T$  (частота) и тогда

$$\omega = 2\pi f.$$

Величина  $\omega = 2\pi f$  получила название **угловой частоты тока**. Для промышленной частоты тока  $f = 50$  Гц угловая частота тока

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с.}$$

## 2.6. Начальный фазовый угол и фазовые соотношения

Уравнение  $i = I_m \cdot \sin \omega t$  справедливо в частном случае, когда начало отсчета  $t_0$  совпадает с нулевым значением функции. Но в общем случае на оси времени можно выбрать любой момент отсчета (рис. 2.5). Из графика видно, что в этот момент времени мгновенное значение тока

$$i = I_m \sin \varphi t,$$

где  $\varphi$  – угол, соответствующий положению вектора в момент времени, принятый за начало отсчета.

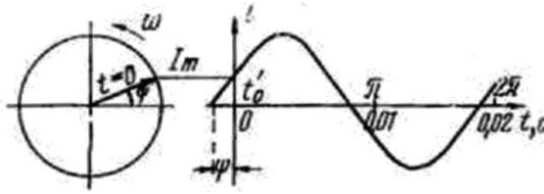


Рис. 2.5. Синусоида с учетом начального фазового угла

В общем виде, для любого момента времени, синусоидальная величина выражается уравнением:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi).$$

Угол  $\varphi$ , определяющий значение ЭДС или тока в начальный момент времени ( $t = 0$ ), получил название **начального фазового угла**.

Две рамки одинакового размера, укрепленные на оси (рис. 2.6, а), вращаются в магнитном поле с одинаковой угловой скоростью  $\omega$ . В рамках индуцируются ЭДС:

$$e = E_m \sin(\omega t + \alpha_1);$$

$$e = E_m \sin(\omega t + \alpha_2).$$

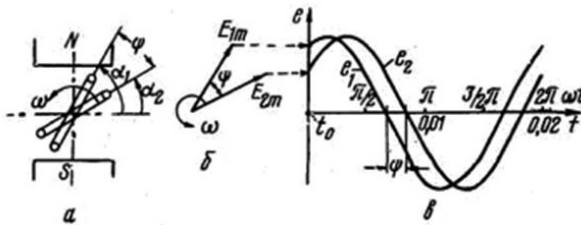


Рис. 2.6. Сдвиг по фазе

Угол  $\varphi = \alpha_1 - \alpha_2$  получил название **сдвига по фазе**, или угла сдвига фаз. Говорят, что ЭДС  $e_2$  отстает по фазе от ЭДС  $e_1$  на угол  $\varphi$ , или ЭДС  $e_1$  опережает ЭДС  $e_2$  на угол  $\varphi$  (рис. 2.6, б). Опережение или отставание функции удобнее всего проследить на векторной диаграмме (рис. 2.6, в). Здесь вектор  $E_{1m}$  при своем вращении приходит раньше на вертикальную ось, чем отстающий вектор  $E_{2m}$ .

Если две синусоидальные функции проходят через нулевые и максимальные значения одновременно, то говорят, что они **совпадают по фазе** ( $\varphi = 0$ ). Векторы, их выражающие, совпадают по направлению. На рис. 2.7 представлены векторы и ЭДС двух рамок различного размера, которые не имеют угла сдвига между собой.

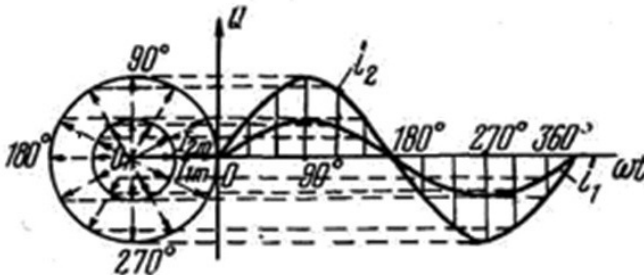


Рис. 2.7. Совпадение по фазе

## Лекция 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### 3.1. Классификация электрических цепей переменного тока

Электрической цепью называется совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об ЭДС, токе, напряжении. Электрические цепи переменного тока по количеству фаз разделяются на однофазные и многофазные.

Из многообразных электрических цепей широкое практическое применение имеют трехфазные электрические цепи. По типу элементов, включенных в цепь, электрические цепи разделяются на линейные и нелинейные. Электрическая цепь, электрическое сопротивление, индуктивность и электрическая емкость участков которой не зависят от значений и направлений токов и напряжений в цепи, называется **линейной**. Сопротивление линейных элементов **не зависит** также от температуры.

Вольтамперная характеристика линейного элемента изображается прямой линией. Строго говоря, **реальные** электрические и радиотехнические цепи **не подчиняются линейному закону**. С изменением тока в индуктивной катушке с железным сердечником индуктивность  $L$

не остается постоянной, не остается постоянной и емкость  $C$  конденсатора с различными диэлектриками при изменении напряжения. Сопротивления всех приемников в той или иной мере зависят от температуры. Металлические проводники при нагревании увеличивают сопротивления, электролиты – уменьшают, сопротивление полупроводников и диэлектриков также изменяется при нагревании. Но учитывая, что в электрических цепях ряд приемников нагревается незначительно, изменением сопротивления этих приемников можно пренебречь и электрическую цепь считать линейной. В линейных цепях индуктивность  $L$  и емкость  $C$  цепи не зависят от значения и направления тока и напряжения.

Электрическая цепь, электрическое сопротивление, индуктивность или емкость хотя бы одного из участков которой зависят от значений или от направлений токов и напряжений в этом участке цепи, называется **нелинейной электрической цепью**.

Нелинейные электрические цепи имеют нелинейные элементы. Вольтамперная характеристика нелинейного элемента изображается кривой линией. Примером нелинейных элементов являются вентили, электронные лампы, термосопротивления, лампы накаливания.

В дальнейшем будем изучать линейные электрические цепи. Электрические цепи бывают с последовательным соединением приемников (неразветвленные электрические цепи), с параллельным соединением приемников (разветвленные электрические цепи) и со смешанным соединением приемников.

### **3.2. Цепь переменного тока с активным сопротивлением**

Величина электрического тока зависит от ЭДС источника переменного тока, а также от величины и характера сопротивления цепи. Предположим, что в электрическую цепь включены источник переменного тока и резистор (рис. 3.1, *a*).

Резистор является линейным элементом цепи и обладает активным сопротивлением. Активное сопротивление имеют также реостаты и электронагревательные приборы (лампы накаливания, электропечи, электроплиты и др.). На активном сопротивлении электрическая энергия превращается в другие виды энергии. Кроме того, в силу поверхностного эффекта оно обладает большим сопротивлением переменному току, чем постоянному. Поэтому в цепи постоянного тока в отличие от сопротивления переменному току его называют омическим сопротивлением.

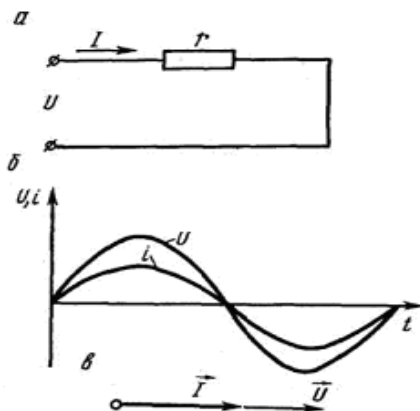


Рис. 3.1. Цепь переменного тока с активным сопротивлением:  
*a* – схема; *б* – графики; *в* – векторная диаграмма тока и напряжения

Пусть напряжение в цепи меняется по синусоидальному закону:

$$u = U_m \sin \omega t.$$

Величина мгновенного тока в цепи определяется по закону Ома:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t,$$

где

$$I_m = \frac{U_m}{R} \text{ или } I = \frac{U}{R}.$$

Следовательно, закон Ома для действующих значений примет такой же вид, как и для постоянного тока. Таким образом, ток в цепи с активным сопротивлением также изменяется по синусоидальному закону и совпадает по фазе с напряжением. Графически это можно представить в виде двух синусоид (рис. 3.1, б) или векторной диаграммы с помощью двух совпадающих по направлению векторов (рис. 3.1, в).

Совокупность векторов, изображающих действующие или амплитудные значения синусоидальных электрических величин одинаковой частоты, называется **векторной диаграммой**. При построении вектор-

ных диаграмм один из векторов обычно совмещают с осью  $x$ , а другие размещают по одну или другую сторону ее согласно сдвигу фаз.

Чаще всего при построении векторных диаграмм пользуются действующими значениями электрических величин, с которыми больше приходится иметь дело при расчете электрических цепей. Мгновенные значения не определяют значения тока за некоторый промежуток времени. Поэтому для суждения о величине переменного тока его приравнивают к величине такого эквивалентного постоянного тока, который, протекая по такому же сопротивлению, что и переменный ток, производит одинаковое с ним тепловое действие, т. е. за один и тот же промежуток времени выделяет одинаковое количество тепла. Такая величина переменного тока называется **действующей**.

Очевидно, что действующее значение тока меньше амплитудного:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m.$$

Подобное соотношение справедливо и для определения действующих значений других синусоидальных величин (ЭДС, напряжения и др.).

Электроизмерительные приборы дают показания действующих значений. Таким образом, если, например, вольтметр показывает напряжение 110 В, то максимальное значение этого напряжения равно  $U_m = 110 / 0,707 = 155,54$  В.

### **3.3. Цепь переменного тока с активным и индуктивным сопротивлением**

Трансформаторы, электродвигатели, дроссели кроме активного сопротивления обладают также и индуктивным сопротивлением.

Активное сопротивление любой катушки определяется лишь сопротивлением обмоточного материала, поэтому его значение незначительно. В связи с этим при подключении катушки в сеть постоянного напряжения ток в цепи достиг бы очень большой величины. При переменном напряжении ток в катушке будет иметь меньшую величину. Это объясняется появлением ЭДС самоиндукции.

ЭДС самоиндукции противодействует подведенному напряжению. Это ведет к уменьшению тока в цепи, следовательно, ЭДС самоиндукции обуславливает дополнительное сопротивление. В этом можно убедиться на опыте, если собрать электрическую цепь из последовательно соединенных лампового реостата и катушки трансформатора с

железным сердечником и включить в розетку сети переменного тока. При замыкании сердечника лампы гаснут, и наоборот, при размыкании сердечника накал ламп увеличивается. Это объясняется тем, что при замыкании сердечника увеличивается индуктивность катушки, а значит, увеличивается и ее индуктивное сопротивление.

Соберем цепь из последовательно соединенных резистора и катушки индуктивности (рис. 3.2, *a*). При прохождении по катушке переменного тока в ней возбуждается ЭДС самоиндукции:

$$e_L = -L \frac{di}{dt},$$

где  $L$  – индуктивность катушки, Гн;

$di/dt$  – производная тока по времени, характеризующая скорость изменения тока.

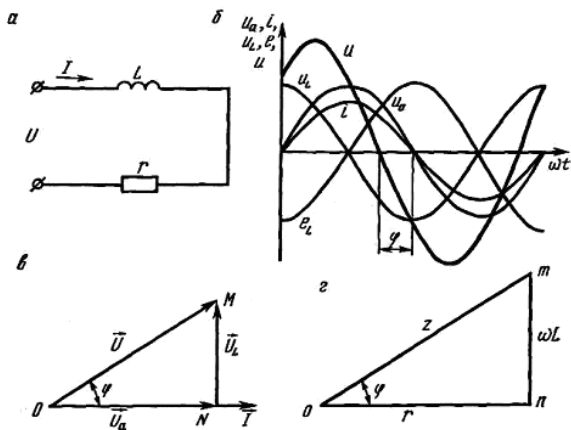


Рис. 3.2. Цепь переменного тока с активным и индуктивным сопротивлением:  
*a* – схема; *б* – графики; *в* – векторная диаграмма тока и напряжения;  
*г* – треугольник сопротивлений

Следовательно, на величину тока в цепи влияет не только мгновенное подведенное напряжение, но и ЭДС самоиндукции. Мгновенное значение тока определится по закону Ома:

$$i = \frac{u + e_L}{R} = \frac{u - L \frac{di}{dt}}{R}.$$

Отсюда

$$u = iR + L \frac{di}{dt}.$$

Пусть ток в цепи изменяется по синусоидальному закону:

$$i = I_m \sin \omega t.$$

Тогда

$$u = I_m R \sin \omega t + I_m L \omega \cos \omega t.$$

Выразим функцию косинуса через синус:

$$u = I_m R \sin \omega t + I_m L \omega \sin(\omega t + 90^\circ).$$

Таким образом, мгновенное значение напряжения состоит из двух слагаемых. Первое представляет собой падение напряжения на активном сопротивлении цепи и называется активной составляющей напряжения:

$$U_R = IR \sin \omega t$$

и второе – падение напряжения на индуктивном сопротивлении и называется индуктивной составляющей напряжения:

$$U_L = IX_L \sin \omega t,$$

где  $X_L$  – индуктивное сопротивление, Ом.

$$X_L = \omega L = 2\pi fL.$$

Так как природа индуктивного сопротивления отличается от активного, его принято считать **реактивным сопротивлением**.

Активная составляющая напряжения совпадает по фазе с током, а индуктивная – опережает его на  $90^\circ$  (рис. 3.2, в). Отставание тока по фазе на  $90^\circ$  от напряжения на индуктивном сопротивлении объясняется тем, что в индуктивном сопротивлении возникает ЭДС самоиндукции  $e_L$ , величина которой пропорциональна скорости изменения тока. Следовательно, в момент прохождения тока через нуль  $di/dt$  принимает максимальное значение, а когда ток принимает максимальное значение,

ние, ЭДС самоиндукции равна нулю. Таким образом, ток опережает ЭДС самоиндукции по фазе на  $90^\circ$ . А так как, по правилу Ленца, ЭДС самоиндукции имеет противоположное направление напряжению  $U_L$ , то по отношению к нему ток отстает по фазе на  $90^\circ$  (рис. 3.2, б).

### 3.4. Цепь переменного тока с емкостным сопротивлением

Емкостное сопротивление в цепи создает элемент под названием конденсатор.

Составив электрическую цепь из конденсатора и амперметра и подключив ее к источнику постоянного тока, убеждаемся в отсутствии тока в цепи. Следовательно, для постоянного тока при установившемся режиме конденсатор создает разрыв цепи. Подключив данную цепь к источнику переменного тока (рис. 3.3, а), замечаем отклонение стрелки амперметра, т. е. наличие в цепи переменного тока.

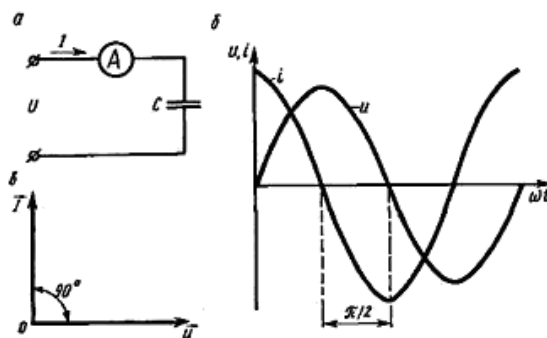


Рис. 3.3. Цепь переменного тока с емкостным сопротивлением: а – схема; б – графики; в – векторная диаграмма тока и напряжения

**Конденсатором** называется система двух проводников, разделенных диэлектриком. Проводники называются **обкладками конденсатора**. При прохождении постоянного тока через конденсатор происходит его заряд (рис. 3.4, а) до напряжения между обкладками  $U$ , равного ЭДС источника  $E$ . Если заряженный конденсатор замкнуть на какое-либо сопротивление  $R$  (рис. 3.4, б), то под действием напряжения на конденсаторе будет протекать ток разряда.

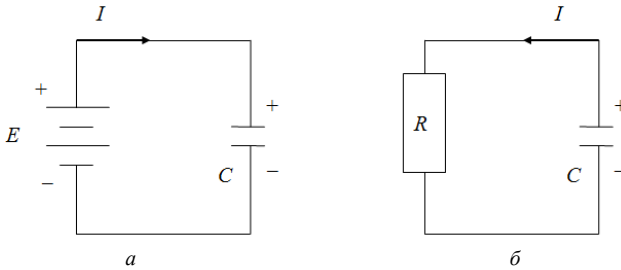


Рис. 3.4. Заряд (а) и разряд (б) конденсатора

Если рассматривать процессы, происходящие в цепи, содержащей конденсатор и источник переменного тока, то нетрудно заметить, что эти процессы сводятся к периодическому заряду и разряду конденсатора. Поэтому создается впечатление, что переменный ток проходит через конденсатор.

Ток в конденсаторе в отличие от тока проводимости, т. е. направленного движения свободных зарядов в подводящих проводах, называется **током смещения**. Это теоретическая величина, введенная Максвеллом, характеризует изменяющееся со временем электрическое поле. Током она называется из-за одинаковых единиц измерения с плотностью тока. В действительности «ток смещения» – это условный термин: из всех физических свойств, присущих действительному току, он способен только создавать магнитное поле.

Величина этого тока будет определяться скоростью изменения величины заряда на обкладках конденсатора, т. е.

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

Но так как количество зарядов в конденсаторе зависит от его емкости  $C$ ,  $\Phi$  (фарада)

$$q = Cu,$$

то получим

$$i = C \frac{du}{dt}.$$

Пусть напряжение в цепи меняется по синусоидальному закону:

$$u = U_m \sin \omega t.$$

Определим значение мгновенного тока:

$$i = C \frac{du}{dt} = U_m C \omega \cos \omega t = U_m C \omega \sin(\omega t + 90^\circ).$$

Таким образом, в цепи переменного тока при емкостной нагрузке ток опережает напряжение по фазе на  $90^\circ$ . Графики тока и напряжения и векторная диаграмма приведены на рис. 3.3, б, в.

Сдвиг фаз между током и напряжением при емкостной нагрузке можно наблюдать на опыте, если в цепь переменного тока, состоящую из реостата и батареи конденсаторов, подключить осциллограф с коммутатором. На экране наблюдаются две синусоиды. Синусоида тока будет смещена влево относительно синусоиды напряжения на  $90^\circ$ . Это объясняется тем, что в момент максимума напряжения на обкладках конденсатора скорость изменения поляризации диэлектрика минимальна (образование диполей и их ориентация к этому моменту завершаются). Наибольшая скорость поляризации диэлектрика, а следовательно, и величина тока смещения достигаются в момент, когда напряжение на обкладках конденсатора меняет свое направление, т. е. переходит через нуль.

Амплитудное значение тока

$$I_m = U_m C \omega,$$

а действующее

$$I = UC\omega,$$

откуда

$$I = \frac{U}{\frac{1}{C\omega}} = \frac{U}{X_C},$$

где  $X_C$  – емкостное сопротивление, Ом.

$$X_C = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{2\pi fC}.$$

Емкостное сопротивление, так же как и индуктивное, с физической точки зрения не похоже на активное сопротивление. Величина емкостного сопротивления определяется «упругостью» поляризации диэлектрика конденсатора. Чем больше «упругость» поляризации диэлектрика, тем меньше смещение его связанных зарядов и меньше ток смещения. Величина емкостного сопротивления обратно пропорциональна частоте тока и емкости конденсатора.

Емкостное сопротивление наряду с индуктивным также является реактивным.

### 3.5. Электрическая цепь переменного тока с последовательным соединением сопротивлений

В практике часто приходится иметь дело с электрической цепью, обладающей активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями (рис. 3.5, а).

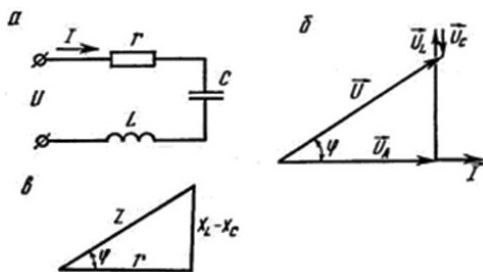


Рис. 3.5. Цепь переменного тока с активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями:

а – схема; б – векторная диаграмма тока и напряжений; в – треугольник сопротивлений

При последовательном соединении сопротивлений по ним будет протекать одинаковый ток. Напряжение, подведенное к цепи, равно геометрической сумме напряжений отдельных участков цепи:

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C.$$

Вектор падения напряжения на индуктивном сопротивлении  $\vec{U}_L$  и вектор падения напряжения на емкостном  $\vec{U}_C$  сдвинуты по фазе между

собой на  $180^\circ$ , так как на индуктивном сопротивлении напряжение опережает ток по фазе на  $90^\circ$ , а на емкостном сопротивлении напряжение отстает по фазе на  $90^\circ$  (рис. 3.5, б). Пусть  $U_L$  больше по абсолютному значению, чем  $U_C$ . Тогда из треугольника напряжений имеем:

$$U^2 = U_R^2 + (U_L + U_C)^2;$$

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{I^2 R^2 + I^2 \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}.$$

Выразим из получившегося выражения силу тока и получим закон Ома для цепи переменного тока:

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

где  $Z$  – полное сопротивление электрической цепи, Ом.

$$Z = \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}.$$

Поделив стороны треугольника напряжения на величину тока, получим подобный треугольник сопротивлений (рис. 3.5, в).

Полное сопротивление  $Z$  можно определить из треугольника сопротивлений. Для случая, когда в цепи емкостное сопротивление больше индуктивного, угол сдвига фаз между током и общим напряжением в цепи  $\varphi$  будет отрицательным. Угол сдвига фаз между током и напряжением определяется по формулам

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}; \quad \sin \varphi = \frac{X_L - X_C}{Z}; \quad \tan \varphi = \frac{X_L - X_C}{R}.$$

Пусть в электрическую цепь включено несколько активных, индуктивных и емкостных сопротивлений (рис. 3.6, а). Из курса физики известно, что при последовательном соединении сопротивлений общее сопротивление цепи равно сумме сопротивлений ее участков.

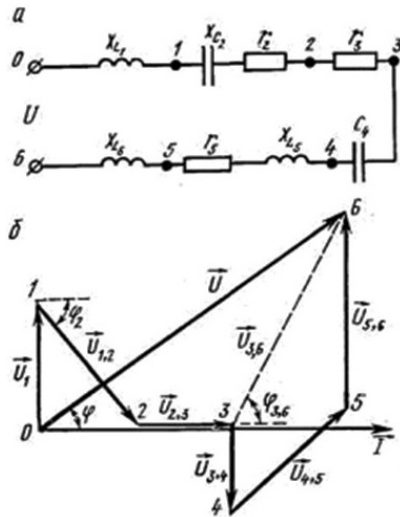


Рис. 3.6. Последовательное соединение приемников электрической энергии:  
*a* – схема; *б* – топографическая диаграмма

В цепи переменного тока отдельно складываются активные, индуктивные и емкостные сопротивления, а полное сопротивление цепи равно:

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

Сумма сопротивлений всех последовательно соединенных участков цепи называется **эквивалентным сопротивлением**.

Ток является общим для всех участков цепи и определяется по закону Ома:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}.$$

Для расчета цепей с последовательным соединением активных, индуктивных и емкостных сопротивлений применяется метод топографических диаграмм. **Топографической диаграммой** называется векторная диаграмма напряжений, расположенных в очередной последовательности элементов цепи. Каждой точке схемы электрической цепи соответствует точка на топографической диаграмме. При построении

топографических диаграмм за исходный вектор берется вектор действительного значения тока, так как он для всех участков цепи является одинаковым. Векторы падения напряжения на отдельных участках цепи размещаются в очередной последовательности элементов цепи с соответствующим сдвигом фаз.

Для цепи, показанной на рис. 3.6, *а*, топографическая диаграмма изображена на рис. 3.6, *б*. Начало вектора напряжения первого участка цепи совмещают с началом вектора тока и размещают на диаграмме вертикально вверх, так как на индуктивном сопротивлении напряжение опережает ток на  $90^\circ$ . Начало вектора напряжения второго участка цепи совмещают с концом вектора напряжения первого участка и размещают под соответствующим углом сдвига фаз ( $-\varphi_2$ ), так как на этом участке включен конденсатор с активным сопротивлением. Начало вектора напряжения третьего участка цепи совмещают с концом вектора напряжения второго участка цепи и размещают параллельно вектору тока, так как на активном сопротивлении напряжение совпадает по фазе с током ( $\varphi_3 = 0$ ), и т. д. Все векторы напряжения берутся в масштабе соответственно их числовым значениям. Напряжением всей цепи является вектор, замыкающий начало вектора первого участка цепи с концом вектора напряжения последнего участка цепи. Величина вектора напряжения всей цепи определяется по масштабу, а угол  $\varphi$  измеряется.

Ценность топографических диаграмм состоит в наглядном представлении напряжений и сдвига фаз между током и напряжением на отдельных участках цепи. Например, напряжение на участке 3–6 определяется вектором  $U_{3,6}$ , а сдвиг фаз между током и напряжением – углом  $\varphi_{3,6}$ .

Рассмотрим частный случай последовательного включения активного, индуктивного и емкостного сопротивлений, когда разность реактивных сопротивлений  $X_L - X_C = 0$ , т. е.  $X_L = X_C$ . Этот случай получил название **резонанса напряжений**.

При резонансе напряжений ток в цепи определяется одним лишь активным сопротивлением и достигает наибольшей величины. Угол сдвига фаз между напряжением и током становится равным нулю, так как  $\cos \varphi = 1$ . Индуктивное  $U_L$  и емкостное  $U_C$  напряжения могут значительно превышать общее напряжение  $U$ , приложенное к цепи, так как  $U = U_R$ . Это может привести к перенапряжению и пробоем изоляции, если сопротивление катушки или конденсатора изменится в процессе работы.

Резонанс напряжений используется в радиотехнике при настройке радиоприемников на частоту передающей станции.

### 3.6. Электрическая цепь переменного тока с параллельным соединением сопротивлений

В цепи переменного тока с параллельным включением потребителей (рис. 3.7, а) напряжение является одинаковым для всех потребителей, а ток в каждой ветви определяется соотношением:

$$I_1 = \frac{U}{Z_1}; \quad I_2 = \frac{U}{Z_2}.$$

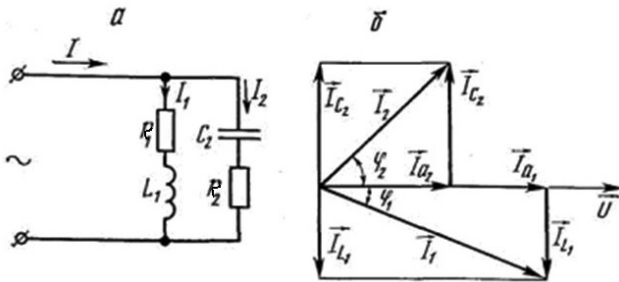


Рис. 3.7. Цепь переменного тока с параллельным соединением сопротивлений: а – схема; б – векторная диаграмма

Ток в неразветвленной части цепи представляет геометрическую сумму токов в отдельных ветвях:

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

Сдвиг фаз между напряжением и током в ветвях можно определить по формулам

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1}; \quad \cos \varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2}.$$

При построении векторной диаграммы для разветвленной цепи исходным вектором принимается вектор напряжения, а вектор тока в неразветвленной части цепи равен геометрической сумме векторов токов ветвей. Так как в нашем примере цепь состоит из двух ветвей, то по-

строение векторной диаграммы осуществляется с помощью **метода параллелограмма**. Суть этого метода заключается в построении двух недостающих сторон до получения параллелограмма, а вектор общей силы тока является диагональю получившегося параллелограмма.

Рассмотрим **аналитический метод** расчета разветвленных цепей синусоидального тока. Этот метод заключается в следующем: вектор тока каждой ветви проецируется на направление вектора напряжения и на направление, перпендикулярное к нему (рис. 3.7, б). Получили треугольники токов, из которых находим активную и реактивную составляющие тока каждой ветви:

$$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1; \quad I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1; \quad I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2; \quad I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2.$$

Активный ток неразветвленной части цепи равен арифметической сумме активных токов ветвей, а реактивный – алгебраической сумме реактивных токов ветвей.

Следовательно,

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}.$$

В неразветвленной части цепи ток является одинаковым для всех участков, а напряжение распределяется пропорционально сопротивлениям участков цепи и равно геометрической сумме напряжений на участках цепи. В разветвленной цепи напряжение одинаково для всех параллельных ветвей, а ток цепи распределяется в ветвях обратно пропорционально сопротивлениям ветвей и равен геометрической сумме токов ветвей.

Для расчета разветвленных электрических цепей применяется **метод проводимостей**. Полной проводимостью принято называть величину, обратную полному сопротивлению:

$$y = \frac{1}{Z},$$

где  $y$  – полная проводимость, См.

Полный ток, активная и реактивная составляющие его запишутся в таком виде:

$$I = \frac{U}{Z} = Uy; \quad I_a = I \cos \varphi = Uy \cos \varphi; \quad I_p = I \sin \varphi = Uy \sin \varphi.$$

По аналогии с понятием активного и реактивного сопротивления активной проводимостью будем считать  $y \cos \varphi$  и обозначим ее  $g$ , а реактивной проводимостью –  $y \sin \varphi$  и обозначим ее  $b$ , т. е.

$$g = y \cos \varphi; b = y \sin \varphi,$$

где

$$b = b_L - b_C.$$

Тогда уравнения токов примут вид:

$$I = Uy; I_a = Ug; I_p = Ub.$$

Из последних расчетов видно, что, поделив стороны треугольника токов на напряжение, получим подобный треугольник проводимостей. Из треугольника проводимостей имеем

$$y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}.$$

Сумма проводимостей всех ветвей, соединенных параллельно, называется **эквивалентной проводимостью**.

Активная проводимость участка цепи с параллельным соединением потребителей равна сумме активных проводимостей ветвей, а реактивная проводимость – алгебраической сумме реактивных проводимостей. Проводимость индуктивности положительна, а проводимость емкости отрицательна.

При расчете электрических цепей приходится проводимости выражать через сопротивления, и наоборот. Для этого используются следующие зависимости:

$$R = \frac{g}{y^2}; X = \frac{b}{y^2}.$$

Для определения тока в неразветвленной части цепи можно не находить геометрической суммы токов, а определить сначала полную проводимость цепи и полученный результат умножить на напряжение.

Сдвиг фаз между током и напряжением в неразветвленной части цепи может быть определен по одной из следующих формул:

$$\cos \varphi = \frac{g}{y}; \sin \varphi = \frac{b_L - b_C}{y}; \tan \varphi = \frac{b_L - b_C}{g}.$$

Наличие конденсатора в одной из двух параллельных ветвей снижает ток в неразветвленной части электрической цепи. Если подобрать емкость конденсатора или индуктивность катушки таким образом, чтобы их проводимости были равны, ток в неразветвленной части цепи достигнет минимальной величины, а угол сдвига фаз  $\varphi = 0^\circ$ . Такой случай получил название **резонанса токов**.

Так как при резонансе токов в неразветвленной части цепи ток имеет минимальную величину, то потери в соединительных проводах и в обмотках источника электрической энергии минимальны. Подключение конденсатора параллельно цепи, обладающей активным и индуктивным сопротивлениями, повышает коэффициент мощности  $\cos \varphi$ .

### 3.7. Электрическая цепь переменного тока со смешанным соединением сопротивлений

Электрическая цепь, содержащая в себе элементы последовательного и параллельного соединения и поэтому не отнесенная к тому или иному способу соединения, называется цепью со смешанным соединением. Для того чтобы рассчитать такую цепь, ее необходимо преобразовать либо в цепь с параллельным соединением, либо в цепь с последовательным соединением и использовать формулы для соответствующего типа соединения.

При смешанном соединении потребителей приведенной электрической цепи (рис. 3.8) сначала определяют проводимости участков цепи  $AB$  и  $BC$ , а потом находят сопротивления этих участков. Далее рассматривается эквивалентная цепь с последовательным соединением сопротивлений участков и параллельного сопротивления  $X_5$ .

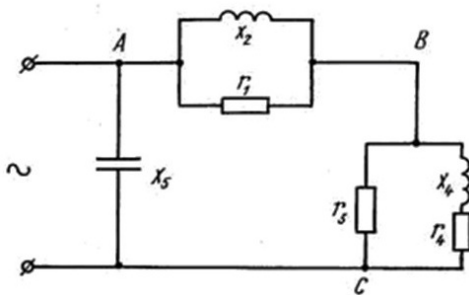


Рис. 3.8. Схема электрической цепи со смешанным соединением сопротивлений

## Лекция 4. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### 4.1. Коэффициент мощности, его значение и способы улучшения

Полная мощность, потребляемая из сети, состоит из активной  $P$  и реактивной  $Q$  составляющих:

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

Если построить треугольник мощностей (рис. 4.1), то он окажется прямоугольным с катетами активной  $P$  (Вт) и реактивной  $Q$  (вар) мощностей и гипотенузой полной  $S$  (ВА) мощности.

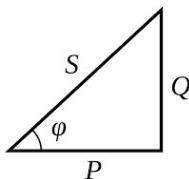


Рис. 4.1. Треугольник мощностей

Объяснение понятия реактивной мощности основывается на том, что в системе переменного тока в случае, когда напряжение и ток возрастают и уменьшаются одновременно, передается только активная мощность, а когда между током и напряжением есть сдвиг во времени (сдвиг по фазе), передается как активная, так и реактивная мощность. Однако при расчете среднего за период значения присутствует только среднее значение активной мощности, которое приводит к «чистой» передаче энергии из одной точки в другую, тогда как среднее значение реактивной мощности равно нулю, независимо от структуры и режима работы системы.

В случае реактивной мощности количество энергии, протекающее в одном направлении, равно количеству энергии, протекающему в противоположном направлении (иначе говоря, реактивные элементы сети – конденсаторы, индуктивности и др. – обмениваются реактивной энергией). Это означает, что реактивная мощность не производится и не потребляется.

В математическом смысле «полная» энергия не имеет значения для потребителя энергии; следовательно, он должен заботиться об эффек-

тивности ее преобразования и сохранения. Точно так же, несмотря на то, что мы можем доказать математически, что потери реактивной мощности не являются реальными потерями и реактивная энергия вообще не тратится, у нас есть целый ряд причин для компенсации реактивной мощности. Это проще объяснить на основе физических аналогий.

Предположим, нам надо заполнить водой резервуар, выливая по одному ведру зараз. Единственный способ сделать это – подняться по лестнице с ведром воды и вылить ведро в емкость. Вылив ведро, мы должны спуститься по лестнице за следующим ведром. За этот цикл (подъем по лестнице и спуск) мы проделали определенную работу, причем энергия, затраченная на подъем, больше энергии, требуемой для спуска.

Если бы мы поднялись по лестнице с пустым ведром и с ним же спустились, то мы не совершили бы никакой работы. Но энергия для подъема и спуска осталась бы такой же. И хотя мы не совершали никакой полезной работы, мы затратили некоторое количество энергии.

Таким образом, энергия, необходимая на подъем и спуск по лестнице с пустыми руками, требует реактивной мощности, но не полезной. А энергия, затраченная на подъем с ведром воды и спуск с пустым ведром, требует как активной мощности, так и реактивной.

Отношение активной мощности к полной называют коэффициентом мощности  $\cos \varphi$ , значение которого определяется по формуле

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}.$$

Коэффициент  $\cos \varphi$  показывает, какая часть полной мощности расходуется на полезную работу. Отсюда активная мощность:

$$P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi,$$

где  $U$  – напряжение, В;

$I$  – сила тока, А;

$\cos \varphi$  – коэффициент мощности.

Выразим из этого выражения силу тока

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}.$$

Как показывает последнее выражение, при одной и той же развиваемой мощности, сила тока, поступающая из сети, зависит от значения  $\cos \varphi$ . Низкий  $\cos \varphi$  приводит к увеличению силы тока, сечения проводов, потерь в них мощности, к недоиспользованию мощности генераторов станций и трансформаторов подстанций.

Согласно «Правилам устройства электроустановок» (ПУЭ)  $\cos \varphi$  не должен быть ниже 0,92–0,97. В зависимости от коэффициента мощности разработана шкала скидок и надбавок на пользование электроэнергией.

Коэффициент мощности повышают *естественным* (без применения специальных устройств) и *искусственным* (с применением различных компенсирующих устройств) способами.

Основным источником реактивной мощности на сельскохозяйственных предприятиях является асинхронный электродвигатель. Для естественного способа повышения  $\cos \varphi$  асинхронного двигателя характерны следующие мероприятия:

- 1) правильный подбор электродвигателя к рабочим машинам;
- 2) полная его загрузка (не ниже 75 % номинальной мощности);
- 3) ограничение работы электродвигателя на холостом ходу;
- 4) обеспечение номинального напряжения на его зажимах;
- 5) высококачественный ремонт;
- 6) соединение обмоток электродвигателя в звезду при нагрузке менее 50 % номинальной мощности, если он нормально работает при соединении обмоток в треугольник.

Искусственный способ повышения  $\cos \varphi$  более эффективен. Прибегая к этому способу, в сеть включают перевозбужденные синхронные электродвигатели (синхронные компенсаторы) или специальные конденсаторы (последние имеют малые потери мощности, бесшумны в работе, надежны, просты и удобны в эксплуатации).

## 4.2. Получение трехфазного переменного тока

*Трехфазной цепью переменного тока* называется совокупность трех однофазных цепей, имеющих ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе. Однофазные цепи, входящие в состав трехфазной цепи, называются *фазами трехфазной цепи*. Совокупность ЭДС, напряжений и токов трехфазной цепи называется *трехфазной системой*. При сдвиге фаз между ЭДС, напряжениями и токами на  $120^\circ$  и равенстве их амплитудных значений трехфазная система называется *симметричной*.

Источниками тока трехфазной системы являются трехфазные генераторы. Простейший трехфазный генератор (рис. 4.2, а) имеет в статоре три одинаковые и сдвинутые друг относительно друга в пространстве на  $120^\circ$  обмотки, которые называются фазными обмотками генератора. Каждая обмотка изображена состоящей из одного витка, находящегося в двух пазах статора. В действительности обмотки имеют большое число витков. Одни выводы фазных обмоток называются началами фаз генератора и обозначаются буквами  $A, B, C$ , другие – концами фаз генератора и обозначаются буквами  $X, Y, Z$ .

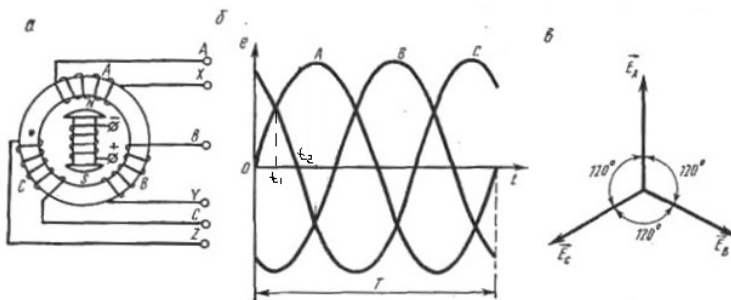


Рис. 4.2. Трехфазный генератор:  
а – схема; б – график ЭДС; в – векторная диаграмма ЭДС

Аналогично и фазы трехфазного генератора называются фазами  $A, B, C$ .

Индуктор трехфазного генератора представляет собой электромагнит постоянного тока. При вращении индуктора против часовой стрелки с угловой скоростью  $\omega$  в фазных обмотках статора будут возбуждаться ЭДС индукции  $e_A, e_B$  и  $e_C$  со сдвигом фаз на  $120^\circ$ , т. е.:

$$e_A = E_m \sin \omega t, \quad e_C = E_m \sin(\omega t + 120^\circ), \quad e_B = E_m \sin(\omega t + 240^\circ).$$

Мгновенные значения ЭДС трехфазного генератора графически выразятся в виде трех синусоид, сдвинутых друг относительно друга по фазе на  $120^\circ$  (рис. 4.2, б).

Алгебраическая сумма мгновенных значений ЭДС трех фаз генератора в любой момент времени равна нулю (рис. 4.2, в).

### 4.3. Вращающееся магнитное поле

Любая система с числом фаз две и более самопроизвольно создает вращающееся магнитное поле. Как ранее было отмечено, наибольшее распространение получил трехфазный переменный ток, поэтому рассмотрим вращающееся магнитное поле трехфазной обмотки машины переменного тока.

На рис. 4.3, *a* показана простейшая трехфазная обмотка, включенная в сеть трехфазного тока, состоящая из трех однофазных обмоток, сдвинутых на угол  $120^\circ$ . По обмоткам проходят синусоидальные токи с одинаковыми амплитудами и одинаковой частотой (так как система является симметричной). Токи, проходящие в обмотках, возбуждают переменные магнитные потоки, которые пронизывают обмотки в направлении, перпендикулярном их плоскостям.

Условимся считать положительными направления токов в катушках от начала к концу обмотки каждой фазы. Положительным направлениям токов соответствуют положительные направления магнитных полей. Направление магнитного поля, созданного трехфазной обмоткой, для различных моментов времени определим следующим образом (рис. 4.3, *б*).

В момент времени  $t = 0$  ток в обмотке  $AХ$  равен нулю, в обмотке  $ВУ$  – отрицателен, в обмотке  $СZ$  – положителен. Следовательно, в этот момент тока в проводниках  $A$  и  $X$  нет, в проводниках  $C$  и  $Z$  он имеет положительное направление, в проводниках  $B$  и  $Y$  – отрицательное направление (рис. 4.3, *a*).

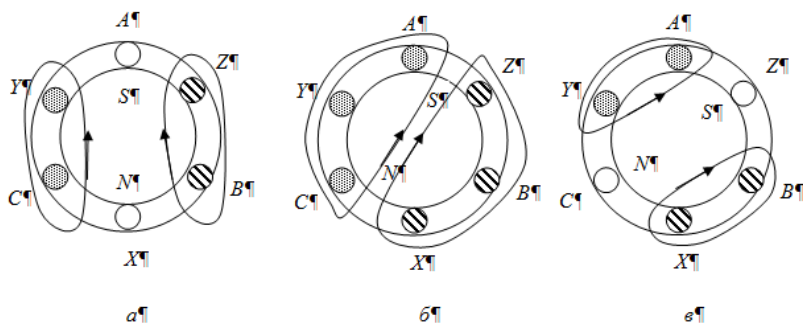


Рис. 4.3. Магнитное поле трехфазной обмотки в различные моменты времени:  
 $a - t = 0$ ;  $б - t = t_1$ ;  $e - t = t_2$

Таким образом, в выбранный нами момент  $t = 0$  в проводниках  $C$  и  $Y$  ток направлен на зрителя, а в проводниках  $B$  и  $Z$  – от зрителя. При таком направлении тока согласно правилу буравчика созданное магнитное поле направлено снизу вверх, т. е. в нижней части внутренней окружности статора находится северный полюс  $N$ , а в верхней – южный  $S$ .

В момент времени  $t = t_1$  в фазах  $A$  и  $C$  ток положителен, в фазе  $B$  – отрицателен. Следовательно, в проводниках  $A$ ,  $C$  и  $Y$  токи направлены на зрителя, а в проводниках  $B$ ,  $X$  и  $Z$  – от зрителя (рис. 4.4, б) и магнитное поле повернуто на некоторый угол по часовой стрелке относительно своего начального направления.

В момент времени  $t = t_2$  в фазе  $A$  ток положителен, в фазе  $B$  – отрицателен, а в фазе  $C$  – отсутствует. Следовательно, в проводниках  $A$  и  $Y$  токи направлены на зрителя, а в проводниках  $B$  и  $X$  – от зрителя (рис. 4.4, в) и магнитное поле повернуто еще на больший угол относительно начального направления.

Таким образом, во времени происходит непрерывное и равномерное изменение направления магнитного поля, созданного трехфазной обмоткой, т. е. магнитное поле вращается с постоянной скоростью. В нашем случае вращение магнитного поля происходит по часовой стрелке.

Если изменить чередование фаз трехфазной обмотки, т. е. изменить подключение к сети любых двух из трех обмоток, то изменится и направление вращения магнитного поля. На рис. 4.4 показана трехфазная обмотка, у которой изменено подключение обмоток  $B$  и  $C$  к сети. Если рассмотреть магнитные поля для ранее выбранных моментов времени  $t = 0$ ,  $t = t_1$  и  $t = t_2$ , то видно, что магнитное поле вращается теперь против часовой стрелки.

В момент времени  $t = 0$  результирующее магнитное поле было направлено по вертикальной оси (рис. 4.4, а). За время, равное одному периоду изменения тока в обмотках, магнитный поток повернется на один полный оборот в пространстве и будет вновь направлен по вертикальной оси так же, как и в момент  $t = 0$ .

Если частота тока  $f$ , т. е. ток претерпевает  $f$  изменений в одну секунду, то магнитный поток трехфазной обмотки совершит  $f$  оборотов в секунду или  $60f$  оборотов в минуту, т. е.

$$n = 60f,$$

где  $n$  – частота вращения магнитного поля в минуту.

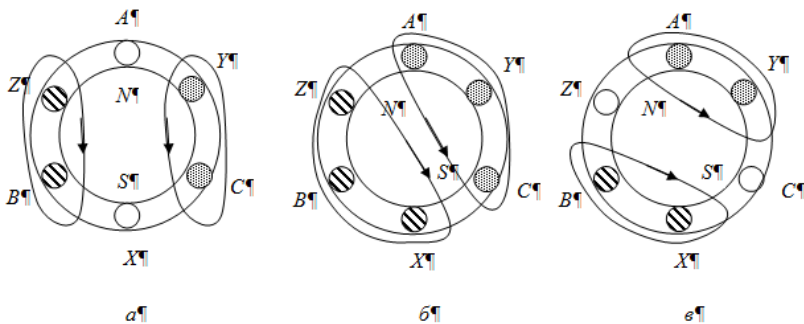


Рис. 4.4. Магнитное поле трехфазной обмотки в различные моменты времени после изменения чередования фаз:  
 $a - t = 0$ ;  $б - t = t_1$ ;  $в - t = t_2$

Мы рассмотрели простейший случай, когда обмотка имеет одну пару полюсов. Если обмотку статора выполнить так, что провода каждой фазы будут состоять из 2, 3, 4 и т. д. одинаковых групп, симметрично расположенных по окружности статора, то число пар полюсов будет соответственно 2, 3, 4 и т. д.

В многополюсных обмотках магнитное поле за один период изменения тока поворачивается на угол, соответствующий расстоянию между двумя одноименными полюсами. Таким образом, если обмотка имеет 2, 3, 4 и т. д. пары полюсов, то магнитное поле за один период изменения тока поворачивается на  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{3}$ ,  $\frac{1}{4}$  и т. д. часть окружности статора. Обозначив буквой  $p$  число пар полюсов, найдем путь, пройденный магнитным полем за один период изменения тока. Этот путь равен  $1/p$  части окружности статора. Следовательно, частота вращения магнитного поля в минуту обратно пропорциональна числу пар полюсов, т. е.

$$n = \frac{60f}{p}.$$

#### 4.4. Способы соединения фаз источников и приемников электрической энергии

Существует 2 способа соединения фаз источников и приемников электрической энергии: по схеме «звезда» и по схеме «треугольник».

Рассмотрим способ соединения фаз источников и приемников электрической энергии по схеме «звезда».

Каждая фаза генератора содержит источник электроэнергии и может быть самостоятельно подключена на нагрузку (рис. 4.5).

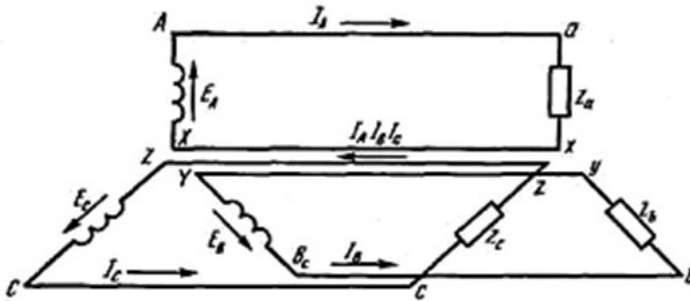


Рис. 4.5. Схема подключения нагрузки к трехфазному генератору

Шестипроводную трехфазную систему можно заменить четырехпроводной, если концы фаз генератора и фазных нагрузок соединить в отдельные узлы (0, 0') (рис. 4.6). Такое соединение называется соединением звездой и обозначается значком  $Y$ .

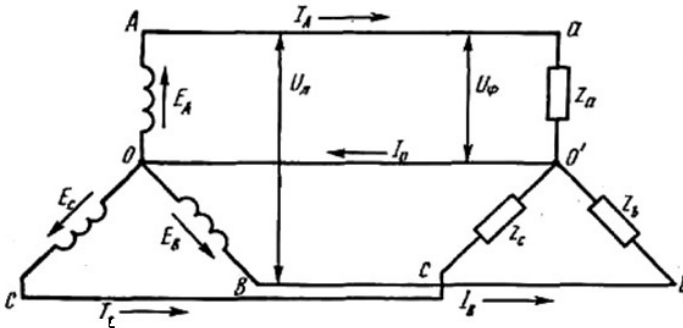


Рис. 4.6. Схема соединения обмоток генератора и фазных нагрузок звездой

Провода, соединяющие начала фаз генератора с приемниками энергии, называются линейными. Ток, проходящий по линейному проводу, называется **линейным**, а по фазной нагрузке – **фазным**. При соедине-

нии звездой линейный ток равен фазному, так как линейный и фазный провода соединяются последовательно:

$$I_{л} = I_{\phi}.$$

Разность потенциалов между началом и концом фаз генератора, фазных нагрузок, между линейным и нулевым проводами называется **фазным напряжением**. Разность потенциалов между началами фаз генератора, фазных нагрузок и линейными проводами называется **линейным напряжением**. При соединении симметричной нагрузки звездой линейное напряжение больше напряжения на фазе нагрузки в  $\sqrt{3}$  раз:

$$U_{л} = \sqrt{3}U_{\phi}.$$

Провод, соединяющий между собой концы фазных нагрузок и концы фаз генератора называется **нейтральным** (нулевым). Ток нулевого провода равен геометрической сумме токов трех фаз:

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

В трехфазной симметричной системе при равномерной нагрузке ток нулевого провода равен нулю, поэтому надобность в нем отпадает. При неравномерной нагрузке ток  $I_N$  не равен нулю, поэтому он обязателен в четырехпроводной системе, хотя его и выполняют обычно с меньшим, чем линейные провода, поперечным сечением. В случае отсутствия нулевого провода или его обрыва при неравномерной нагрузке, возникает резкое изменение напряжения на фазах приемника, получившее название **напряжения смещения нейтрали** (рис. 4.7).

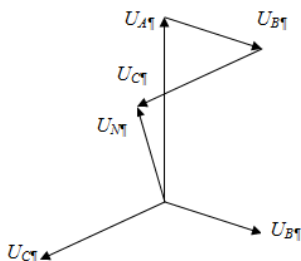


Рис. 4.7. Напряжение нейтрального провода (в четырехпроводной системе) или напряжение смещения нейтрали (в трехпроводной системе)

В четырехпроводной системе напряжение нулевого провода уравновешивает напряжение всех трех фаз, в результате чего суммарное напряжение всей цепи равно нулю. В трехпроводной системе на величину напряжения смещения нейтрали произойдет перераспределение значения напряжений всех фаз в зависимости от сопротивления фазных нагрузок. Таким образом, отключение нулевого провода при неравномерной нагрузке недопустимо.

При наличии нейтрального провода каждая фаза трехфазной цепи независима от других фаз. Фазные напряжения всех трех фаз одинаковы несмотря на разную нагрузку. Изменение фазной нагрузки вызывает изменение силы тока в этой фазе, которая влияет на силу тока только в нулевом проводе и не влияет на силу тока в других фазах.

*К достоинствам способа соединения по схеме «звезда»* следует отнести наличие нейтрального провода, который позволяет включать в сеть несимметричную нагрузку, а также получить 2 разных напряжения в одной сети.

*Недостатки:* линейные и фазные провода должны быть одного сечения, при обрыве фазы ее приемники перестают работать.

Рассмотрим способ соединения фаз источников и приемников электрической энергии по схеме «треугольник».

Соединение, при котором конец первой фазы соединяем с началом второй фазы, конец второй – с началом третьей, конец третьей – с началом первой фазы, называется соединением по схеме «треугольник» и обозначается буквой  $\Delta$ . В нагрузках, не имеющих электромагнитной взаимосвязи, начала и концы определяют произвольно. При соединении нагрузок треугольником фазные нагрузки подключаются под линейные напряжения, т. е. находятся между линейными проводами (рис. 4.8).

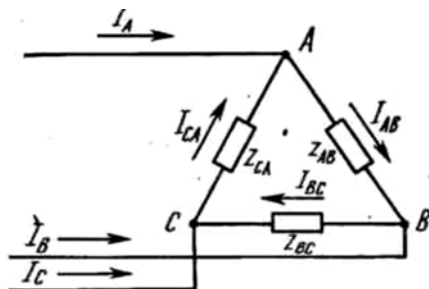


Рис. 4.8. Схема соединения нагрузки трехфазной цепи треугольником

При подключении нагрузки треугольником нет различия между линейным и фазным напряжением:

$$U_{л} = U_{ф}.$$

При соединении симметричной нагрузки треугольником линейный ток больше фазного в  $\sqrt{3}$  раз:

$$I_{л} = \sqrt{3}I_{ф}.$$

При соединении треугольником фазные приемники ведут себя независимо друг от друга, так как каждый из них подключен к двум линейным проводам. Фазный ток при данном напряжении зависит только от величины и характера фазной нагрузки.

К *достоинствам* способа соединения по схеме «треугольник» можно отнести разное сечение линейных и фазных проводов, при обрыве одной из фаз потребитель продолжает работу, так как подключены к двум линейным проводам, но напряжение на них будет иметь меньшую величину.

*Недостатки*: невозможность включения несимметричной нагрузки, одно значение напряжения в сети.

Трехфазные двигатели и трансформаторы могут соединяться как звездой, так и треугольником. Двойной способ подключения двигателей трехфазного тока позволяет широко их использовать. Если их фазные обмотки рассчитаны на напряжение 220 В, то в сеть с линейным напряжением 380 В они включаются звездой, а в сеть с линейным напряжением 220 В – треугольником, и в паспорте двигателя указывается  $Y/\Delta - 380/220$ . Обмотки генератора треугольником соединяются редко, так как при малейшей несимметричности системы или несинусоидальном изменении фазных ЭДС в обмотках генератора, соединенных треугольником, будет циркулировать внутрифазный ток.

## **Лекция 5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**

### **5.1. Общие сведения об электроизмерительных приборах**

При эксплуатации электросилового аппарата измеряют ток, напряжение, сопротивление, мощность, частоту и расход электрической энергии. Для этой цели применяют различные электроизмерительные приборы.

**Измерение** – это определение физической величины опытным путем с помощью измерительных приборов.

Все приборы делятся на две большие группы: аналоговые и цифровые. Цифровые приборы, по сравнению с аналоговыми, наряду с основными преимуществами (возможность автоматизации процесса измерения, высокое быстродействие) имеют сложное устройство и, как следствие, относительно невысокую надежность и сравнительно высокую стоимость. Рассмотрим подробнее конструкции аналоговых приборов.

В большинстве электроизмерительных приборов имеется подвижная и неподвижная части. Подвижная часть, включающая в себя катушку или стальной якорь, механически объединена со стрелочным указателем и возвратными пружинами из фосфористой бронзы (рис. 5.1).

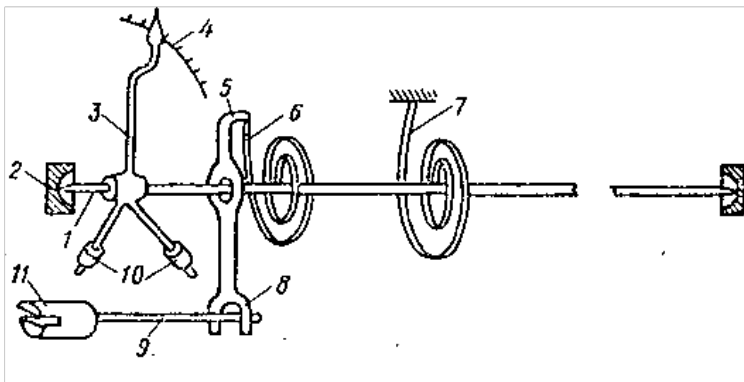


Рис. 5.1. Общие детали подвижной части в опорах:  
1 – ось; 2 – подпятники; 3 – стрелка; 4 – шкала; 5 – поводок корректора;  
6, 7 – пружинки; 8 – вилка; 9 – ось корректора; 10 – грузики; 11 – винт

Принцип действия измерительных приборов независимо от их назначения сводится к следующему: электрический ток, проходя через прибор, вызывает появление вращающего момента, под воздействием которого преодолевается противодействие спиральных пружин и подвижная часть поворачивается на определенный угол. При этом стрелка, переместившись по шкале, укажет измеряемую величину. Когда прибор отключается, вращающий момент исчезает и подвижная часть вследствие упругости пружин возвращается в исходное положение.

При изменении температуры окружающей среды упругость возвратных пружин меняется, что приводит к некоторому повороту подвижной части. Однако перед началом измерений стрелка прибора должна располагаться против исходного (нулевого) деления шкалы. Такую установку стрелки производят с помощью **корректора**.

Ось корректора расположена эксцентрично. Поэтому поворот винта *корректора* перемещает вилку, что вызывает изменение угла закручивания возвратной пружины и перемещение стрелки по шкале. Грузики служат для уравнивания подвижной части, т. е. для устранения влияния моментов сил тяжести на ее положение.

По условиям эксплуатации подвижная система прибора должна быстро успокаиваться, что обеспечивается применением воздушного, магнитоиндукционного или жидкостного успокоителя (рис. 5.2).

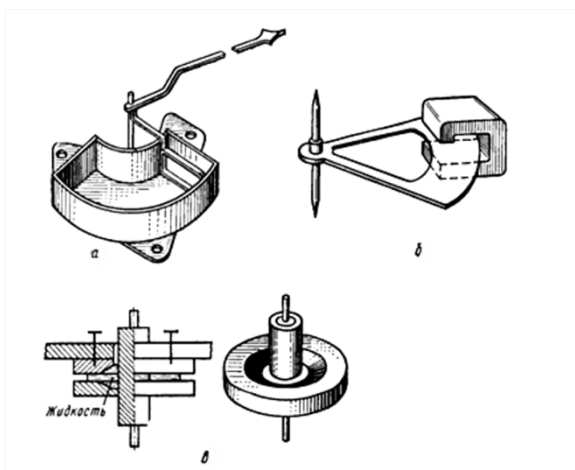


Рис. 5.2. Успокоители подвижной части электроизмерительных приборов: а – воздушный, б – магнитоиндукционный, в – жидкостный

В воздушном успокоителе используется торможение подвижной системы вследствие сжатия или разрежения воздуха в камере успокоителя, в магнитоиндукционном – применен принцип магнитного торможения (под действием вихревых токов), в жидкостном успокоителе используется энергия жидкости. Выбор способа успокаивания подвижной части зависит от принципа действия прибора. Например, если

принцип действия основан на магнитном взаимодействии, то магнитоиндукционный успокоитель не применяется и т. д.

Для уменьшения трения и повышения точности ось подвижной системы в некоторых приборах крепят на кернах в подпятниках из камней высокой твердости (рубина, сапфира, агата) (рис. 5.3).

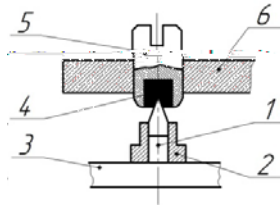


Рис. 5.3. Устройство опоры:  
1 – керн; 2 – бусса; 3 – подвижная часть;  
4 – камень; 5 – винт; 6 – неподвижная часть

Для определения числового значения измеряемой величины приборы имеют отсчетные приспособления, состоящие из шкалы и указателя.

**Отсчетное устройство** измерительного прибора – часть прибора, предназначенная для отсчитывания его показаний. Отсчетное устройство аналогового прибора обычно состоит из *шкалы* и указателя, причем подвижным может быть либо указатель, либо шкала. По типу указателя отсчетные устройства подразделяются на стрелочные и световые (рис. 5.4 и 5.5).

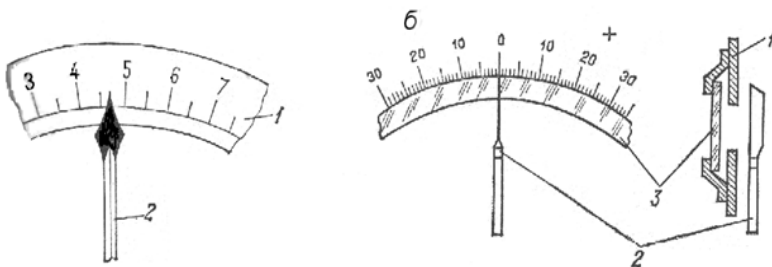


Рис. 5.4. Стрелочные отсчетные устройства:  
*а* – с копьевидной стрелкой, *б* – с ножевидной стрелкой;  
1 – шкала; 2 – стрелка; 3 – зеркало

В стрелочных отсчетных устройствах (рис. 5.4) стрелка своим концом перемещается относительно отметок шкалы. Конец стрелки может быть копьевидным или выполненным в виде ножа, а также натянутой нити. В последних двух случаях шкалы снабжаются зеркалом для устранения погрешности отсчета, вызванной *параллаксом* (параллакс – видимое смещение предмета из-за перемены места наблюдения).

В качестве зеркала используется пластинка посеребренного стекла, устанавливаемая непосредственно под шкалу. Для точного определения показаний электроизмерительного прибора глаз наблюдателя должен находиться в таком положении, при котором стрелка полностью закрывает собой свое изображение в зеркале.

В световых отсчетных устройствах (рис. 5.5) роль стрелки выполняет световой луч, отраженный от зеркала, скрепленного с подвижной частью прибора. От ее положения зависит положение светового изображения на шкале, по которому отсчитывают показания. Световое отсчетное устройство позволяет устранить погрешность от параллакса и повысить чувствительность прибора.

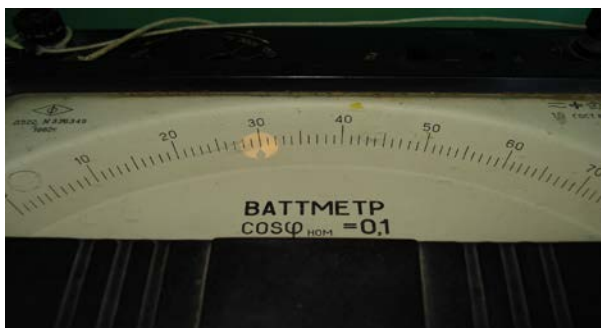


Рис. 5.5. Световое отсчетное устройство

## 5.2. Погрешность электроизмерительных приборов

В связи с тем, что абсолютно точных приборов нет, показания приборов несколько отличаются от действительного значения измеряемой величины. Разность между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины называется **абсолютной погрешностью**.

Так, например, если напряжение источника 100 В, а вольтметр со шкалой 150 В, включенный в данную цепь, показывает 103 В, то абсолютная погрешность составит

$$\Delta A = A_{\text{изм}} - A = 103 - 100 = 3 \text{ В.}$$

Отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины называется **относительной погрешностью** прибора:

$$\gamma_{\text{от}} = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100 \% .$$

Если абсолютная погрешность 3 В, а измеряемая величина 50 В и 100 В, то относительная погрешность составит: для первого измерения

$$\gamma_{\text{от1}} = \frac{3}{50} \cdot 100 = 6 \% ,$$

а для второго измерения

$$\gamma_{\text{от2}} = \frac{3}{100} \cdot 100 = 3 \% .$$

Отсюда следует, что относительная погрешность в начале шкалы прибора больше, чем в конце. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе предела измерений в универсальных измерительных приборах. Наименьшая погрешность в измерениях будет при использовании последней трети шкалы прибора.

Таким образом, точность измерительных приборов оценивать по их относительной погрешности неудобно, так как абсолютная погрешность у них примерно одинакова вдоль всей шкалы и, следовательно, с уменьшением измеряемой величины быстро растет относительная погрешность. Для оценки точности измерительных приборов служит их **приведенная погрешность**, равная отношению абсолютной погрешности показания  $\Delta A$  к значению, соответствующему наибольшему (номинальному) показанию прибора  $A_n$ , выраженному в процентах, т. е.

$$\gamma_{\text{пр}} = \frac{\Delta A}{A_n} \cdot 100 \% .$$

В нашем случае абсолютная погрешность – 3 В, наибольшее пока-

зание прибора – 150 В и приведенная погрешность

$$\gamma_{\text{пр}} = \frac{3}{150} \cdot 100 = 2 \%$$

Приведенная погрешность при нормальных эксплуатационных условиях (температура +20 °С, правильная установка, отсутствие внешних магнитных полей и больших ферромагнитных масс) называется **основной погрешностью прибора**. По степени точности измерительные приборы делятся на 8 классов (ГОСТ 1845-59): 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 и 4. Цифры указывают основную погрешность в %.

### 5.3. Классификация электроизмерительных приборов

Измерительные приборы различают:

- по назначению;
- по роду измеряемого тока;
- по классу точности;
- по принципу действия;
- по форме корпуса;
- по положению при измерениях;
- по характеру применения.

*По назначению* приборы подразделяются на амперметры, вольтметры, омметры, ваттметры, счетчики, частотомеры и др.

*По роду измеряемого тока.* Измерительные приборы можно применять в цепях переменного или постоянного тока. Однако существуют приборы, предназначенные для включения в цепь и переменного и постоянного токов.

*По классу точности.* Приборы классов точности считаются:










0,05 и 0,1 – контрольными; 0,2; 0,5 и 1 – лабораторными; 1,5 и 2,5 – техническими; 4 – учебными.

Контрольные приборы имеют зеркальную шкалу и ножевидную стрелку. У лабораторных приборов есть ножевидная стрелка, но может не быть зеркальной шкалы. Технические и учебные приборы имеют копьевидную стрелку без зеркальной шкалы.

*По принципу действия* электроизмерительные приборы относят к следующим наиболее распространенным системам: электромагнитной, магнитоэлектрической, электродинамической, индукционной, электростатической, термоэлектрической, вибрационной.

Принадлежность к каждой из систем указывается на шкале прибора специальным значком (табл. 5.1).

Т а б л и ц а 5.1. Условные обозначения систем приборов

Тип системы прибора	Условное обозначение принципа действия прибора
Магнитоэлектрическая с подвижной рамкой	
Магнитоэлектрическая с подвижным магнитом	
Электромагнитная	
Электродинамическая	
Ферродинамическая	
Индукционная	
Электростатическая	
Вибрационная (язычковая)	
Термоэлектрическая	

По форме корпуса приборы бывают: круглые, квадратные, прямоугольные, секторообразные.

По положению при измерениях: вертикальные ( $\perp$ ), горизонтальные ( $\Pi$ ), устанавливаемые под некоторым углом ( $\angle$ ).

По характеру применения: стационарные (жестко укрепленные на месте установки); переносные.

Промышленность выпускает электроизмерительные приборы *трех эксплуатационных групп*: А, Б и В, характеризующих допустимую температуру окружающей среды, при которой можно эксплуатировать данный прибор. Приборы различных групп могут эксплуатироваться при следующих температурах окружающей среды:

- группа А**                    0 – (+35) °С;
- группа Б**                    (–30) – (+40) °С;
- группа В<sub>1</sub>**                  (–40) – (+50) °С;
- группа В<sub>2</sub>**                  (–50) – (+60) °С.

Принадлежность прибора к эксплуатационным группам Б и В указывается на шкале. Приборы эксплуатационной группы А обычно обозначений на шкале не имеют.

На шкале измерительных приборов условными значками и цифрами указываются следующие данные:

- наименование прибора;
- род тока, для которого предназначен прибор;
- если прибор переменного тока, указывается диапазон частот, при которых можно эксплуатировать прибор;
- система прибора;
- испытательное напряжение изоляции;
- положение при измерениях;
- класс точности;
- марка прибора;
- год выпуска;
- заводской номер прибора;
- принадлежность к эксплуатационной группе.

При эксплуатации приборов необходимо соблюдать следующие основные правила:

1. Перед включением прибора стрелку с помощью корректора надо установить на нулевое деление шкалы.
2. Прибор включать только в цепь того рода тока, для которого он предназначен.
3. При измерениях корпус прибора должен занимать положение, соответствующее его нормальной установке.

#### **5.4. Приборы электромагнитной системы**

Электромагнитные измерительные приборы применяют для измерения *тока или напряжения в цепях переменного или постоянного тока*. Промышленность выпускает приборы данного типа в трех вариантах: с плоской и круглой катушкой, а также с магнитопроводом. Принцип действия приборов электромагнитной системы основан на взаимодействии магнитного поля катушки, создаваемого измеряемым током, со стальным сердечником, помещенным в это поле.

Механизм с плоской катушкой (рис. 5.6, а) представляет собой катушку, намотанную на каркас, имеющий щелевидное отверстие. Подвижная часть прибора содержит ось со стрелкой, несимметрично укрепленный сердечник и возвратную пружину. Для быстрого успокоения стрелки относительно положения равновесия служит успокоитель с воздушным торможением.

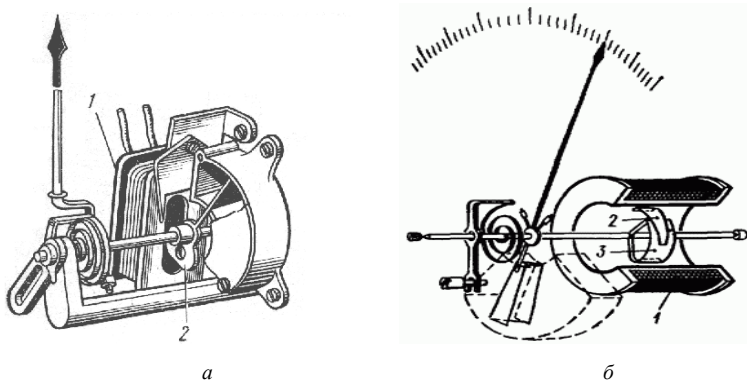


Рис. 5.6. Электромагнитный измерительный механизм:  
*а* – с плоской катушкой: 1 – катушка; 2 – лепесток;  
*б* – с круглой катушкой: 1 – катушка; 2, 3 – ферромагнитные элементы

При включении прибора в сеть по катушке проходит ток и возникающее магнитное поле втягивает сердечник внутрь катушки. Сердечник укреплен на оси несимметрично, поэтому подвижная часть прибора поворачивается на некоторый угол. Подвижная часть будет поворачиваться до тех пор, пока вращающий момент, созданный током, не будет уравновешен противодействующим моментом спиральной пружины.

В механизме с круглой катушкой (рис. 5.6, *б*) внутри ее помещены два сердечника: подвижный, жестко укрепленный на оси прибора вместе со стрелкой, и неподвижный. Когда по катушке протекает ток, возбуждающий магнитное поле, концы сердечников намагничиваются с одинаковой полярностью и отталкивание их одноименных полюсов создает вращающий момент. Подвижный сердечник, отталкиваясь от неподвижного, поворачивает ось со стрелкой на некоторый угол. Для ослабления влияния внешних магнитных полей на катушку надет ферромагнитный экран. Прибор снабжен магнитным успокоителем.

Механизмы с круглой катушкой по сравнению с механизмами с плоской катушкой имеют некоторые преимущества в технологии изготовления и, кроме того, позволяют получить более равномерную шкалу. Однако они имеют и недостатки, главный из которых заключается в том, что в таких механизмах хуже используется внутренний объем, что вызывает увеличение собственного потребления прибора для данного значения вращающего момента.

Электромагнитный измерительный механизм с замкнутым магнитопроводом (рис. 5.7) состоит из катушки, помещенной на магнитопровод с полюсными наконечниками. При наличии тока в обмотке катушки подвижный сердечник стремится повернуться по часовой стрелке вокруг оси, втягиваясь в рабочее пространство между полюсными накладками левого полюса. Обычно в измерительных механизмах с замкнутым магнитопроводом применяют жидкостное успокоение.

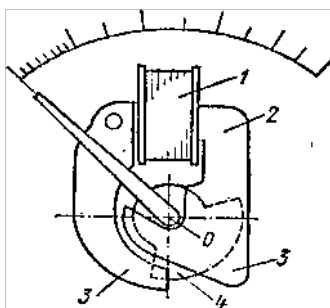


Рис. 5.7. Электромагнитный измерительный механизм с замкнутым магнитопроводом:  
 1 – катушка; 2 – магнитопровод; 3 – полюсные наконечники;  
 4 – подвижный сердечник

Достоинствами измерительного механизма с замкнутым магнитопроводом являются: повышение чувствительности, уменьшение погрешности от влияния внешних магнитных полей, возможность относительно просто менять характеры шкалы путем изменения положения левого полюсного наконечника относительно правого.

Угол поворота подвижной части зависит от силы, с которой сердечник втягивается внутрь катушки (механизмы с плоской катушкой и замкнутым магнитопроводом) или с которой происходит отталкивание одноименно заряженных сердечников (механизм с круглой катушкой). Эта сила пропорциональна току и величине магнитной индукции  $B$  поля катушки:

$$F = kBI,$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Так как при отсутствии насыщения магнитная индукция пропорциональна току, то угол поворота подвижной системы будет пропорционален квадрату тока. В этом случае шкала прибора должна быть квадратичной. Однако наличие в приборе ферромагнитного сердечника усложняет приводимую зависимость, вследствие чего шкала электромагнитных измерительных приборов неравномерна. Достоинством равномерной шкалы является постоянство масштаба вдоль всей шкалы, что обеспечивает простоту отсчета измеряемой величины в любой части шкалы.

Придавая сердечнику специальную форму и изменяя его расположение относительно катушки, можно добиться некоторого уменьшения неравномерности шкалы в большей ее части, кроме начальных делений, которые остаются очень сильно сжатыми.

В электромагнитных вольтметрах катушки выполняют из большого числа витков (2000–10000) провода диаметром 0,08–0,1 мм. Катушки амперметров содержат небольшое число витков толстого медного провода круглого или ленточного сечения. Внешние магнитные поля оказывают значительное влияние на работу электромагнитного прибора, но благодаря ферромагнитному кожуху это влияние значительно ослабляется.

В электромагнитном приборе количество стали относительно мало, и большая часть пути магнитного потока проходит в воздухе. Поэтому измерительный механизм электромагнитной системы обладает малой чувствительностью, следовательно, затруднительно изготовить амперметр на малый ток (менее 0,5 А) или вольтметр на малое напряжение (менее 10 В).

Способность прибора работать в цепях переменного и постоянного тока объясняется тем, что изменение направления тока в катушке приводит к перемагничиванию сердечников, вследствие чего направление вращающего момента не меняется. При переменном токе прибор показывает действующие значения тока или напряжения. Мощность, потребляемая электромагнитными приборами от сети, колеблется от 2 до 8 Вт.

К *достоинствам электромагнитных приборов* следует отнести их простоту, дешевизну, надежность в эксплуатации, способность выдерживать кратковременные перегрузки, а также пригодность для измерений в цепях переменного и постоянного тока.

*Недостатками приборов электромагнитной системы* являются их сравнительно малая точность (класс точности 1; 1,5; 2,5), неравномер-

ность шкалы, довольно большая потребляемая мощность, зависимость показаний от частоты тока и влияния внешних магнитных полей.

Чувствительность повышают путем применения растяжек и светового отсчета, а погрешности снижаются благодаря использованию специальных магнитных материалов для сердечников и эффективных способов защиты от влияния внешних магнитных полей.

### 5.5. Приборы магнитоэлектрической системы

Приборы магнитоэлектрической системы применяют для измерения *тока или напряжения в цепях постоянного тока*. Действие приборов магнитоэлектрической системы основано на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита и магнитного поля проводника с током, выполненного в виде катушки.

Неподвижная часть прибора (рис. 5.8) состоит из постоянного магнита и стального цилиндра. Между полюсами магнита и стальным цилиндром имеется кольцевой воздушный зазор, в котором создается сильное и практически однородное магнитное поле. Подвижная часть прибора представляет собой катушку, выполненную тонким проводом на легкой алюминиевой рамке, свободно вращающейся (на двух полюсах) в кольцевом воздушном зазоре. К передней полуоси крепится стрелка с противовесами, предназначенными для уравнивания подвижной системы прибора. Противобьющий момент создается с помощью двух спиральных пружин, через которые на рамку подводится электрический ток.

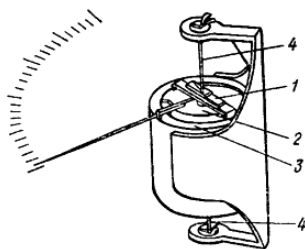


Рис. 5.8. Измерительный механизм магнитоэлектрической системы с внутрирамочным магнитом:

- 1 – подвижная катушка (рамка); 2 – внутрирамочный магнит;
- 3 – магнитомягкий магнитопровод; 4 – ленточные растяжки

При включении прибора по катушке проходит ток и возникает механическая сила, которая в соответствии с правилом левой руки поворачивает рамку на некоторый угол. Величина этой силы зависит от магнитной индукции  $B$ , силы тока в катушке  $I$ , числа витков  $w$  и активной длины проводника  $l$ :

$$F = 2BIlw.$$

Так как магнитная индукция, активная длина и число витков (в каждом конкретном типе прибора) постоянны, угол поворота рамки будет определяться только силой тока, проходящего по катушке прибора, и противодействующим моментом возвратных пружин. Вследствие этого приборы магнитоэлектрической системы имеют равномерную шкалу.

При повороте рамки в магнитном поле в ее витках индуцируется ЭДС, направление которой определяется правилом Ленца. Возникший под действием ЭДС ток вызывает появление противодействующей силы, способствующей быстрому успокоению подвижной системы прибора. Это устраняет необходимость применения успокоителя.

Приборы магнитоэлектрической системы полярны (т. е. имеют положительный и отрицательный зажимы), а в цепи переменного тока не дают показаний. При прохождении по катушке переменного тока вращающий момент с частотой тока меняет свое направление. Из-за инерции подвижная система не будет успевать колебаться с частотой тока, поэтому останется неподвижной.

*Достоинства магнитоэлектрических приборов:* высокая точность показаний, чувствительность, равномерная шкала, малое потребление энергии ( $10^{-4}$ – $10^{-6}$  Вт), быстрое успокоение подвижной системы и малая чувствительность к внешним магнитным полям. Широко применяются в качестве вольтметров, миллиамперметров, микроамперметров, а также в универсальных измерительных приборах (авометрах).

*К недостаткам приборов магнитоэлектрической системы относятся:* сравнительно высокая стоимость, чувствительность к перегрузкам и пригодность для измерений только в цепях постоянного тока. Последний недостаток может быть устранен путем включения прибора через выпрямительное устройство, но в этом случае прибор будет относиться уже к **выпрямительной** системе.

## 5.6. Приборы электродинамической системы

Приборы электродинамической системы применяют для измерения *напряжения, тока или мощности в цепях переменного и постоянного тока*. Действие электродинамических приборов основано на взаимодействии магнитных полей неподвижной и подвижной катушек с токами.

Прибор (рис. 5.9) имеет неподвижную катушку, которая содержит небольшое число витков толстой проволоки, и подвижную катушку с большим числом витков тонкой проволоки, размещенную внутри неподвижной. На оси подвижной катушки укреплены стрелка и пружины, предназначенные для подведения тока и создания противодействующего момента. Нижний конец стрелки оканчивается поршнем воздушного успокоителя. В связи с чувствительностью прибора к внешним магнитным полям применение магнитного успокоителя в данной системе недопустимо.

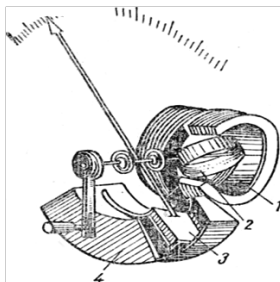


Рис. 5.9. Электродинамический измерительный механизм:  
1 – неподвижная катушка; 2 – подвижная катушка;  
3 – поршень; 4 – воздушный успокоитель

При включении прибора в цепь по катушкам проходит ток и возникающие магнитные поля вызывают появление электродинамической силы, которая стремится повернуть подвижную систему так, чтобы магнитные поля обеих катушек совпадали по направлению. Если допустить, что по катушкам прибора проходят одинаковые токи, то сила взаимодействия катушек (и вращающий момент) будет пропорциональна квадрату силы тока:

$$F = kI^2.$$

Поэтому электродинамические амперметры имеют неравномерную шкалу.

При включении прибора в сеть переменного тока направление вращающего момента не изменится, так как направление тока изменяется одновременно в обеих катушках. В цепях переменного тока приборы данной системы показывают действующие значения измеряемой величины.

В случае использования прибора для измерения напряжения подвижную и неподвижную катушки соединяют последовательно. Такое же соединение применяют при измерении небольших токов (до 0,5 А). При измерении токов большей величины катушки прибора соединяют параллельно.

Когда измеряют мощность, неподвижную катушку включают последовательно, а подвижную – параллельно. В последнем случае через неподвижную катушку будет проходить ток нагрузки, а через подвижную – ток, пропорциональный напряжению на нагрузке, что вызовет возникновение вращающего момента, пропорционального мощности, потребляемой нагрузкой ( $P = UI$ ). По этой причине электродинамические ваттметры имеют равномерную шкалу.

*Достоинства электродинамических приборов* – пригодность для измерения в цепях переменного и постоянного тока, возможность использования для измерения напряжения, силы тока или мощности, высокая точность, равномерность шкалы (у ваттметров).

*Недостатки* – сравнительно большое потребление мощности (при измерении токов и напряжений), чувствительность к внешним магнитным полям и перегрузкам, сложная конструкция и высокая стоимость, чувствительность к механическим воздействиям – ударам, тряске и вибрации.

Следует отметить, что чем меньше потребление мощности электродинамического прибора, тем слабее собственные магнитные поля и сильнее влияние внешних полей. Для уменьшения их влияния применяют стальной сердечник. Электродинамические приборы со стальным сердечником называются ферродинамическими.

Однако с применением стали уменьшается точность прибора вследствие влияния гистерезиса и вихревых токов. Поэтому приборы ферродинамической системы для точных измерений не пригодны. Они используются в основном в качестве регистрирующих приборов и щитовых ваттметров.

## 5.7. Приборы индукционной системы

Индукционные приборы в настоящее время служат для измерения расхода электрической энергии в цепях переменного тока. Действие индукционного счетчика основано на взаимодействии вихревых токов с вращающимся магнитным полем.

Основными деталями индукционного счетчика (рис. 5.10) являются два электромагнита, подвижный алюминиевый диск, редуктор, счетный механизм и тормозной магнит.

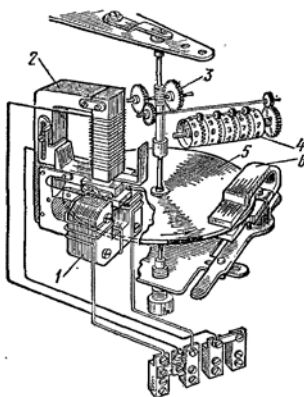


Рис. 5.10. Счетчик электрической энергии:  
1 и 2 – электромагниты; 3 – редуктор;  
4 – счетный механизм; 5 – диск; 6 – тормозной магнит

Один электромагнит имеет небольшое число витков толстого провода и включается с нагрузкой последовательно (токовая обмотка), а второй – состоит из большого числа витков тонкого провода и включается параллельно (обмотка напряжения). Токовая обмотка намотана на подковообразный сердечник, причем навивка идет встречно друг другу. Это обеспечивает создание между полюсами электромагнитов вращающегося магнитного поля, в котором размещен свободно вращающийся алюминиевый диск.

Вращающееся магнитное поле, пересекая край алюминиевого диска, индуцирует в нем вихревые токи. В результате взаимодействия магнитных полей вихревых токов с вращающимся магнитным полем возникает механическая сила, которая приводит диск во вращение.

Сила взаимодействия между вихревыми токами и вращающимся магнитным полем пропорциональна произведению мгновенных значений тока и напряжения, т. е. мощности токоприемников:

$$M_{\text{вр}} = kUI = M_{\text{вр}} = kP,$$

где  $k$  – постоянный коэффициент.

Чтобы скорость вращения диска была пропорциональна мощности токоприемников, применен тормозной магнит.

В диске при вращении его между полюсами тормозного магнита индуцируются вихревые токи, которые, взаимодействуя с магнитным полем магнита, создают противодействующий момент, пропорциональный частоте вращения диска. Чем быстрее вращается диск, тем больше сила его торможения. Частота вращения диска становится постоянной, когда вращающий момент уравновешивается тормозящим моментом.

Счетный механизм прибора измеряет число оборотов диска, т. е. величину, пропорциональную энергии, расходуемой на работу токоприемника.

Вращение диска счетчика без подключения нагрузки называется *самоходом*. Самоход может быть вызван увеличением напряжения сети, стальным компенсационным винтом постоянного магнита или вибрацией щита, на котором укреплен счетчик. Устранение самохода заключается в регулировке расстояния между пластинкой, закрепленной на полюсе обмотки напряжения, и пластинкой, закрепленной на оси алюминиевого диска. Так как электромагнит напряжения постоянно находится в работе, полюсная пластинка намагничивается и притягивает к себе пластинку на оси, в результате чего создается тормозное усилие, и диск прекращает вращаться.

*Постоянная счетчика* – энергия, измеряемая счетчиком за время одного оборота диска, Вт/об.

## 5.8. Приборы вибрационной системы

Приборы вибрационной системы предназначены для измерения частоты переменного тока. Действие вибрационных приборов основано на использовании явлений электромагнетизма и механического резонанса.

Каждая механическая система, способная совершать колебательные движения, обладает определенной частотой собственных колебаний,

которая обуславливается массой в упругостью системы. При резонансе, т. е. при совпадении частот собственных колебаний системы и колебаний внешнего источника, амплитуда колебаний данной механической системы резко увеличивается. Это свойство используется в измерительных приборах вибрационной системы.

Вибрационный частотомер (рис. 5.11) состоит из электромагнита, стального якоря, укрепленного на бруске, и нескольких вибраторов с различной длиной или массой. Концы вибраторов отогнуты под прямым углом, окрашены белой краской и размещены в горизонтальной щели на шкале частотомера. Брусок крепится к пластинчатым прижимам, что обеспечивает некоторую подвижность механической системы.

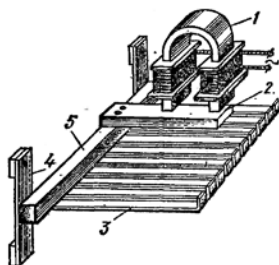


Рис. 5.11. Устройство частотомера вибрационной системы:  
1 – электромагнит; 2 – якорь; 3 – вибраторы;  
4 – пластинчатые прижимы; 5 – брусок

Если по обмотке электромагнита пропустить переменный ток, то якорь будет сильнее притягиваться к полюсам в те моменты, когда ток имеет наибольшее значение, т. е. два раза за период. Колебания якоря передаются вибраторам. С наибольшей амплитудой будет колебаться вибратор, собственная частота колебаний которого совпадает с частотой колебаний якоря. Цифра на шкале, стоящая против вибратора, колеблющегося с наибольшей амплитудой, укажет частоту тока в сети.

Большинство частотомеров вибрационной системы предназначены для измерения частот 45–55 Гц. Однако встречаются частотомеры, рассчитанные для измерения более высоких частот (до 1550–1650 Гц).

*Достоинство приборов вибрационной системы* – независимость показаний от напряжения сети.

*Недостатки* – зависимость показаний от механических вибраций, невозможность измерения высоких частот и прерывность шкалы,

вследствие чего затрудняются измерения на промежуточных частотах, когда одновременно колеблется несколько вибраторов.

## 5.9. Приборы электростатической системы

Приборы электростатической системы предназначены для измерения напряжения в цепях постоянного и переменного тока. В приборах этой системы вращающий момент возникает в результате взаимодействия двух систем заряженных проводников, одна из которых является подвижной. Отклонение подвижной части связано с изменением емкости, которое, в свою очередь, связано с изменением активной площади пластин.

Неподвижная часть измерительного механизма (рис. 5.12) состоит из одной или нескольких камер, что напрямую связано с чувствительностью прибора. Каждая камера представляет собой две металлические пластины с воздушным зазором между ними. В эти зазоры свободно входят тонкие алюминиевые пластины подвижной части.

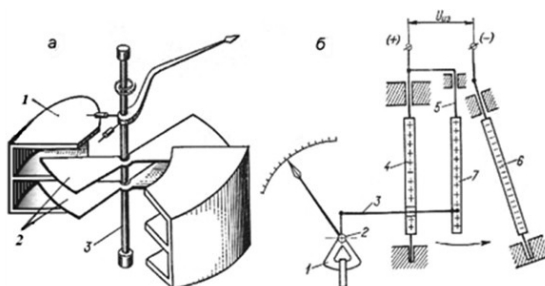


Рис. 5.12. Электростатический измерительный механизм:  
*а* – с изменяющейся активной площадью электродов: 1 – неподвижные пластины;  
 2 – подвижные пластины; 3 – ось; *б* – с изменением расстояния между электродами:  
 1 – магнитоиндукционный успокоитель; 2 – ось; 3 – тяга; 4, 6 – неподвижная пластина;  
 5 – металлическая ленточка; 7 – подвижная пластина

Если к подвижным и неподвижным пластинам подвести измеряемое напряжение, то они окажутся заряженными противоположными по знаку зарядами, в результате чего под действием электростатических сил притяжения подвижные пластины будут стремиться войти внутрь камер. Поворот подвижных пластин, жестко укрепленных на оси, вызовет закручивание упругих элементов, создающих противо-

действующий момент. При равенстве вращающего и противодействующего моментов подвижная часть остановится, и по положению указателя на шкале можно будет определить измеряемое напряжение. При изменении полярности напряжения направление отклонения подвижной части не изменяется. Для успокоения подвижной части применяется магнитоиндукционный механизм.

Для того чтобы шкала прибора была равномерной, выбирают соответствующим образом форму подвижных и неподвижных пластин, т. е. задаются определенным законом изменения емкости с изменением угла поворота.

*Достоинства приборов электростатической системы* – независимость показаний от частоты, температуры и посторонних магнитных полей. При применении в цепях постоянного тока энергопотребление равно нулю.

*Недостатки* – зависимость показаний от действия электрических полей.

### 5.10. Измерение силы тока и напряжения

Для измерения силы тока и напряжения используют измерительные приборы различных систем – амперметры и вольтметры, условное обозначение и схемы включения которых показаны на рис. 5.13.

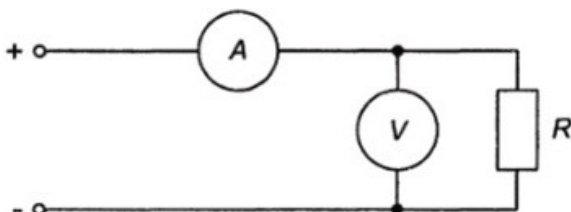


Рис. 5.13. Схема включения амперметра и вольтметра

Для измерения малых значений тока применяют гальванометры, микроамперметры, миллиамперметры, а для измерения очень низких напряжений – милливольтметры, микровольтметры.

Включение амперметра последовательно с нагрузкой не должно влиять на измеряемый ток в цепи, поэтому сопротивление его должно быть малым по сравнению с сопротивлением приемника энергии.



$$R_{\text{ш}} = \frac{R_{\text{а}}}{n-1},$$

где  $R_{\text{ш}}$  – сопротивление шунта;

$R_{\text{а}}$  – сопротивление обмотки амперметра;

$n$  – число, показывающее, во сколько раз расширяются пределы измерения прибора.

После подключения шунта на шкале прибора следует поставить множитель (в данном случае  $\times 10$ ). При включении амперметра с шунтом фактический ток в цепи определяется произведением показаний прибора на множитель.

Шунт должен иметь четыре контакта: к двум из них подключают прибор, а к двум другим – соединительные провода электрической цепи. Такое подсоединение исключает зависимость показаний прибора от переходных сопротивлений контактов.

Выбор сопротивления шунта зависит от внутреннего сопротивления прибора. Так, например, при расширении пределов измерений щитовых приборов, рассчитанных на десятки и сотни ампер, сопротивления шунтов может составлять тысячные или даже миллионные доли Ома.

В тех случаях, когда вольтметром, рассчитанным на измерение небольших напряжений, требуется измерить большую величину, последовательно с вольтметром включают добавочный резистор  $R_{\text{д}}$  (рис. 5.15).

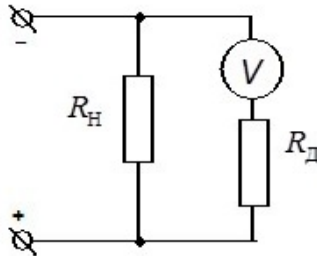


Рис. 5.15. Схема включения вольтметра с добавочным сопротивлением

Если добавочное сопротивление  $R_{\text{д}}$  будет в 9 раз больше сопротивления обмотки вольтметра, то 0,9 общего напряжения будет прихо-

даться на добавочное сопротивление  $R_d$  и только 0,1 – на сопротивление обмотки вольтметра  $R_v$ . При этом пределы измерений прибора расширятся в 10 раз.

Расчет сопротивления добавочного резистора производят по формуле

$$R_d = \frac{R_v}{n-1},$$

где  $R_d$  – сопротивление добавочного резистора;

$R_v$  – сопротивление обмотки вольтметра;

$n$  – число, показывающее, во сколько раз расширяются пределы измерений прибора.

Очевидно, что после включения добавочного резистора необходимо изготовить новую шкалу или на имеющейся шкале поставить соответствующий множитель. Так как сопротивление добавочных резисторов в щитовых приборах может достигать нескольких тысяч Ом, их выполняют в виде катушек из тонкого провода с большим удельным сопротивлением.

Шунты и добавочные резисторы можно монтировать как внутри прибора, так и подключать к его зажимам на время измерений. В последнем случае на шкале прибора указывают: «С отдельным шунтом» или «С отдельным добавочным резистором».

### 5.11. Измерение мощности и энергии

Для измерения мощности в цепи постоянного тока не требуется специального прибора, так как мощность  $P = UI$  легко может быть подсчитана по показаниям вольтметра и амперметра.

В цепи переменного тока мощность зависит не только от напряжения и тока, но и от сдвига фаз между ними:

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

Поэтому произведение напряжения и тока не определяет мощности, так как для ее измерения необходим ваттметр электродинамической или ферродинамической системы. В электродинамическом ваттметре неподвижная катушка включается последовательно с нагрузкой  $R_n$ , а подвижная снабжается добавочным сопротивлением  $R_d$  и включается параллельно нагрузке (рис. 5.16).

Таким образом, мгновенное значение тока неподвижной катушки равно току нагрузки, а ток подвижной катушки пропорционален напряжению на зажимах приемника и должен совпадать с напряжением по фазе. Чтобы ток совпадал по фазе с напряжением, добавочное активное сопротивление  $R_d$  должно быть много больше индуктивного сопротивления самой обмотки, что дает возможность считать сопротивление цепи напряжения безреактивным.

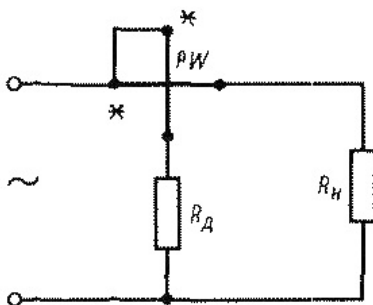


Рис. 5.16. Схема включения ваттметра

Вращающий момент у электродинамического ваттметра пропорционален произведению напряжения и тока. При включении ваттметра в цепь переменного тока на вращающий момент не влияет одновременное изменение направления тока в обеих катушках, но если поменять местами зажимы одной из двух катушек ваттметра, то это изменит фазу тока в этой катушке на  $180^\circ$  и направление вращающего момента. Для предупреждения возможности неправильного включения ваттметра относительные «начала» двух катушек ваттметра (генераторные зажимы), присоединенные к одному и тому же полюсу источника, отмечаются у зажимов звездочкой (\*); концы этих катушек присоединяются к разным полюсам нагрузки.

Электродинамические ваттметры используются как в цепях переменного, так и постоянного тока.

Ферродинамические ваттметры обладают меньшей точностью и в цепях постоянного тока непригодны из-за влияния гистерезиса.

Для измерения расхода электрической энергии переменного тока применяют счетчики индукционной системы. Схема включения в сеть подобна схеме включения ваттметра, т. е. одна обмотка счетчика включается последовательно с нагрузкой, а вторая – параллельно ей

(рис. 5.17). В отличие от ваттметров в цепи параллельной обмотки никаких добавочных сопротивлений нет, так как для создания вращающегося магнитного поля токи в двух катушках должны быть сдвинуты в фазе на угол, близкий к  $90^\circ$ .

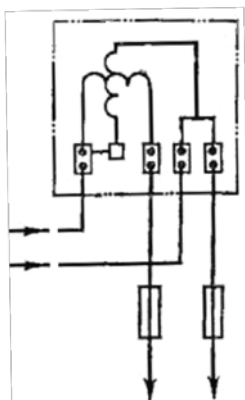


Рис. 5.17. Схема включения счетчика

На таблице счетчика указано напряжение, ток, частота, на которые он рассчитан, в каких единицах измеряют энергию, какому количеству оборотов диска соответствует расход энергии в 1 кВт·ч.

## 5.12. Измерение сопротивлений

Для измерения сопротивления может быть использован метод амперметра и вольтметра. Используя показания приборов, включенных с измеряемым резистором, имеем:

$$R_x = \frac{U}{I}.$$

Для большей точности при измерении малых сопротивлений приборы следует включать так, чтобы сопротивление амперметра не влияло на показания вольтметра (рис. 5.18, а), а при измерении больших сопротивлений – так, чтобы сопротивление вольтметра не влияло на показания амперметра (рис. 5.18, б). Для ограничения силы тока включается добавочное сопротивление  $R_d$ .

Для непосредственного измерения сопротивлений служат приборы омметры и мегомметры, которые могут включаться в схему последовательно или параллельно.

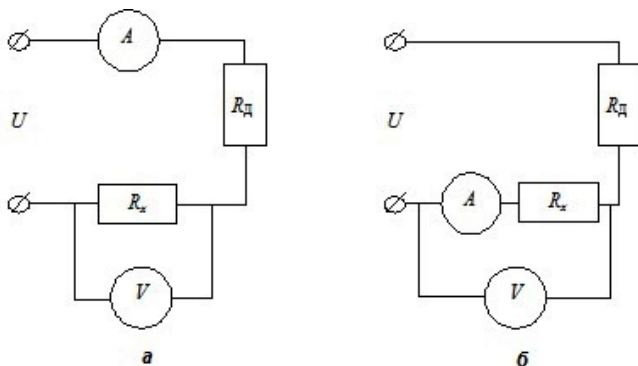


Рис. 5.18. Схема включения амперметра и вольтметра при измерении сопротивлений:  
*а* – малой величины; *б* – большой величины

Более точным методом измерения сопротивления и других электрических величин (индуктивностей, емкостей) является мостовая схема. Мост для измерения сопротивления состоит из трех плеч с регулируемыми сопротивлениями, которые вместе с четвертым измеряемым сопротивлением образуют замкнутый контур. При измерении малых сопротивлений большую погрешность вносят сопротивления контактов и соединительных проводов. В таких случаях используют более сложные схемы (двойные мосты).

### 5.13. Измерение неэлектрических величин

Широко применяется измерение неэлектрических величин электрическими методами, так как с их помощью получают измерение дистанционное, непрерывное, высокой точности и чувствительности.

Для проведения измерений неэлектрическую величину необходимо преобразовать в зависящую от нее электрическую величину, определяемую показаниями электроизмерительного прибора. Такое преобразование выполняется первичным измерительным преобразователем (датчиком). Датчики бывают:

– параметрические – преобразовывают неэлектрическую величину в один из параметров электрической цепи (сопротивление, индуктивность, емкость);

– генераторные – преобразовывают неэлектрическую величину в ЭДС.

Устройства для измерения неэлектрических величин принципиально должны содержать преобразователь, соединительные провода и электроизмерительный прибор, шкала которого проградуирована в значениях измеряемой величины. В действительности эти устройства значительно сложнее, так как они содержат еще источники питания, стабилизаторы, выпрямители, усилители и т. д.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Список рекомендуемой литературы.....	3
Лекция 1. Электрические цепи постоянного тока.....	5
Лекция 2. Основные соотношения в цепи синусоидального тока.....	24
Лекция 3. Электрические цепи переменного тока.....	31
Лекция 4. Трехфазные цепи переменного тока.....	48
Лекция 5. Электрические измерения и электроизмерительные приборы.....	58

Учебное издание

**Пузевич** Константин Леонидович

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Курс лекций

Редактор *С. Н. Кириленко*

Технический редактор *Н. Л. Якубовская*

Корректор *А. С. Зайцева*

Подписано в печать 15.12.2020. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Ризография. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 5,11. Уч.-изд. л. 4,57.

Тираж 40 экз. Заказ .

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».

Свидетельство о ГРИИРПИ № 1/52 от 09.10.2013.

Ул. Мичурина, 13, 213407, г. Горки.

Отпечатано в УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».

Ул. Мичурина, 5, 213407, г. Горки.