

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Электричество — совокупность явлений, связанных с существованием, движением и взаимодействием электрических зарядов.

В обычной жизни электричеством называют электрическую энергию, потребляемую от источников энергии. В качестве источников используются химические, солнечные, геотермальные, электромеханические электростанции. От этих электростанций электрическая энергия по электрическим проводам передается потребителям. У потребителей электроэнергия преобразуется в световую, тепловую, химическую, механическую энергию, необходимую для жизнедеятельности всех живых организмов. Источники электроэнергии, устройства передачи ее и потребители образуют электрическую цепь.

В электрических цепях различают источники электродвижущей силы (ЭДС) и источники тока. В своей практической деятельности мы почти в 100% используем источники ЭДС. ЭДС — это разность электрических зарядов на выводах источника. На одном выводе накапливается избыток электронов, на другом — недостаток. Если соединить между собой выводы источника, то по соединительным проводам будет протекать электрический ток. Можно считать, что ЭДС равна напряжению на выводах источника питания (аккумулятора, трансформатора, генератора) на холостом ходу. Это напряжение можем измерить вольтметром. В высоковольтных установках свыше 1 000 В напряжения измеряют вольтметром через измерительные трансформаторы напряжения. У идеальных источников ЭДС напряжение на выходных зажимах не изменяется при любой нагрузке [2].

Только в сильноточных электрических цепях используются источники тока — это измерительные трансформаторы тока. У идеальных источников тока ток во вторичной обмотке не изменяется при изменении нагрузки. С помощью трансформаторов тока измеряют величины переменных токов. Разновидностью трансформаторов тока являются широко распространенные среди электромонтеров токоизмерительные клещи, но у них невозможно изменить нагрузку, которой является электроизмерительный прибор.

В энергетике и в электронике используют цепи постоянного (не изменяющегося по величине в течение времени) и переменного (изменяющегося по величине в течение времени) тока. Цепи постоянного тока получают питание от аккумуляторов, генераторов постоянного тока, выпрямителей. При протекании постоянного тока по проводам учитывают только их активное сопротивление. На постоянном токе работает почти все электрооборудование автомоби-

лей, тракторов и других транспортных средств. На этих транспортных средствах постоянный ток поступает в бортовую сеть от синхронных генераторов переменного тока, на выходе которых установлены выпрямители.

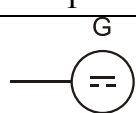
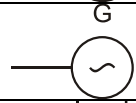

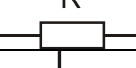


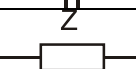

Цепи переменного тока получают питание от трансформаторов, генераторов переменного тока. При расчете цепей переменного тока следует учитывать активное, индуктивное и емкостное сопротивление. Переменный ток используется в быту и во всех видах промышленного и сельскохозяйственного производства.

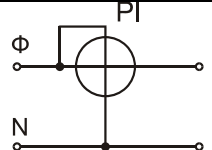
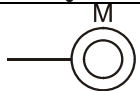


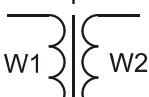
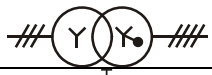
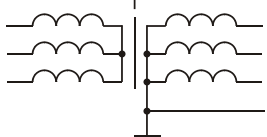



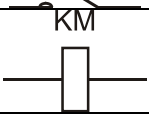



Рисовать даже в масштабе элементы электрических цепей громоздко, а их соединение и взаимное влияние выяснить при виде картинки невозможно. Поэтому каждый элемент электрической цепи изображается условным графическим изображением (своеобразным иероглифом). Из этих изображений «собирается» на чертеже цепь любой сложности, понятная грамотному электрику.

1.1. Условные графические изображения

Приведем лишь некоторые из многочисленных элементов, размеры и внешний вид которых зафиксированы в стандартах (табл. 3). Сверху условного графического изображения обозначается их буквенное название. Получаем своеобразную азбуку электрика. Во многих случаях к этой азбуке не требуется делать пояснения.

Таблица 3. Условные графические обозначения

Обозначение	Название
1	2
	генератор постоянного тока
	генератор переменного тока
	аккумулятор, батарейка
	активное сопротивление
	индуктивность; индуктивное сопротивление
	емкость-конденсатор, емкостное сопротивление
	полное сопротивление
	трансформатор тока

1	2
	однофазный счетчик активной энергии
	асинхронный электродвигатель
	осветительная лампа накаливания
	силовой однофазный трансформатор в однолинейном изображении;
	силовой однофазный трансформатор в развернутом изображении
	силовой трехфазный трансформатор в однолинейном виде
	силовой трехфазный трансформатор в развернутом (трехфазном) виде
	предохранитель с плавкой вставкой
	автоматический воздушный выключатель
	силовой контакт магнитного пускателя
	катушка управления магнитным пускателем
	заземление, заземляющее устройство
	разъемное соединение проводников
	неразъемное соединение проводов

1.2. Закон Ома

В замкнутой цепи под действием ЭДС источника протекает ток. Сила тока на всех участках неразветвлённой цепи одинакова. Сила тока измеряется в амперах. *Один ампер — это ток, при протекании которого по двум бесконечно длинным проводам, находящимся в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, создается сила $2 \cdot 10^{-7}$ Ньютонов на каждый метр провода [3].*

ЭДС и напряжения показывают разность электрических зарядов между двумя точками. Напряжения и ЭДС измеряются в вольтах. *Один вольт — это разность потенциалов между концами проводника с током 1 А, сопротивление которого 1 Ом.*

Ток в элементе цепи при постоянной температуре пропорционален ЭДС, под действием которой он протекает. Отношение ЭДС к силе тока называется сопротивлением.

Сопротивление называется активным, если энергия, выделяемая в нем, безвозвратно переходит в тепловую.

$$R = \frac{E}{I}, \quad \text{отсюда} \quad I = \frac{E}{R},$$

где R — сопротивление проводника постоянному току;

E — ЭДС источника;

I — сила тока.

Последняя формула отражает закон Ома для участка цепи. *Ток на участке цепи пропорционален разности потенциалов на концах этого участка (напряжению между концами) и обратно пропорционален сопротивлению участка.*

Сопротивление можно рассматривать как способность элемента цепи препятствовать прохождению тока. Оно зависит от удельного сопротивления материала, из которого изготовлен элемент, его формы и размера. Из физики известно, что для металлических проводников сопротивление вычисляется по формуле

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

где ρ — удельное сопротивление проводника, Ом·м, в литературе встречается измерение ρ в Ом·мм²/м. Если сечение проводника подставлять в мм², а длину — в м, то сопротивление получим в омах;

l — длина проводника, м;

s — площадь поперечного сечения проводника, м².

Закон Ома применим для всей цепи, по которой протекает ток, при этом в цепи надо учитывать внутреннее сопротивление источника (генератора, аккумулятора) $R_{ВНУТ}$ и внешнее $R_{ВНЕШ}$, это осветительные лампы, облучатели, нагреватели, электродвигатели, соединительные провода.

$$I = \frac{E}{R_{ВНЕШ} + R_{ВНУТ}}.$$

Для участка цепи закон Ома не учитывает внутреннее сопротивление источника, поэтому чаще всего записывают, заменяя ЭДС напряжением (разностью потенциалов) между концами нагрузки (сопротивления), при этом подстрочный индекс у сопротивления опускают

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

1.3. Мощность и работа электрического тока

Электроны, движущиеся в проводнике под действием разности потенциалов, сталкиваются с его атомами и передают им свою энергию. В результате элемент нагревается. Скорость, с которой электрическая энергия расходуется на нагревание проводника, называется активной мощностью и измеряется в ваттах, Вт = В·А. Один ватт — это мощность, которая выделяется в проводнике, по которому протекает ток 1 А при разности потенциалов 1 В. По закону Ома $U = I R$ или $I = U/R$, поэтому формула мощности представляется в двух видах:

$$P = UI = IRI = I^2R,$$

$$P = UI = U(U/R) = U^2/R,$$

где U — разность потенциалов по концам проводника.

Первой формулой удобно пользоваться при последовательном включении сопротивлений, а второй — при параллельном.

Произведение мощности на время дает работу. Работа, совершаемая электрическим током, измеряется в Вт·часах (кВт·часах). По закону Джоуля-Ленца при протекании тока I по проводнику она равна [3]

$$W = I^2 R t,$$

где t — время протекания тока.

При изменяющемся токе энергия будет изменяться, а также ее количество. Если представить изменение тока в виде ступенек, то общее количество электроэнергии будет представлять собой площадь ступенчатой фигуры (рис. 1.1):

$$W = \sum_{i=1}^{i=n} I_i^2 R t_i = R \sum_{i=1}^{i=n} I_i^2 t_i ,$$

где I_i — величина тока на i -ой ступени;
 t_i — время протекания тока I_i .

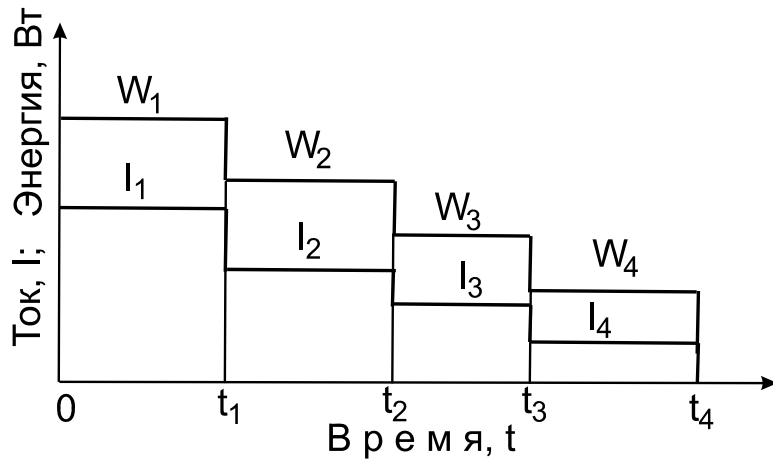


Рис. 1.1. Ступенчатый график изменения тока и энергии во времени

По оси ординат в одном масштабе откладываем ток, а в другом масштабе — энергию.

При бесконечно малых промежутках времени t_i получим при известном законе изменения тока во времени от 0 до T :

$$W = R \int_0^T I^2(t) dt.$$

Именно такое количество электроэнергии или теплоты тратится на нагрев проводника, по которому протекает ток. Закон Джоуля-Ленца гласит: *количество теплоты (электроэнергии), выделяемое проводником с током, равно произведению квадрата силы тока, активного сопротивления проводника и времени протекания тока по проводнику.*

Работу, которую совершает электрическая энергия в квартире, отражает счетчик активной энергии. Счетчик измеряет количество электроэнергии в киловатт-часах. При неизменном напряжении счетчик вычисляет энергию в соответствии с формулой

$$W = R \int_0^T I_{\text{АКТ}}^2(t) dt ,$$

где $I_{\text{АКТ}}$ — активная составляющая тока, выполняющая полезную работу.

Электрическая энергия обеспечивает комфортные условия жизни путем преобразования в световую, тепловую, механическую энергию.

1.4. Виды соединения резисторов

Резистор — это элемент с заданной величиной сопротивления. В нашей жизни встречается чаще всего параллельное, реже последовательное и еще реже — смешанное соединение резисторов.

При параллельном соединении концы резисторов соединяются в узлах А и В (рис. 1.2). Участки цепи, соединяющие два узла, называются ветвями. Как видно из рис. 1.2. между точками А и В проложено две ветви, по которым протекают токи I_1 и I_2 . Нетрудно видеть, что при установившемся режиме количество электричества, притекающего к узлу, равно количеству электричества, вытекающего из узла.

$$I_1 + I_2 = I_{\text{ОБЩ}}, \quad (1)$$

или $\Sigma I = 0$.

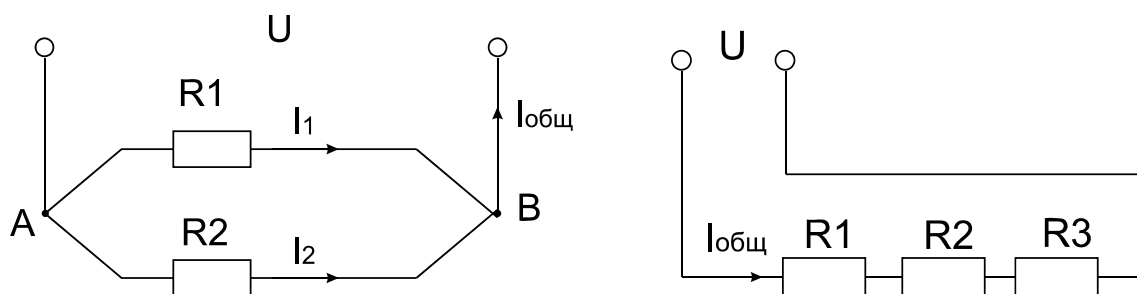


Рис. 1.2. Параллельное и последовательное соединение сопротивлений

Если обозначить направление тока к узлу с плюсом, а направление тока, вытекающего из узла, с минусом, то получим

$$I_1 + I_2 - I_{\text{ОБЩ}} = 0.$$

Алгебраическая сумма токов, сходящихся в любом узле схемы, равна нулю — это первый закон Кирхгофа.

Можно сформулировать этот закон в другой форме: сумма подтекающих к любому узлу токов равна сумме утекающих от узла токов [3].

Выведем формулу для нахождения общего сопротивления двух параллельно включенных резисторов $R_{\text{ОБЩ}}$.

Тогда $U = I_{\text{ОБЩ}} R_{\text{ОБЩ}}$.

При параллельном соединении к обоим резисторам подводится одинаковое напряжение, тогда

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \quad I_{\text{ОБЩ}} = \frac{U}{R_{\text{ОБЩ}}}.$$

Подставим значения токов в уравнение (1)

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

После сокращения на U получим

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

Величина, обратная сопротивлению, называется проводимостью ($g_{\text{ОБЩ}}$). Поэтому при параллельном соединении сопротивлений складываются проводимости, это понятие более подробно рассмотрено в курсе теоретических основ электротехники (ТОЭ).

Отсюда находим сопротивление, эквивалентное двум параллельно включенным R_1 и R_2 , то есть два сопротивления можем заменить одним

$$R_{\text{ОБЩ}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (2)$$

Общее сопротивление всегда меньше меньшего из двух сопротивлений. Если параллельно включены три сопротивления R_1, R_2, R_3 то сначала можно найти общее для двух сопротивлений R_{12} , а затем для параллельно включенных резисторов R_{12} и R_3 находят общее для трех сопротивлений R_{123} . Если параллельно соединены n равных между собой сопротивлений R , то

$$R_{\text{ОБЩ}} = R/n.$$

При последовательном соединении через резисторы протекает один и тот же ток, тогда на каждом сопротивлении напряжение составит

$$U_1 = I R_1; \quad U_2 = I R_2; \quad U_3 = I R_3.$$

В результате сложения левых частей уравнений получим

$$U_1 + U_2 + U_3 = U_{\text{CD}} = E. \quad (3)$$

На основании полученной формулы делаем вывод: в замкнутой электрической цепи ЭДС или сумма ЭДС равна алгебраической сумме напряжений на отдельных участках цепи — это второй закон Кирхгофа.

Напряжение источника или ЭДС равно

$$U_{\text{CD}} = I R_{\text{ОБЩ}}.$$

После подстановки значений напряжений получим

$$I R_1 + I R_2 + I R_3 = I R_{\text{ОБЩ}}.$$

После сокращения на ток получаем

$$R_1 + R_2 + R_3 = R_{\text{ОБЩ}}. \quad (4)$$

Вывод: При последовательном включении сопротивлений общее сопротивление равно сумме сопротивлений составляющих элементов.

Последовательно включаются, например, два проводника с сопротивлениями R_1 и R_3 , и нагрузка R_2 (см. рис. 1.2).

Для нахождения общего сопротивления смешанно включенных сопротивлений сначала находят эквивалентное сопротивление параллельно включенных, а затем складывают с последовательными сопротивлениями.

1.5. Сопротивления элементов сети переменному току

При протекании постоянного тока вокруг проводника существует постоянное магнитное поле, которое можно обнаружить, например, компасом. Стрелка компаса располагается вдоль силовых линий магнитного поля. При протекании переменного тока по проводнику вокруг проводника появляется переменное магнитное поле. Это магнитное поле влияет на протекание переменного тока, появляется реактивное сопротивление. Сопротивление называется реактивным, если энергия, выделяемая в нем в одну часть периода, полностью возвращается в цепь в другую часть периода переменного тока.

Рассмотрим контур из двух соединенных проводников. При перемещении контура в магнитном поле в каждом проводнике будет наводиться ЭДС. Величина ЭДС известна из курса физики:

$$e = B L v, \quad (5)$$

где B — индукция магнитного потока, в котором движется проводник. Индукция — это плотность магнитного потока.

Другими словами, величина магнитного потока, приходящаяся на единицу площади поперечного сечения, индукция измеряется в теслах T_l ;

L — активная длина проводника, та часть проводника, которая пересекается магнитным полем;

v — скорость перемещения проводника в магнитном поле. Скорость определяется расстоянием и временем.

За небольшой промежуток времени Δt проводник переместится на Δb , тогда $v = \Delta b / \Delta t$ или за бесконечно малый промежуток времени $v = db/dt$. Подставим значение скорости в формулу (5) и преобразуем ее с учетом того, что произведение длины проводника на перемещение дает площадь магнитного потока, которую пересекает проводник.

Кроме этого произведение индукции на площадь пересеченного магнитного потока дает нам изменение магнитного потока

$$e = B L v = B L \frac{\Delta b}{\Delta t} = B \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t},$$

получаем
$$e = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

За бесконечно малый промежуток времени ЭДС наведенная на концах проводника пропорциональна скорости изменения магнитного потока

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

Если в проводнике, пересекающем магнитное поле, наводится ЭДС, то, и наоборот, в неподвижном проводнике при пересечении его магнитным потоком наводится ЭДС. Говорят, что в проводнике индуцируется ЭДС. Направление ЭДС в проводнике определяется по правилу правой руки.

При протекании переменного тока по проводнику вокруг него создается магнитное поле, которое пересекает свой проводник и наводит в нем ЭДС самоиндукции. Значит, *ЭДС самоиндукции — эта такая ЭДС, которая возникает в проводнике от собственного переменного тока.* Направление ЭДС получим из закона Ленца, по которому ЭДС, индуцируемая в проводнике, должна иметь такое направление, чтобы магнитный поток, создаваемый ЭДС и током самоиндукции, имел направление, противоположное основному потоку.

В электрических сетях формы тока и напряжения задаются генераторами на электростанциях. В генераторах обмотки, в которых наводится напряжение, укладываются в пазы статора так, что мгновенные значения токов и напряжений изменяются по синусоидам:

$$i = I_m \sin \alpha, \quad u = U_m \sin \alpha$$

или
$$i = I_m \sin \omega t, \quad u = U_m \sin \omega t,$$

где ω — угловая скорость поворота ротора турбогенератора в радианах в секунду (окружность составляет 2π радиан);

t — текущее время.

Угол α изменяется в пределах от 0 до 360° или от 0 до 2π радиан. Этот угол, характеризующий стадию синусоидальной величины, называется фазовым углом, или фазой. Мгновенное значение синусоидальной величины зависит от угла между моментом перехода синусоиды через нулевое значение в сторону возрастания до момента измерения.

Если по витку пропускать синусоидальный переменный ток и фазу отсчитывать в радианах, то мгновенное значение тока равно

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

где I_m — максимальное (амплитудное) значение тока в витке;

Этот ток создает переменный магнитный поток, совпадающий с током

$$\Phi = \Phi_{m1} \sin \omega t,$$

где Φ_{m1} — максимальное (амплитудное) значение магнитного потока одного витка, Вб.

Рассмотрим подключение катушки с большим количеством витков w (соленоида) к источнику переменного напряжения (рис. 1.3).

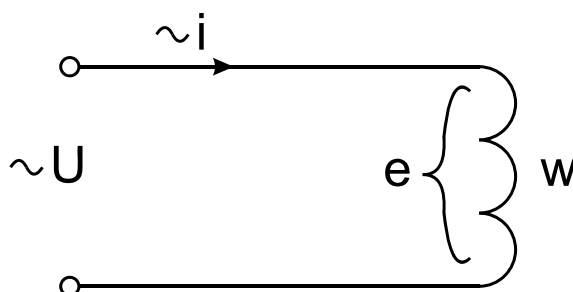


Рисунок 1.3. Подключение катушки к источнику переменного напряжения

В катушке будет протекать переменный ток, который создает суммарный переменный магнитный поток [3].

$$\Phi = \Phi_1 w \sin \omega t, \quad (6)$$

где Φ_1 — магнитный поток одного витка;
 w — число витков катушки.

Произведение $\Phi_1 w = \psi$ называется потокосцеплением катушки. Если катушка не имеет ферромагнитного сердечника, то потокосцепление пропорционально силе тока в катушке

$$\Phi_1 w = \psi = L I_m,$$

где L — коэффициент пропорциональности, называемый индуктивностью катушки.

Тогда формулу (6) можем переписать

$$\Phi = L I_m \sin \omega t.$$

Индуктивность не зависит от протекающего тока катушки и вычисляется по формуле

$$L = \mu_0 \mu n^2 V,$$

где μ_0 — абсолютная магнитная проницаемость, $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$ Гн/м;

μ — относительная магнитная проницаемость;
 n — количество витков, приходящееся на единицу длины катушки (зависит от диаметра провода катушки);
 V — объем, занимаемый витками катушки.

Приведенная формула показывает, что индуктивность катушки зависит от числа витков, сечения провода, габаритов, другими словами, от параметров катушки.

В катушке будет наводиться ЭДС самоиндукции от изменения собственного магнитного потока. Эта ЭДС уравновешивает приложенное напряжение. По второму закону Кирхгофа, в любой момент времени $u + e = 0$.

Отсюда для мгновенных значений $u = -e$. В любой момент времени напряжение, приложенное к катушке, уравновешивается наведенной в ней ЭДС.

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

Отсюда $e = -L \frac{di}{dt}$.

Найдем производную тока

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

Тогда $u = +L \omega I_m \cos \omega t$.

С использованием формул приведения получаем

$$u = +L \omega I_m \cos \omega t = L \omega I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

На катушке индуктивности напряжение опережает ток на 90° или *ток через индуктивность отстает от напряжения на 90°* . Нетрудно видеть, чтобы размерности левой и правой частей совпадали, необходимо, чтобы $L\omega$ имела размерность В/А, а это Ом и обозначается X_L ($X_L = \omega L$ — индуктивное сопротивление). Индуктивное сопротивление зависит от частоты тока и от индуктивности. С увеличением частоты тока, протекающего по проводнику, индуктивное сопротивление возрастает.

Отставание тока, изменяющегося по синусоиде, от напряжения, изменяющегося по косинусоиде, ясно видно из графиков (рис. 1.4).

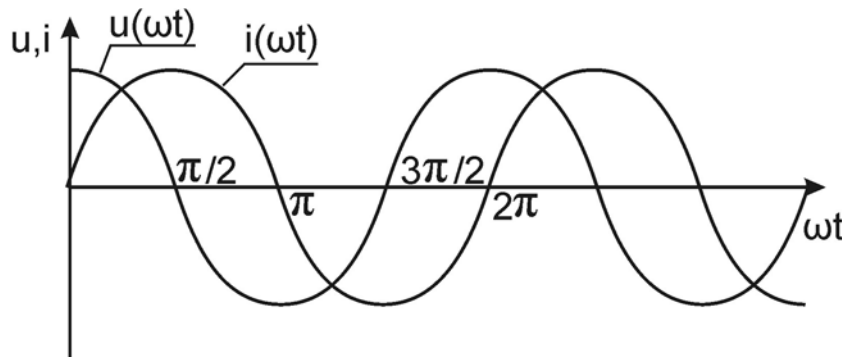


Рис. 1.4. Синусоиды тока и напряжения

Изобразить переменный ток, переменное напряжение синусоидами громоздко. Поэтому синусоиду заменяют вектором. Для этого изобразим синусоиду в функции угла поворота ротора генератора $\alpha = \omega t$. (рис. 1.5). Все турбогенераторы электростанций России вращаются с одинаковой частотой 50 об/с, что соответствует 50 периодам изменения синусоиды напряжения в секунду.

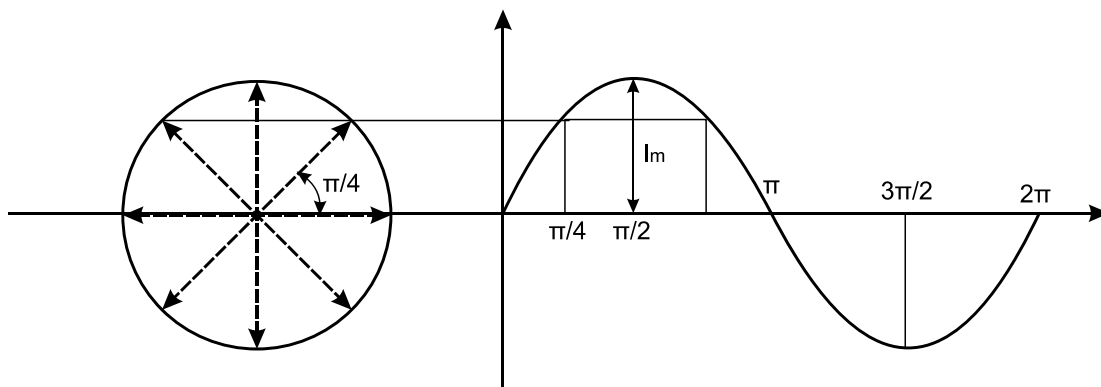


Рис. 1.5. Замена синусоиды вектором

Когда $\omega t = 0$, то вектор, равный амплитуде синусоиды, расположим на комплексной плоскости горизонтально, направленный вправо. Мгновенные значения напряжений в любой момент времени будем определять, проецируя вектор на вертикальную ось (ордината вектора). Тогда мгновенное значение синусоидальной величины через 45° (угол 45° соответствует $\pi/4$) будет равно ab . Но при повороте вектора на 45° мгновенное значение (ордината вектора) также равно ab . При повороте вектора на 90° мгновенное значение равно амплитуде, то же самое отражается на синусоиде. Значит, любую синусоидальную величину можно заменить вращающимся вектором с частотой ω против часовой стрелки.

Размерность угловой частоты

$$\omega = 360^\circ/T,$$

где T — период колебания или полный цикл изменения мгновенных значений тока, напряжения и любой синусоидальной величины $T = 1/f$;

f — частота тока, Гц.

Угловую частоту выражают в радианах, 1 радиан = $57^\circ 17'$, тогда окружность $360^\circ = 2\pi$ рад $\approx 6,28$ рад.

$\omega = 2\pi f$; $\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314$ рад/с = 314 1/с. — это синхронная частота вращения ротора генератора и магнитного поля, создаваемого ротором. С такой частотой изменяется мгновенное значение синусоиды тока или напряжения в сети.

Рассмотрим электрическую цепь, в которой к источнику напряжения U подключены активное сопротивление и катушка индуктивности (рис. 1.6).

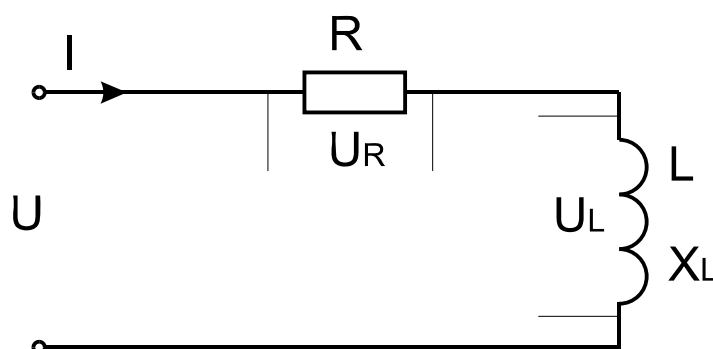


Рис. 1.6. Подключение к источнику питания активного и индуктивного сопротивлений

Вектор тока направим горизонтально. В этом же направлении расположится вектор падения напряжения на активном сопротивлении \underline{U}_R . Индуктивный ток отстает от напряжения \underline{U}_L на 90° (вращение векторов против часовой стрелки). Напряжение источника $\underline{U}_{ИСТ}$ получим в результате сложения векторов \underline{U}_R и \underline{U}_L (рис. 1.7).

$$\underline{U}_{ИСТ} = \underline{U}_R + \underline{U}_L.$$

Полученная диаграмма показывает, что в рассматриваемой цепи, содержащей активное сопротивление, с катушкой индуктивности ток отстает от напряжения источника на угол φ .

На векторной диаграмме, если

$$\underline{U}_R = \underline{I} R,$$

то

$$\underline{U}_L = \underline{I} X_L.$$

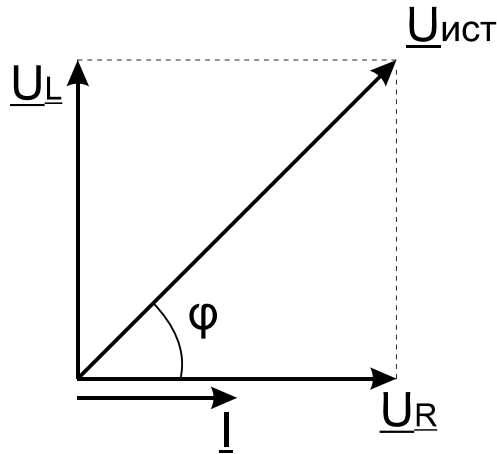


Рис. 1.7. Векторы напряжений на активном и индуктивном сопротивлениях

Индуктивность катушки, находящейся в воздухе, является величиной постоянной и определяется конструкцией (числом витков, размерами катушки), а индуктивное сопротивление зависит от частоты тока и находится по выражению

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

Угол φ (см. рис. 1.7) зависит от соотношения индуктивного и активного сопротивлений (находим из треугольника напряжений):

$$\varphi = \arctg \frac{U_L}{U_R} = \arctg \frac{X_L}{R} .$$

Кроме индуктивного сопротивления в электрических цепях следует учитывать другое реактивное сопротивление — емкостное сопротивление, величина которого зависит от частоты и величины емкости:

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

С увеличением частоты емкостное сопротивление конденсатора переменному току снижается. В отличие от индуктивности, ток, протекающий через емкость, опережает напряжение. Обкладки конденсатора перезаряжаются каждый полупериод переменного напряжения. Емкостные сопротивления в обыденной электротехнике встречаются сравнительно редко, поэтому в этом пособии не рассматриваются.

Но, следует иметь в виду, если к конденсатору подведено постоянное напряжение, например, от аккумулятора, то через небольшой промежуток времени конденсатор зарядится до этого напряжения. После заряда ток через конденсатор не протекает.

1.6. Соотношение сопротивлений и мощностей на переменном токе

На переменном токе следует учитывать не только активное сопротивление проводников, но и реактивное (емкостное или чаще индуктивное). Из векторной диаграммы напряжений на активном и индуктивном сопротивлениях (см. рис. 1.7) ясно, что векторы \underline{U}_R и \underline{U}_L расположены под углом 90° друг относительно друга, а три вектора \underline{U}_R , \underline{U}_L и $\underline{U}_{ИСТ}$ образуют прямоугольный треугольник.

Угол φ показывает, насколько ток в сопротивлении Z отстает от напряжения. Величина $\cos \varphi$ называется *коэффициентом мощности*. Длины отрезков этого треугольника разделим на ток I , получим сопротивления R , X_L и Z , представляющие стороны также прямоугольного треугольника (рис. 1,8), из него получаем

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2},$$

где Z — полное сопротивление участка сети переменному току.

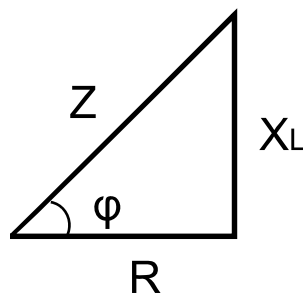


Рис. 1.8. Треугольник сопротивлений

Если известно активное сопротивление и угол φ , то $Z = R/\cos \varphi$. В комплексной форме соотношение сопротивлений записывается

$$Z = R + jX.$$

Активное сопротивление на переменном токе практически по величине совпадает с сопротивлением на постоянном токе, поэтому его можно измерить омметром. А полное сопротивление переменному току можно измерить, измеряя величины напряжения и тока, а затем вычислить по закону Ома

$$Z = U_{ПЕР}/I_{ПЕР}.$$

Переменный ток на участке сети чаще всего отстает от приложенного напряжения (см. рис. 1.8), так как преобладают активные и индуктивные сопротивления.

Для нахождения общего сопротивления при последовательном включении двух сопротивлений на переменном токе необходимо складывать отдельно активные и отдельно реактивные сопротивления. При сложении двух последовательно включенных сопротивлений

$$Z_1 = R_1 + j X_1 \quad \text{и} \quad Z_2 = R_2 + j X_2$$

получим $Z_{OB} = (R_1 + R_2) + j (X_1 + X_2)$.

Это соответствует удлинению катетов (см. рис. 1.8) и модуль полного сопротивления вычисляется по формуле

$$Z_{OB} = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}.$$

Аргумент полного сопротивления определяется из выражении [4]

$$\varphi_{OB} = \arctg\left(\frac{X_1 + X_2}{R_1 + R_2}\right).$$

Для нахождения общего сопротивления при параллельном включении двух сопротивлений на переменном токе необходимо складывать их проводимости Y . Это отражено при параллельном включении активных сопротивлений, если в формуле (2) заменим активные сопротивления на полные:

$$\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{Z_{OБЩ}} = Y_{OБЩ},$$

отсюда $\frac{1}{Y_{OБЩ}} = Z_{OБЩ} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$.

Построим векторную диаграмму напряжения \underline{U} и тока \underline{I} . Разложим вектор тока на активную составляющую \underline{I}_a и реактивную составляющую \underline{I}_p , получим треугольник токов (рис. 1.9).

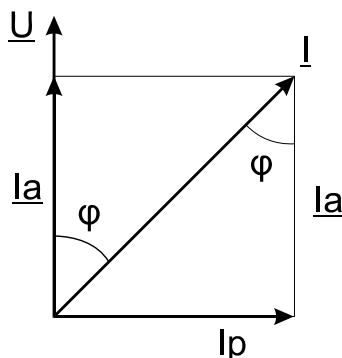


Рис. 1.9. Разложение тока на составляющие

Между активной составляющей и полным током на участке угол φ . Умножим каждую сторону треугольника токов на напряжение U , тогда стороны составят (рис. 1.10):

$$IU = S; I_a U = P; I_p U = Q ,$$

где S — полная мощность;
 P — активная мощность;
 Q — реактивная мощность.

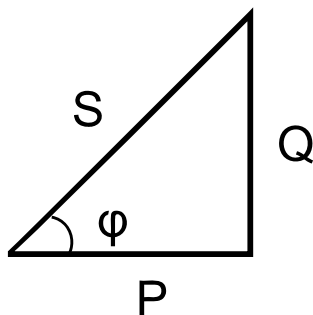


Рис. 1.10. Соотношение мощностей

Из треугольника мощностей получаем вывод, что коэффициент мощности $\cos \varphi = P/S$ показывает, какую долю от полной мощности составляет активная мощность. На любом участке сети соблюдается соотношение

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad P = S \cos \varphi, \quad Q = S \sin \varphi .$$

Выпишем основные полученные выводы электротехники в виде формул и определений.

1. Закон Ома

– для участка цепи $I = \frac{U}{R}$;

– для полной цепи постоянного тока $I = \frac{E}{R_{\text{ВНУТ}} + R_{\text{ВНЕШ}}}$;

– для полной цепи переменного тока $I = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{\text{ВНУТ}} + \underline{Z}_{\text{ВНЕШ}}}$.

2. Первый закон Кирхгофа $\sum I_{\text{УЗЛА}} = 0$.

3. Второй закон Кирхгофа $\sum_{i=1}^{i=n} E_{\text{КОНТУРА}} + \sum U_{\text{КОНТУРА}} = 0$.

4. При параллельном включении двух сопротивлений:

– для постоянного тока $R_{ПАР} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$;

– для переменного тока $\underline{Z}_{ПАР} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$.

5. При последовательном включении сопротивлений:

– для постоянного тока

$$R_{ПОСЛ} = R_1 + R_2 + \dots + R_n;$$

– для переменного тока

$$\underline{Z}_{ПОСЛ} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \dots + \underline{Z}_n,$$

где $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2$ — комплексные сопротивления

$$Z_1 = R_1 + jX_L; \quad Z_n = R_n + jX_n.$$

6. При протекании тока в проводнике теряется мощность на нагрев, она измеряется в Вт, кВт, МВт:

$$P = UI = IRI = I^2 R.$$

7. Реактивная мощность, рассеиваемая на реактивном (индуктивном или емкостном) сопротивлении, измеряется в вар, квар, Мвар:

$$Q_L = I^2 X_L, \quad Q_C = I^2 X_C.$$

8. Работа, совершаемая электрическим током, измеряется в Вт·ч, кВт·ч, МВт·ч:

$$A = I^2 Rt.$$

9. Переменный ток формирует переменное магнитное поле, под действием которого в проводниках возникает ЭДС самоиндукции:

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

10. На активном сопротивлении вектор тока совпадает с вектором напряжения, приложенного к сопротивлению.

11. На индуктивности вектор (или синусоида) тока отстает от вектора (или синусоиды) напряжения на угол 90 градусов ($\pi/4$).

12. На емкости вектор (или синусоида) тока опережает напряжение на угол 90 градусов ($\pi/4$).

Контрольные вопросы

1. Что такое удельное сопротивление проводника?
2. От каких величин зависит сопротивление проводника?
3. Как вычислить сопротивление четырех разных по величине сопротивлений, включенных параллельно?
4. Что представляет собой контур тока, протекающего по лампе в квартирной электропроводке?
5. Что представляет собой треугольник сопротивлений?
6. От чего зависит индуктивное сопротивление проводника на переменном токе?
7. Как соединяются лампы в квартире?
8. Вычислить общее сопротивление двух ламп разной мощности.
9. Что представляет собой треугольник сопротивлений?
10. Изобразить треугольник токов с переменным напряжением.
11. Что представляет собой треугольник мощностей?
12. Что показывает коэффициент мощности?

2. ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Потребитель электрической энергии — это предприятие, организация, территориально обособленный цех, строительная площадка, квартира, у которых приемники электрической энергии присоединены к электрической сети и используют электрическую энергию. К потребителям рекомендуется подводить от электрической сети определенный уровень рабочего напряжения, которое называют номинальным.

2.1. Номинальные напряжения

Номинальным напряжением называется такое, на которое электроустановка рассчитана на заводе-изготовителе для работы в течение всего срока службы. Так, срок службы ламп накаливания составляет 1 000 часов. Если напряжение на лампе превышает номинальное, то ее срок службы резко сокращается. Допустимое отклонение напряжения на всех потребителях по стандарту допускается $\pm 10\%$. Это значит, что к однофазным приемникам допускается подводить напряжение от 210 до 230 В. Для электродвигателей допустимый диапазон изменения напряжения на выводах должен быть в пределах 360...400 В. Такое напряжение у потребителей должны обеспечивать организации, в распоряжении которых находятся электрические сети. Под действием подведенного напряжения через нагрузку протекает электрический ток, который совершает работу, необходимую потребителю.

Номинальное напряжение источников [7] обычно на 5% больше номинального напряжения линий электропередачи и электроприемников (табл. 4).

Таблица 4. Номинальные напряжения систем электроснабжения и приемников трехфазного переменного тока до 1 000 В по ГОСТ 21128—83

Вид тока	Источников, В	Сетей и приёмников, В
Однофазный	6; 12; 28,5; 42; 62; 115; 230	6; 12; 27; 40; 60; 110; 220
Трёхфазный	42; 62; 230; 400; 690	40; 60; 220; 380; 660

Наибольшее количество электроприемников получают электроэнергию по сети 380/220 В. Сеть 380/220 В включает низковольтную обмотку трансформатора 10(6)/0,4 кВ, щит низкого напряжения на стороне 0,4 кВ трансформатора, линии электропередачи 380 В, отходящие от трансформаторного пункта. К линиям элек-

тропередачи 380/220 В подключаются распределительные (вводные) щиты в зданиях потребителей, а затем по внутренним сетям зданий электроэнергия поступает к потребителям.

По надежности электроснабжения потребители делятся на три категории [5]. К первой категории относятся потребители, перерыв питания которых создает угрозу для жизни людей или расстройство непрерывных производств. Перерыв электроснабжения таких потребителей допускается на время автоматического включения резерва, что составляет несколько секунд. Если потребитель не терпит перерыва электроснабжения даже доли секунды, тогда должны использоваться источники бесперебойного электроснабжения (ИБП). В качестве ИБП обычно используют аккумуляторные батареи, которые автоматически вводятся в работу при исчезновении основного питания.

Ко второй категории относятся потребители, перерыв электроснабжения которых допускается на время ручного переключения питания на другой источник. Это время составляет обычно не более одного часа.

Питание потребителей первой и второй категории должно осуществляться по крайней мере от двух независимых друг от друга источников питания: двух трансформаторов и двух линий электропередачи.

К третьей категории относятся все остальные потребители, перерыв электроснабжения которых допускается на время не более 24 часов.

2.2. Измерения электрических величин

Любой потребитель электроэнергии представляет собой сопротивление. Через это сопротивление протекает ток, величину которого необходимо контролировать, чтобы исключить преждевременный выход из строя или выявить причину дефекта. Силу тока измеряют амперметрами. В эксплуатации электроустановок до 1 000 В чаще всего переменный ток измеряют переносным универсальным прибором — токоизмерительными клещами. Клещи содержат разъемный магнитопровод, который охватывает проводник с измеряемым током. На этом же магнитопроводе размещена обмотка, к которой подключен измерительный стрелочный или цифровой прибор, шкала которого проградуирована в амперах. Стрелка прибора отклоняется в зависимости от величины протекающего через прибор тока. Для измерения различных величин токов токоизмерительные клещи имеют переключатель пределов измерения, которым изменяется цена деления шкалы измерительного прибора.

Для потребителей электрической энергии важно знать уровень подводимого напряжения. Напряжение на выводах потребителя или между двумя проводниками измеряют вольтметрами. Вольтметр совмещен с токоизмерительными клещами, для измерения напряжения необходимо измерительный прибор переключить на соответствующий предел измерения напряжения (300 или 500 В) и два изолированных проводника, вставленных в гнезда токоизмерительных клещей, подключить к точкам, между которыми измеряется напряжение.

В сети с напряжением 12 В желательно использовать вольтметр с пределом измерения 15-20 В. Вольтметры подключаются к сопротивлениям нагрузки параллельно. Чтобы вольтметры не вносили искажение в измерение напряжения, их собственное сопротивление должно быть намного больше сопротивления нагрузки, на которой измеряется напряжение. При этом ток, потребляемый вольтметром, намного меньше тока нагрузки, и в процессе измерения напряжение на нагрузке практически не изменяется.

Амперметры включают последовательно с сопротивлением, ток которого измеряется. Для снижения влияния самого амперметра на силу тока сопротивление амперметра делают очень малым. Переменный ток любого потребителя измеряется непосредственно амперметром или при больших токах амперметром, подключаемым через трансформатор тока (рис. 2.1).

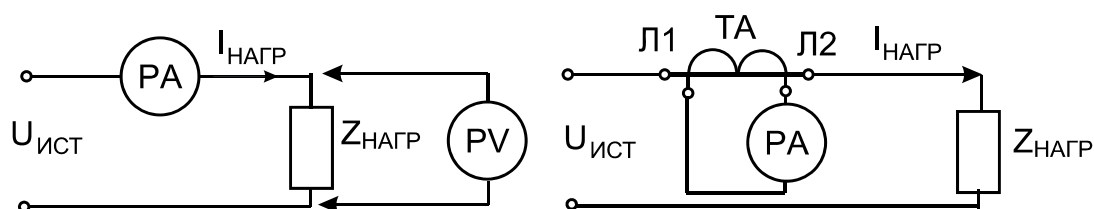


Рис. 2.1. Измерение тока и напряжения на нагрузке

Для таких измерений амперметр или трансформатор тока включается в рассечку силовой или осветительной сети, последовательно с нагрузкой. Трансформатор тока преобразует ток, протекающий по силовой сети, в пропорциональный ток измерительного амперметра. У многих амперметров номинальный ток составляет 5 А.

Третий вид измерения, который выполняют у всех потребителей, — это измерение потребляемой активной энергии. Измерение активной энергии осуществляется счетчиками активной энергии. Для измерения потребляемой энергии в токовую цепь счетчика заводится величина тока потребителя. Ток протекает по токовой обмотке $W_{ТОК}$. Напряжение потребителя подводится к обмотке напряжения $W_{НАПР}$ (рис. 2.2).

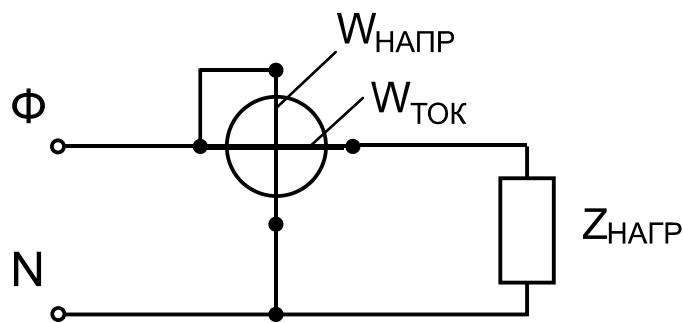


Рис. 2.2. Подключение однофазного счетчика активной энергии

В однофазном счетчике осуществляется непрерывно умножение напряжения на ток, на коэффициент мощности потребителя и на время измерения. Энергия, фиксируемая счетчиком, измеряется в кВт·часах.

Однофазный счетчик измеряет потребляемую активную энергию в соответствии с формулой

$$W^{(1)} = (N_2 - N_1),$$

где N_2 — конечные показания счетчика, например, в конце месяца; N_1 — начальные показания счетчика в начале месяца.

Счетчик активной энергии изготовлен таким образом, что он выполняет непрерывное сложение мощностей

$$W^{(1)} = \sum_{i=0}^{i=n} U_{\phi_i} I_{\phi_i} \cos \varphi_i t_i ,$$

где U_{ϕ_i} — напряжение, подведенное к обмотке напряжения счетчика за короткий промежуток времени;

I_{ϕ_i} — ток, проходящий через обмотку счетчика за то же промежуток времени;

$\cos \varphi_i$ — средний коэффициент мощности за промежуток времени 1 час.

Обычно бытовые потребители фиксируют разность показаний счетчика в конце и в начале за месяц ($N_2 - N_1$) в кВт·часах. В кВт·часах измеряется работа, поэтому потребитель расплачивается за работу, выполненную электроэнергией (нагрев спирали лампы накаливания, вращение электродвигателя компрессора холодильника и др.).

Трехфазные счетчики имеют три измерительных механизма. Они могут включаться без трансформаторов тока или через трансформаторы тока в зависимости от величины тока в контролируемой сети. В настоящее время выпускаются трехфазные

счетчики прямого включения без трансформаторов тока на токи до 100 А. Показания трех измерительных механизмов внутри счетчика суммируются. Так при неизменной нагрузке (нагреватель) за время $t_{РАБ}$ будет потребляться

$$W^{(3)} = (N_2 - N_1) = \\ = (U_{\phi A} I_{\phi A} \cos \varphi_A + U_{\phi B} I_{\phi B} \cos \varphi_B + U_{\phi C} I_{\phi C} \cos \varphi_C) t_{РАБ}.$$

Индексы А, В и С указывают принадлежность рассматриваемой величины к фазе в трехфазной системе.

Отсюда ясно, как вычислить потребляемую мощность и активную составляющую тока. Проходящая через счетчик электрическая энергия совершает работу, превращаясь в световую, тепловую, механическую энергии. Энергия, проходящая через счетчик в единицу времени, называется мощностью. Поэтому для определения мощности, проходящей через счетчик в единицу времени, необходимо снять показания N_1 а затем через час — N_2 . Разность показаний за один час и будет средней мощностью потребителей за один час.

В тех случаях, когда необходимо определить мощность потребителя за более короткий промежуток времени, необходимо считать число импульсов (оборотов диска), например, за одну минуту N_1 . Полученное число импульсов (оборотов диска) умножить на 60 (число минут в 1 часе), получаем число импульсов (оборотов диска) $N_1 \cdot 60$, если бы потребитель работал с неизменной нагрузкой в течение часа. На лицевой панели счетчика написано, например, 1 кВт·час — 1 200 об. диска. Тогда реальная активная мощность, потребляемая за 1 час, составит

$$P_{ДЕЙСТ} = N_1 \cdot 60 / 1\ 200.$$

Электронный счетчик позволяет определить мощность потребителя по числу импульсов, получаемых от светодиодов на лицевой панели.

2.3. Подключение потребителей по четырехпроводной схеме

В сельском хозяйстве электрическая энергия используется:

- в электродвигателях, где электроэнергия преобразуется в механическую энергию, приводящих в работу вентиляторы, вакуумные насосы доильных установок, навозные транспортеры в разнообразных металлообрабатывающих станках, насосах для добывания и транспортировки воды;

- осветительных установках, обеспечивающих необходимую освещенность как в бытовых помещениях, так и в производственных условиях. Известно, что наружное уличное освещение влияет на настроение людей. Снижение освещенности металлообрабатывающих станков пагубно сказывается на производительности и на здоровье людей и животных;
- облучательных установках, обеспечивающих необходимое обеззараживание воды, способствующих ускоренному росту животных;
- электронагревательных установках, обеспечивающих необходимые комфортные условия для жизни людей и животных;
- охладительных установках, обеспечивающих сохранность произведенной сельскохозяйственной продукции;
- компьютерах, радио и телевизионных приемниках.

Когда к существующей нагрузке подключаются другие электроприемники, то это соответствует параллельному подключению сопротивлений. Общее сопротивление уменьшается, а это приводит к увеличению тока по закону Ома.

Подключение потребителей в сетях до выхода ГОСТ 50571 осуществлялось по четырехпроводной схеме (рис. 2.3). В четырехпроводной схеме нулевой проводник выполнял две функции, он использовался:

- для подключения однофазных электроприемников;
- для зануления корпусов электроприемников, нормально не находящихся под напряжением.

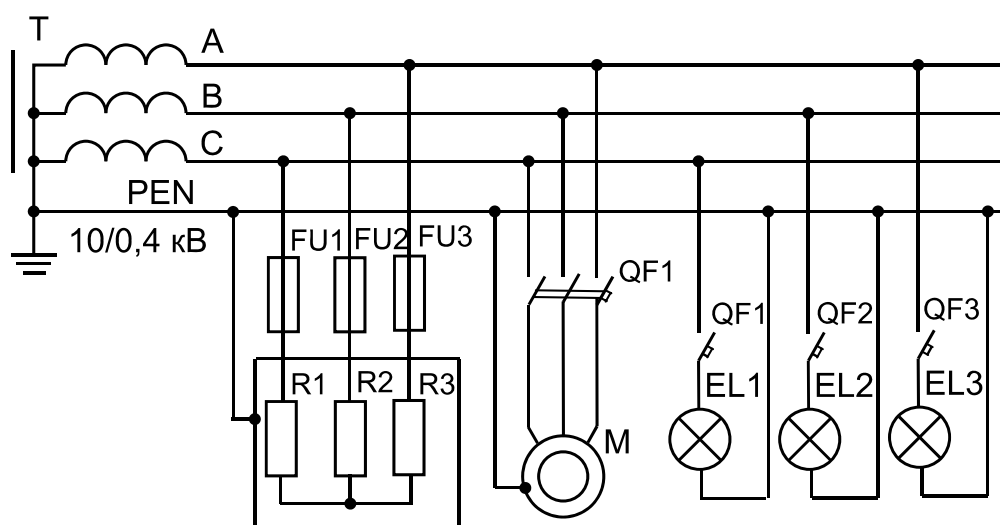


Рис. 2.3. Подключение потребителей в 4-проводной сети 380/220 В

На рисунке 2.3 обозначено: Т 10/04 — обмотка низкого напряжения трансформатора, соединенная в «звезду» с выведенным нулевым проводом.

FU4, FU5, FU6 — предохранители, защищающие сеть от больших токов при замыкании на корпус или между собой сопротивлений R1, R2, R3 трехфазного нагревателя; QF1 — автоматический выключатель, предохраняющий сеть от протекания больших токов при повреждении внутри электродвигателя М; FU1, FU2, FU3 — предохранители, защищающие сеть от токов коротких замыканий в осветительных лампах E11, E12, E13.

Зануление — это электрическое соединение нулевой точки источника (трансформатора) с корпусом электроприемника. Использование нулевого провода по такой схеме приводило к тому, что при несимметричной нагрузке, создаваемой однофазными потребителями, от протекания тока несимметрии на нулевом проводе возникает падение напряжения. Это напряжение прикладывалось ко всем корпусам электроприемников и к металлическим элементам, соединенных с нулевым проводом (автопоилки, корпуса щитов, корпуса электродвигателей). В случае прикосновения к корпусам животные или люди испытывали неприятные пощипывания. Уже при напряжении на автопоилках в 5 В относительно земли удои коров снижались до 10%.

Производственные нагрузки в большинстве случаев получают питание от трехфазных трансформаторов. От четырех выводов низкого напряжения трансформатора прокладывают четыре проводника до помещения: три фазных и нулевой. После внедрения ГОСТ 50571 нулевой проводник называется PEN, совмещающий функции нулевого рабочего проводника N и нулевого защитного проводника PE. Внутри помещений эти два нулевых проводника следует разделять.

В сельском хозяйстве различают бытовую, коммунально-бытовую и производственную нагрузки. Все виды нагрузок подключаются к сетям 380/220 В или к сети 220 В от однофазных трансформаторов. В результате обследований, проведенных Московским энергетическим университетом, бытовая нагрузка содержит 101 разновидность потребителей (нагреватели, освещение, холодильники, стиральные машины, компьютеры, зарядные устройства и т.д.). Коммунально-бытовые потребители — это школы, больницы, клубы, библиотеки. Среди производственных потребителей преобладает электродвигательная нагрузка. Так, на некоторых зерноперерабатывающих пунктах установлено до 60 электродвигателей разной мощности. Все электродвигатели, нагреватели соединяются между собой проводниками и подключаются к се-

ти параллельно. По мере увеличения числа подключенных потребителей их сопротивление в каждой фазе уменьшается, и фазный ток, потребляемый от трансформатора, растет.

Бытовая нагрузка в большинстве сельских поселений является преобладающей по сравнению с производственной. Бытовая нагрузка подключается к одной фазе трехфазной линии, отходящей от питающего трехфазного трансформатора, чаще всего, в сельской местности такой трансформатор преобразует 10 кВ в 380/220 В. В малых населенных пунктах используют однофазные трансформаторы 10/0,23 кВ. Студенту с первого курса необходимо иметь представление, каким образом электроэнергия попадает к потребителям. Среди бытовых потребителей преобладающей является осветительная нагрузка. Освещение бытовых помещений осуществляется пока в большинстве жилых помещений лампами накаливания или энергосберегающими люминесцентными лампами. Если на лампе накаливания написано: 63 Вт, 220 В, это значит, что лампа предназначена для включения в сеть с напряжением 220 В и будет потреблять из сети ток, вычисляемый по формуле мощности:

$$I_1 = P_1/U = 63 \text{ В} \cdot \text{А} / 220 \text{ В} = 0,286 \text{ А}.$$

Сопротивление одной такой лампы по закону Ома составит:

$$R_1 = U/I_1 = 220 / 0,286 = 769 \text{ Ом}.$$

Подключение к сети второй лампы равносильно включению второго сопротивления, параллельного первому. Их общее сопротивление снижается в два раза, соответственно, в два раза возрастает потребляемый ток двумя лампами. Также параллельно к лампам параллельно включается утюг, нагреватель, однофазный электродвигатель, компьютер, телевизор представленный на схеме (рис. 2.4) сопротивлением R , включаемый через розетку XS. Суммарный ток $I_{\text{СУМ}}$ всех потребителей проходит через токовую обмотку счетчика активной энергии PI , который выполняет вычисления по математической формуле

$$W = U_{\text{СЧ}} I_{\text{СУМ}} \cos \varphi_{\text{ПОТР}} t_{\text{ИЗМ}} = N_{\text{КОН}} - N_{\text{НАЧ}}.$$

где W — количество электроэнергии, подсчитанное счетчиком, кВт·ч;

$U_{\text{СЧ}}$ — напряжение, подведенное к обмотке напряжения счетчика, обычно $U_{\text{СЧ}} = U_{\text{ПОТР}}$;

$\cos \varphi_{\text{ПОТР}}$ — коэффициент мощности потребителя, у лампы накаливания, $\cos \varphi_{\text{ПОТР}} = 1$;

$N_{\text{КОН}}, N_{\text{НАЧ}}$ — показания счетчика в конце и в начале времени, за которое производятся измерения (за месяц, за год);

$t_{\text{ИЗМ}}$ — промежуток времени между измерениями (месяц, год).

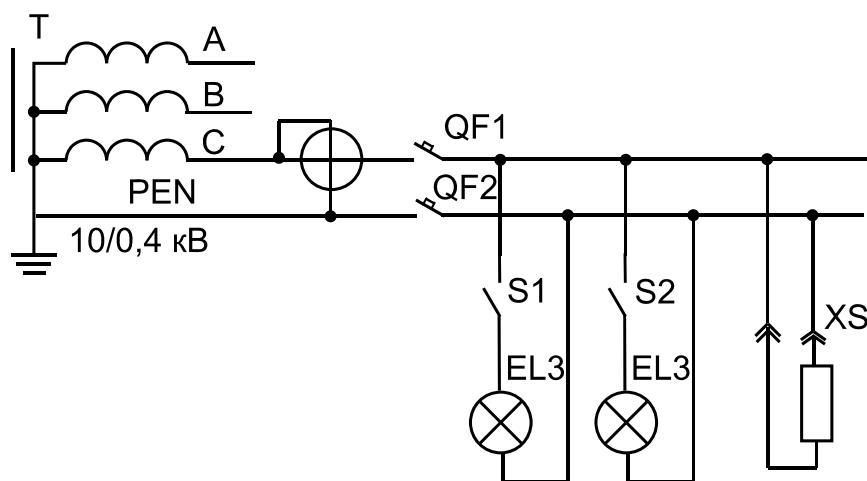


Рис. 2.4. Питание бытовых потребителей от 4-проводной сети

Если через счетчик протекает ток электродвигателя холодильника или стиральной машины, то прибор учтет только активную составляющую тока. Эта активная составляющая совершает полезную работу, например, вращает барабан стиральной машины. Реактивная составляющая тока используется для создания магнитного потока электродвигателя, счетчиком активной энергии не учитывается.

В старых домах в квартиры заводилось два провода для питания бытовых потребителей. В фазном и нулевом проводах устанавливались автоматические выключатели QF1, QF2 для отключения возможных коротких замыканий. Представим, что в момент заворачивания цоколя лампы в патроне соединились лепестки. Сопротивление соединенных лепестков значительно меньше сопротивления нити лампы накаливания 769 Ом. Пусть переходное сопротивление вместе с питающими проводами составит $R_{КЗ} = 0,5$ Ома. Тогда по проводами и через обмотку питающего трансформатора будет протекать ток короткого замыкания КЗ, величина тока определяется по закону Ома

$$I_{КЗ} = U/R_{КЗ} = 220/0,5 = 440 \text{ А.}$$

От такого большого тока замкнувшиеся лепестки патрона расплавляются за очень короткое время. Провода в бытовых помещениях рассчитываются на длительное протекание тока до 20 А, поэтому от тока КЗ провода разогреются за несколько секунд и их изоляция расплавится. Количество выделившегося в проводниках тепла вычисляется в соответствии с законом Джоуля-Ленца. Расплавленные провода с горючей изоляцией, как правило, вызывают пожар. Чтобы этого не случилось любые короткие замыкания в бытовой сети должны отключаться со временем, не превышающем 0,3 с.

Среди бытовых потребителей преобладает осветительная нагрузка, подключаемая на фазное напряжение 220 В. В лампе накаливания от протекающего тока разогревается спираль, изготовленная из высокоомного проводника. Если известна мощность лампы или однофазного нагревателя без вентилятора, то (он) она потребляет только активную мощность, и ток находим в соответствии с формулой

$$P_{Л}^{(1)} = U_{\phi} I_{Л}, \quad I_{Л} = P_{Л}^{(1)} / U_{\phi},$$

где U_{ϕ} — фазное напряжение, которое подводится к потребителю;
 $I_{Л}$ — величина тока, протекающего через сопротивление потребителя. Индекс (1) указывает, что нагрузка подключена к одному фазному и к нулевому рабочему проводу.

Среди производственных потребителей к одной фазе подключаются осветительные, облучательные, однофазные нагревательные установки. К трем фазам подключаются трехфазные нагреватели и трехфазные электродвигатели. Нагреватель представляют собой спираль из высокоомного провода, помещенную в металлическую трубку и изолированную от корпуса трубки мелким песком.

Как уже рассматривали, в электрических сетях, выполненных по старым проектам, нулевой проводник используется как рабочий, так и защитный. Он подключается как к электроприемникам, так и к корпусам. Недостаток такой схемы заключается в том, что однофазные электроприемники E11, E12, E13 создают несимметричную нагрузку, тогда геометрическая сумма их токов протекает по нулевому проводнику PEN. На этом проводнике может теряться напряжение до десятка В, это напряжение прикладывается ко всем корпусам электроприемников, что представляет опасность для жизни людей и животных.

2.4. Подключение потребителей по пятипроводной схеме

В технической литературе фазные проводники часто обозначают А, В, С. Проводники L_1 , L_2 , L_3 и PEN в производственном помещении или в многоквартирном жилом доме заходят в шкаф ввода или распределительный щит. Из распределительного щита внутри помещения отходит обычно несколько линий (рис. 2.5). В соответствии с ГОСТ 50571, каждая линия к трехфазным потребителям содержит пять проводов: три фазных, а нулевой проводник в распределительном щите разделен на два: нулевой рабочий N и защитный PE. К однофазным светильникам подводят три провода: по фазному и нулевому рабочему проводникам протекает ток нагрузки потребителя, а защитный проводник PE проводит ток при коротком замыкании на корпус светильника и обеспечивает срабатывание защиты автоматического выключателя или предохранителя.

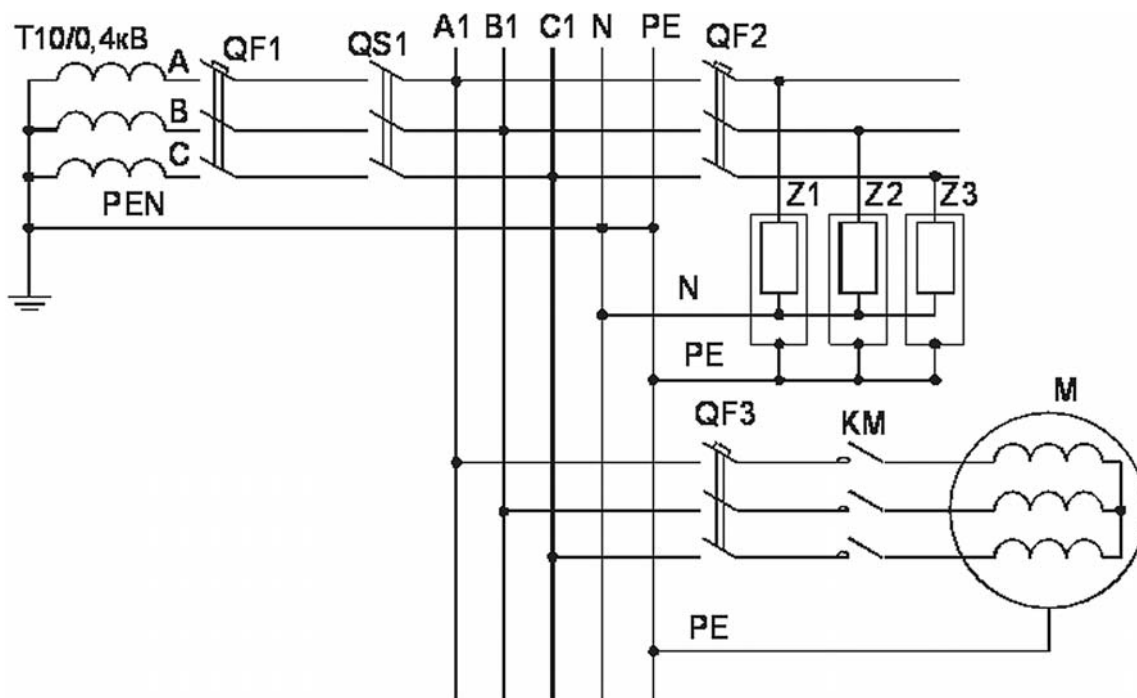


Рис. 2.5. Пятипроводная сеть 380/220 В

На схеме (см. рис. 2.4) показано подключение производственного помещения от трансформатора Т через автоматический выключатель QF1 по четырем проводам: А, В, С, PEN. Перед распределительным щитом в помещении установлен разъединитель QS1. При отключении QS1 можно выполнять ремонтные работы на шинах щита. В распределительном щите нулевой провод PEN разделен на два: рабочую нулевую шину N (N — *Neutral* — *нейтраль*) и защитную PE (PE — *Protect Earth* — *защита земля*). От шин запитаны нагреватели и электродвигатель. Каждый из трех однофазных нагревателей Z1, Z2, Z3 подключен к фазному напряжению через трехфазный или три однофазных автоматических выключателя QF2 (показан трехфазный). К ним подводится рабочий нулевой проводник N. Корпуса всех нагревателей соединены с защитным нулевым проводником PE. При однофазном повреждении изоляции в электроприемнике увеличивается ток в фазном проводе и нулевом защитном проводнике PE. От увеличения тока срабатывает либо предохранитель с плавкой вставкой, либо автоматический выключатель.

Трехфазный электродвигатель М подключен к распределительному щиту через автоматический выключатель QF3, а управляется дистанционно от кнопок управления или от схемы автоматики магнитным пускателем КМ. Магнитный пускатель — это электромагнитный аппарат, предназначенный для дистанционного управления асинхронными электродвигателями.

Для трехфазных нагревателей три сопротивления находятся в одинаковых условиях, по каждому из них протекает одинаковый по величине ток. Активная мощность $P^{(3)}$, потребляемая нагревателем из сети, равна мощности трех однофазных нагревателей и вычисляется по формуле

$$P^{(3)} = 3 P^{(1)} = 3 U_{\phi} I_{\phi} = \sqrt{3} U_{л} I_{\phi},$$

где U_{ϕ} — фазное напряжение на каждой фазе нагревателя, между точками А1 и N;

$U_{л}$ — линейное (междуфазное) напряжение, подведенное из сети.

Чтобы свести до минимума гибель людей в быту при ошибочном прикосновении к фазному проводу, введена трехпроводная система питания бытовых потребителей.

Для осуществления трехпроводной схемы питания на вводном щите жилого помещения нулевой провод, приходящий с трансформаторного пункта, называется PEN. На вводе в жилой дом он разделяется на рабочий N и защитный PE нулевые проводники. В многоквартирных домах разделение осуществляется на вводном щите путем формирования двух нулевых шин. В квартиры вводят три провода. По фазному и нулевому N проводнику протекает ток нагрузки, а PE-проводник подключается к корпусам электроприемников (двигателей, нагревателей, металлическим частям осветительных приборов).

Рассмотрим примеры:

1. В существующей квартире используется двухпроводная система питания потребителей, вечером включается три лампы по 100 Вт, 220 В. Определить ток, потребляемый лампами накаливания.

Осветительные лампы включаются параллельно. Каждая лампа потребляет ток, определяемый по формуле (1)

$$I_1 = \frac{P_1}{U} = \frac{100 \text{ Вт}}{220 \text{ В}} \approx 0,45 \text{ А.}$$

Три лампы потребляют ток в три раза больше $I_3 = 3I_1 = 1,35 \text{ А}$. Дополнительно необходимо подключить электрочайник мощностью 1,7 кВт. Выдержат ли электрические провода такую нагрузку?

Вычислим ток, потребляемый чайником

$$I_{\text{ч}} = \frac{1700 \text{ Вт}}{220 \text{ В}} \approx 7,73 \text{ А.}$$

Общая нагрузка по току в квартире составит:

$$I_{\text{ОБЩ}} = I_3 + I_4 = 1,35 + 7,73 = 10,4 \text{ А.}$$

Электропроводка в старых квартирах выполнялась алюминиевым проводом сечением $2,5 \text{ мм}^2$. Такой провод длительно выдерживает ток без перегрева $I_{\text{ДОП}} = 19 \text{ А}$. Поэтому подключение дополнительной нагрузки не приведет к расплавлению изоляции проводов $I_{\text{ОБЩ}} < I_{\text{ДОП}}$.

2. Для увеличения срока службы в подъезде включили две лампы накаливания последовательно на напряжение 220 В . На каждой лампе нанесена маркировка 75 Вт , 220 В . При номинальном напряжении через такую лампу будет циркулировать ток:

$$I_1 = \frac{75 \text{ Вт}}{220 \text{ В}} \approx 0,34 \text{ А.}$$

Сопротивление нити накаливания лампы составит по закону Ома для участка цепи:

$$R_1 = \frac{U}{I_1} = \frac{220 \text{ В}}{0,34 \text{ А}} = 647 \text{ Ом.}$$

При включении лампы на напряжение 220 В потребление мощности составит 75 Вт . Если она будет гореть в течение суток, то за 24 часа она израсходует энергии:

$$W_{\text{СУТ}} = 24 P_{\text{Л}} = 24 \cdot 75 = 1\,800 \text{ Вт}\cdot\text{часов} = 1,8 \text{ кВт}\cdot\text{часа.}$$

Срок службы ламп накаливания при напряжении 220 В составляет $1\,000$ часов, тогда в течение года лампу необходимо заменять восемь раз (в году $8\,760$ часов).

При последовательном включении по лампам протекает общий ток, а напряжение распределится поровну на каждую лампу, так как их сопротивления одинаковые. На каждой лампе будет напряжение $U_1 = U_2 = U/2 = 110 \text{ В}$. Ток через лампы также уменьшится в два раза:

$$I_2 = \frac{U}{2 R_1} = \frac{220 \text{ В}}{2 \cdot 647 \text{ Ом}} = 0,17 \text{ А.}$$

Мощность, которую будет потреблять каждая лампа, равна:

$$P_2 = U_2 I_2 = 110 \cdot 0,17 = 18,7 \text{ Вт.}$$

Две лампы будут потреблять мощность:

$$P_{12} = 2 P_2 = 2 \cdot 18,7 \approx 37,5 \text{ Вт.}$$

Таким образом, благодаря тому, что ток через лампу снижается в два раза срок службы такой лампы составит не $1\,000$ часов, как при обычном напряжении, а несколько лет. Освещенность уменьшится в несколько раз, но ее достаточно, чтобы увидеть замочную скважину, но расход электроэнергии снизится в два раза.

3. Определить количество электроэнергии, которое будет потребляться электрочайником в течение месяца, если каждый день чайник включается на 1 час:

$$W_{\text{ч}} = P_{\text{ч}} t = 1,7 \cdot 30 = 51 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Для питания бытовых или других однофазных потребителей от пятипроводной сети необходимо прокладывать три провода: фазный, нулевой рабочий N и нулевой защитный PE. Провод PE подключается к корпусам электроприемников и предназначен для защиты людей от поражения электрическим током в случае повреждения изоляции фазного провода или при КЗ фазного провода на корпус электроустановки.

2.5. Принцип работы асинхронного двигателя

Наибольшую мощность из нагрузок потребляют трехфазные асинхронные электродвигатели (АД). Электродвигатели предназначены для преобразования электрической энергии в механическую. Их называют электромеханическими преобразователями. Наибольшее распространение получили асинхронные электродвигатели. Асинхронными они получили название из-за того, что у них частота вращения ротора всегда меньше частоты вращения магнитного поля, создаваемого обмотками статора. Ротор и магнитное поле статора вращаются несинхронно [6].

Конструктивно электродвигатель имеет статор, ротор с подшипниками, подшипниковые щиты, которые соединяют ротор и статор. Ротор и приводная машина (вентилятор, насос) соединяются между собой муфтой. Между ротором и статором имеется воздушный зазор. Статор лапами крепится к фундаменту, на котором закрепляется и приводная машина. Статор набирается из кольцевых листов трансформаторной стали с пазами. В пазы листов статора виток к витку укладывается обмотка статора (рис. 2.6).

Ротор набирается также из листов трансформаторной стали, в пазы которой заливаются обычно алюминиевые стержни, соединенные между собой кольцами с выступами, которые выполняют роль внутреннего вентилятора электродвигателя. Такой ротор похож на беличье колесо (в зоопарке во внутренней полости такого колеса бегают белки), поэтому его называют беличьей клеткой.

Представим в разрезе АД. В корпус статора впрессовываются кольцевые листы трансформаторной стали толщиной 0,35 мм, изолированные друг от друга слоем лака. В пазы железа статора укладывается трехфазная обмотка из медной изолированной проволоки. Катушку обмотки из двух витков одной фазы представим на разрезе пазов статора по продольной оси (см. рис. 2.5).

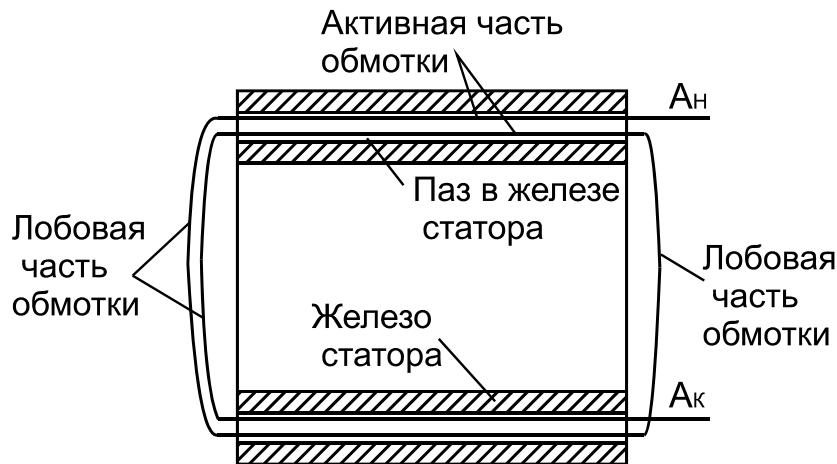


Рис. 2.6. Продольный разрез статора

Изобразим одновитковую обмотку с диаметральной шагом, убрав лобовую часть. Начала и концы обмоток замаркируем $A_H - A_K, B_H - B_K, C_H - C_K$. Концы обмоток соединим вместе — получаем соединение в «звезду». Соединение в «звезду» выполняется либо в коробке выводов, либо на лобовых частях. Выводы A_H, B_H, C_H соединим с питающей сетью 380 В (рис. 2.7). Концы обмоток на заводе-изготовителе выводят в коробку выводов и маркируют для первой фазы $C_1 - C_4$, для второй $C_2 - C_5$, для третьей $C_3 - C_6$.

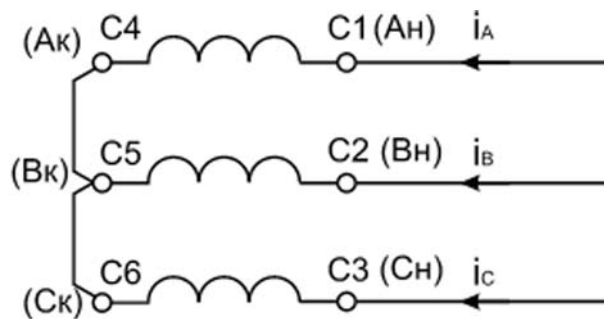


Рис. 2.7. Подключение сети к обмоткам АД

Под действием подведенного трехфазного напряжения $U_{\text{сети}} = 380 \text{ В}$ по обмоткам статора протекают токи. Рассмотрим принцип получения вращающегося магнитного поля на примере статора с удаленным ротором. Если ротор удален, то при подведении напряжения 380 В обмотка статора сгорит от тока, намного больше номинального. Такой ток протекает из-за малого индуктивного сопротивления, поэтому в опытах с удаленным ротором на статор подают такое пониженное напряжение, чтобы ток не превышал номинальный. В исходном положении расположим синусоиды токов, протекающих в обмотках статора, так, что в

фазе А ток будет иметь максимальное мгновенное значение $|I_A| = i_A$ (рис. 2.8). Мгновенное значение тока — это проекция на вертикальную ось и обозначать его будем прописной буквой i .

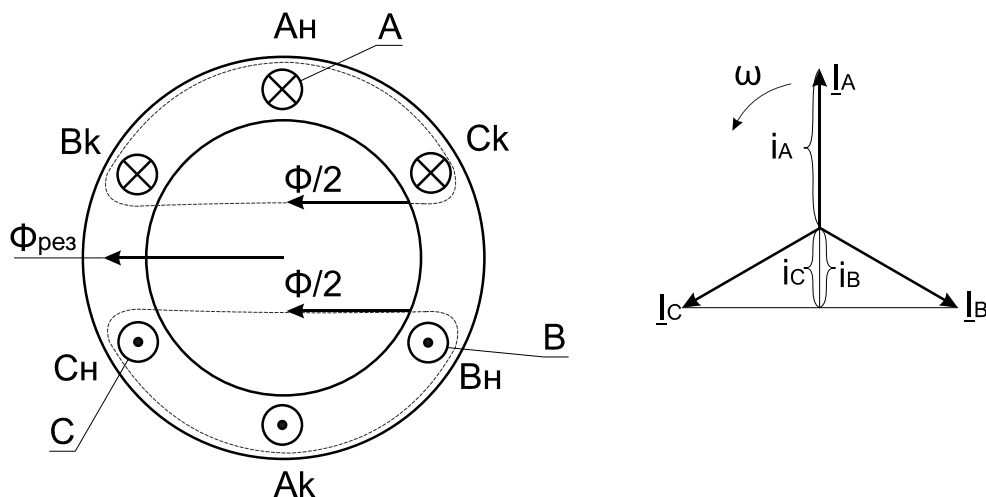


Рис. 2.8. Создание магнитного поля обмоткой статора

Если мгновенное значение тока расположено выше горизонтальной оси, то это направление тока в обмотке «от нас» — крестик, если ток расположен ниже горизонтальной оси, направление его «к нам» — точка. В фазах В и С величина мгновенных токов будет в два раза меньше и имеет противоположное направление по отношению к фазе А $i_B = i_C$. В фазе А ток направлен от начала к концу обмотки — от нас, а в фазах В и С — от конца к началу. При указанном положении векторов видно, что токи в ветвях А_Н, В_к, С_к имеют одинаковое направление. Они создают суммарный магнитный поток $\Phi/2$, направленный по часовой стрелке по правилу правоходового винта. Токи в ветвях С_н, А_к, В_н имеют направление на нас. По правилу правоходового винта, их суммарный магнитный поток $\Phi/2$ имеет то же направление, что и в первом случае. От сложения двух потоков $\Phi/2$ получаем магнитный поток, выходящий из «северного полюса», замыкающийся по железу статора, и входящего в «южный полюс». В этом случае обмотка имеет одну пару полюсов, пара полюсов обозначается $p = 1$.

Сдвинем вектора токов на 90° против часовой стрелки (рис. 2.9), что соответствует четверти периода (0,005 с), тогда мгновенное значение тока в фазе А i_{A90} равно нулю. В фазе В ток i_{B90} изменит свое направление и будет протекать от начала к концу, а в фазе С направление тока не изменится. Тогда суммарный магнит-

ный поток Φ_{90} обмотки статора повернется на 90° по часовой стрелке (см. рис. 2.9). При дальнейшем повороте векторов также будет поворачиваться суммарный магнитный поток. Значит, сдвиг обмоток статора в пространстве на 120° и одновременно сдвиг токов в обмотках на 120° во времени создают вращающееся магнитное поле. Частота вращения этого магнитного поля зависит от числа пар полюсов, создаваемых обмоткой статора.

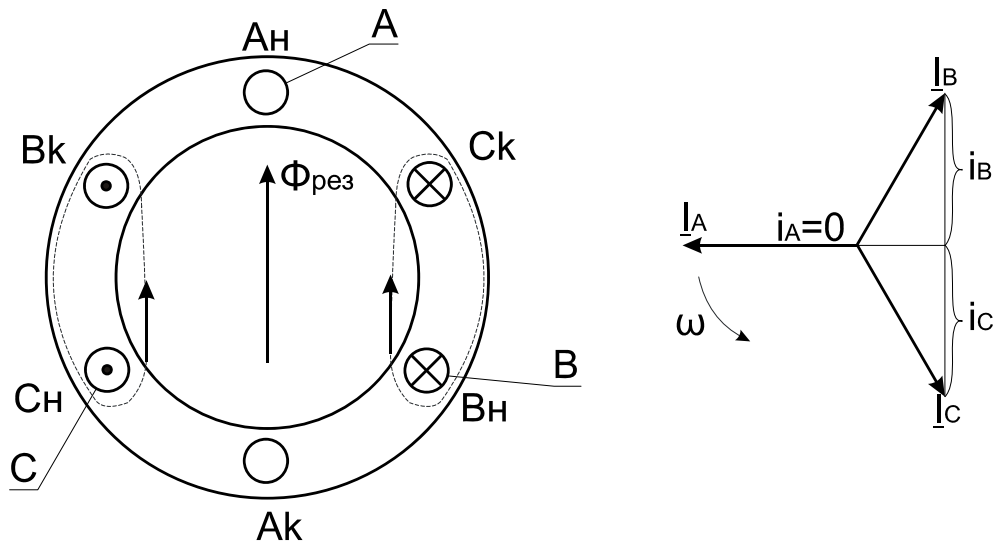


Рис. 2.9. Поворот результирующего магнитного потока статора при повороте векторов тока

При известной частоте тока в обмотках $f = 50$ Гц частота вращения магнитного поля статора находится из выражения частоты вращения роторов генераторов:

$$f = \frac{p n}{60}, \quad \text{отсюда} \quad n_1 = \frac{60 f}{p}.$$

Получаем $n_1 = 3\,000$ об/мин — частота вращения магнитного поля статора.

Вставим в расточку статора ротор с обмоткой. В какую сторону будет направлена сила, действующая на проводники обмотки ротора? Для этого определим направление ЭДС в обмотках ротора по правилу правой руки. Если в первый момент времени магнитное поле статора относительно проводников ротора движется справа налево, то направление ЭДС в обмотке ротора определится по правилу правой руки. Силовые линии магнитного поля входят в ладонь, проводник в магнитном поле движется вниз — показывает большой палец, тогда четыре пальца правой руки покажут направление тока в проводниках ротора «от нас» (рис. 2.10).

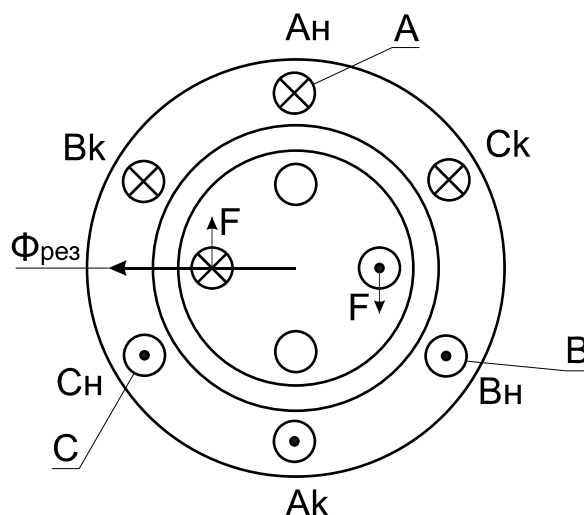


Рис. 2.10. Направление сил, действующих на обмотку ротора

Следует представлять, что если магнитное поле статора движется по часовой стрелке, то проводник ротора относительно этого поля движется против часовой стрелки. Поэтому левый проводник движется вниз, это направление движения проводника и показывает большой палец правой руки. Сопротивление обмотки ротора активное, тогда и ток в обмотке ротора будет иметь то же направление, что и ЭДС.

По правилу левой руки, четыре пальца показывают направление тока в обмотке ротора, силовые линии магнитного поля заходят в ладонь, а большой палец вверх указывает направление силы, действующей на проводник. Проводник ротора стремится двигаться за направлением вращения магнитного поля статора. На противоположной стороне ротора сила, действующая на проводники ротора, направлена вниз. Таким образом, получаем вращающий момент ротора относительно оси.

ЭДС в обмотке ротора создается за счет пересечения витков обмотки магнитным полем статора. Если ротор будет вращаться с той же скоростью, что и магнитное поле статора, то не будет пересечения витков обмотки ротора магнитным полем, следовательно, не будет создаваться вращающий момент ротора. По этой причине всегда частота вращения ротора асинхронного двигателя меньше частоты вращения магнитного поля статора. Так, для двигателей с одной парой полюсов частота вращения ротора:

$$n_2 = 2\,900 \dots 2\,940 \text{ об/мин.}$$

В указанных пределах изменяется частота вращения ротора от степени загрузки электродвигателя механизмом.

Для получения других частот вращения необходимо изменять число пар полюсов обмотки статора асинхронного электродвигателя. Синхронная частота вращения магнитного поля статора составит:

- для $p = 2$ (4 полюса) — $n_1 = 1\,500$ об/мин;
- для $p = 3$ (6 полюсов) — $n_1 = 1\,000$ об/мин;
- для $p = 4$ (8 полюсов) — $n_1 = 750$ об/мин и т.д.

С увеличением числа полюсов увеличиваются габариты электродвигателя.

Для обеспечения безопасной работы электродвигателя, кроме трех фазных проводов L1, L2, L3, подключаемых к обмоткам, четвертый защитный проводник РЕ подключают к корпусу электродвигателя. В тех случаях, когда в помещении используется четырехпроводная, а не пятипроводная сеть (как положено по стандарту), к корпусу подключается проводник PEN. Для трехфазных электродвигателей на паспорте пишут мощность P_2 , которую можно получить на выходе двигателя, на его валу.

$$P_2 = P_1 \eta = S_1 \cos \varphi \eta = \sqrt{3} U_{л} I_{\phi} \cos \varphi \eta,$$

где P_2 — мощность, снимаемая с вала электродвигателя;

P_1 — активная мощность, потребляемая из сети;

$\cos \varphi$ — коэффициент мощности электродвигателя;

η — коэффициент полезного действия электродвигателя.

$$\text{Отсюда } I_{дв} = \frac{P_2}{\sqrt{3} U_{л} \cos \varphi \eta}.$$

Определение $\cos \varphi$ и η на работающем двигателе гораздо сложнее, чем определение тока, поэтому здесь не рассматривается. В эксплуатации измеряют ток токоизмерительными клещами. Для определения приближенного значения тока трехфазного электродвигателя на 380 В $I_{дв}$, А, электромонтеры пользуются упрощенной формулой

$$I_{дв} = \left| 2 P_{дв} \right|.$$

Ток, потребляемый трехфазным электродвигателем с обмоткой статора на 380 В примерно равен удвоенной мощности электродвигателя, выраженной в кВт. Полученное значение отличается от истинного на 5-10%. Так, трехфазный электродвигатель мощностью 3 кВт потребляет примерно 6 А.

2.6. Обеспечение безопасной эксплуатации электроприемников

Начинающий электрик должен представлять, какую опасность таит в себе электроэнергия. Строгое соблюдение правил безопасной эксплуатации электроустановок никогда не приводит к печальным результатам. Всегда опасно прикосновение человека к токоведущим частям, находящимся под напряжением, так как человек представляет собой сопротивление, и через него будет протекать ток.

В двухпроводной сети опасно прикосновение человека к фазному проводу. Если человек стоит на деревянном полу и в обуви с резиновой подошвой, то через него будет протекать ток, не ощущаемый нервными окончаниями в коже. Человек может ощутить легкое пощипывание. Однако если человек стоит на бетонном полу или на земле, то при прикосновении в фазному проводу через него будет протекать ток по контуру: фаза – рука – нога – земля – фазная обмотка трансформатора. Сопротивление человека в расчетах принимается 1 000 Ом, тогда через человека будет протекать ток:

$$I_{чел} = U/R_{чел} = 220/1\ 000 = 0,22\ А.$$

А ток величиной 0,1 А, протекающий через человека, считается смертельным.

Ток величиной 0,06 А называется неотпускающим. При протекании такого переменного тока мышцы, например, пальцы руки, судорожно сокращаются, и человек не в силах их разжать, хотя мысленно дает команду на разжатие пальцев. А при длительном протекании тока смертельный исход неизбежен. Чтобы этого не случилось, первое прикосновение к любым токоведущим частям необходимо выполнять тыльной стороной пальцев или ладони. Тогда при протекании тока человек быстро отдергивает руку без печальных последствий.

Чтобы не забывать правила техники безопасности при работах в электроустановках и постоянно помнить об опасностях касания токоведущих частей, находящийся под напряжением весь электротехнический персонал сдает экзамены на группу допуска с 1-й по 5-ю по технике безопасности. Удостоверение о сдаче соответствующих экзаменов от 2- до 5-й группы работник всегда должен иметь при себе при работе в электроустановках.