

1. Электрические цепи переменного тока

1.1. Общие сведения об электрических цепях и их элементах

Как известно, **электрический ток** представляет собой направленное упорядоченное движение электрических зарядов по проводникам.

Электрический ток возникает только в замкнутой электрической цепи, которая состоит из **источника (генератора)** электрической энергии и **электроприемника (нагрузки)**, соединенных между собой с помощью **проводников (линии электропередачи)**. На практике **электрическая цепь** образуется из электрического соединения различных электротехнических устройств и элементов, обязательно включая источник электроэнергии, и обеспечивает генерирование (выработку), передачу и потребление электрической энергии.

Элементами электрической цепи называются отдельные электротехнические устройства, в совокупности образующие электрическую цепь и выполняющие в ней определенные функциональные действия. Так, источники (генераторы), как элементы замкнутых цепей, преобразуют различные виды энергии в электрическую энергию. Например, электромашинные генераторы служат для преобразования механической энергию, поступающей от первичного двигателя (турбины), в электрическую энергию. Электрические батареи и аккумуляторы преобразуют химическую энергию сухого или жидкого электролита в электрическую, термогенераторы (термопары) тепловую энергию – в электрическую, фотоэлементы (солнечные батареи) энергию светового излучения – в электрическую и т. д.

В электроприемниках (нагрузке), наоборот, осуществляется обратное превращение электроэнергии в другие виды энергии. Электродвигатели служат для преобразования электроэнергии в механическую энергию. Лампы накаливания, газоразрядные и светодиодные преобразуют электрическую энергию в световую, аккумуляторы электрическую энергию при их зарядке – в

химическую энергию электролита, электронагреватели электрическую энергию – в тепловую и т. д.

Электрические цепи на практике вместе с **основными элементами цепи** (источники электроэнергии, электроприемники и соединительные провода), цепи содержат различные **вспомогательные элементы**. Вспомогательные элементы цепей включают:

- **коммутационные электротехнические устройства**, предназначенные для включения и отключения отдельных участков (элементов) цепи;
- **электроизмерительные приборы**, служащие для измерения электрических параметров цепи;
- **защитные устройства** – для обеспечения сохранности элементов и цепи в целом.

К вспомогательным элементам цепи также относятся различные **преобразующие электротехнические устройства**: трансформаторы, выпрямители, инверторы и др., которые позволяют должным образом преобразовывать и передавать электроэнергию на дальние расстояния и распределять ее между отдельными потребителями.

Свойства любого элемента, проявляющиеся в замкнутой электрической цепи, определяются его **параметрами**. Так, свойство элемента во время его работы поглощать электроэнергию и однонаправленно преобразовывать ее в другие виды энергии (механическую, тепловую, световую, химическую) определяет параметр – **активное электрическое сопротивление R** , измеряемое в **омах**. Известная единица измерения сопротивления [Ом] названа в честь известного немецкого физика [Г. Ома](#). Свойство элемента, связанное с образованием собственного магнитного поля при прохождении через этот элемент электрического тока, определяет его параметр – **индуктивность L** , измеряемую в **генри** [Гн]. Свойство элемента накапливать заряды характеризует его параметр – **емкость C** , измеряемую в **фарадах** [Ф].

Таким образом, работающие элементы электрической цепи в общем случае характеризуются тремя основными параметрами – **активным сопротивлением R** , **индуктивностью L** , и **электрической емкостью C** .

По виду тока цепи разделяются на цепи постоянного тока, не изменяющегося во времени тока и переменного тока. **Постоянный ток** – это ток, не изменяющийся по величине в достаточно большом промежутке времени. Как известно, сила тока измеряется в **амперах [A]**, так названных в честь французского физика [А.М. Ампера](#). Под **переменным током**, в общем случае, понимают периодический во времени ток, изменяющийся в пределах каждого периода по одному закону. В электротехнике, в основном, используется переменный синусоидальный ток. Поэтому, под цепями переменного тока подразумевают именно цепи с синусоидальным изменением тока, а слово «синусоидальный» часто опускают.

1.2. Основные характеристики синусоидального тока

Наибольшее распространение в электроэнергетике получили электрические цепи синусоидального тока. По сравнению с постоянным током синусоидальный ток имеет ряд преимуществ, а именно, производство, передача, распределение и использование электрической энергии наиболее экономичны при синусоидальном токе. В цепях синусоидального тока, в отличие от постоянного, можно относительно просто, с помощью специальных электрических машин – **трансформаторов** преобразовывать напряжения разной величины при сохранении частоты и синусоидальной формы напряжений и токов. Кроме этого, коэффициент полезного действия генераторов, электродвигателей и трансформаторов при синусоидальной форме тока оказывается наиболее высоким.

В силу своих преимуществ цепи переменного тока широко используются в электроснабжении и в различных электротехнических устройствах в промышленности, на транспорте, в строительстве, в жилищно-коммунальном хозяйстве и др.

В линейных электрических цепях переменного тока напряжение u , электродвижущая сила (ЭДС) e и ток i представляются синусоидальными функциями времени:

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u) \quad (1.1a)$$

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e) \quad (1.1б)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) \quad (1.1в)$$

где u , e , i – **мгновенные значения**, синусоидального напряжения, ЭДС, тока, соответственно, то есть значения этих величин в данный момент текущего времени t ; $\omega t + \psi_u, \omega t + \psi_e, \omega t + \psi_i$ – аргументы синусоидальных функций, которые имеют название – **фаза** или **фазовый угол**, для напряжения, ЭДС, тока, соответственно.

Из формул (1.1a) – (1.1в) видно, что фаза пропорциональна текущему времени t . На графиках фаза отсчитывается по оси абсцисс в радианах или градусах от точки перехода синусоидальной функции через ноль до значения аргумента в данный момент времени. Графики мгновенных значений синусоидальных тока i и напряжения u показаны на рис. 1.1.

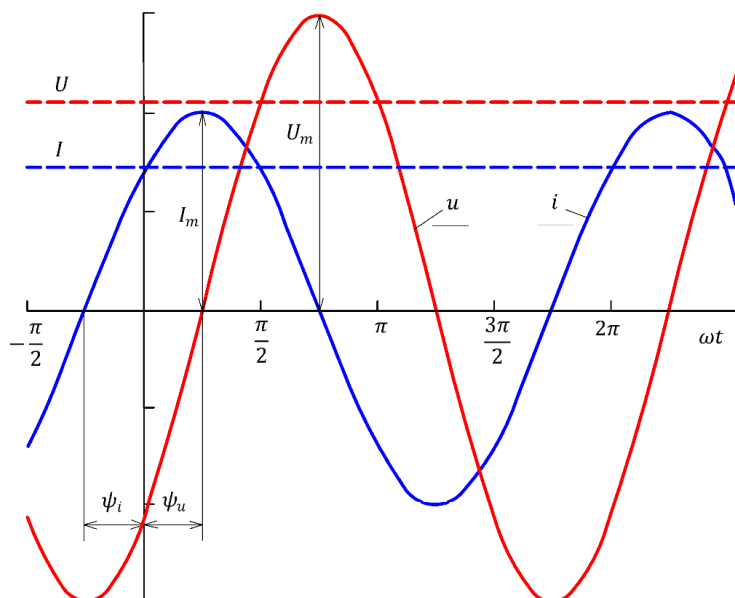


Рис. 1.1 Графики мгновенных значений синусоидальных величин тока i и напряжения u и их действующие значения I и U .

Как следует из выше приведенных формул, любая синусоидальная функция напряжения u , ЭДС e или тока i в электрических цепях переменного тока задается тремя параметрами:

- **амплитудой** U_m, E_m, I_m – максимальным положительным или отрицательным значением синусоидальной функции;
- **угловой частотой** ω , рад/с – скоростью изменения аргумента синусоидальной функции;
- **начальной фазой** ψ_u, ψ_e, ψ_i , рад – значением аргумента синусоидальной функции в начальный момент отсчета текущего времени, т. е. при $t = 0$.

Кроме амплитуды, угловой частоты и начальной фазы для определения синусоидальных функций электротехнических величин используют следующие параметры:

- **период** $T = 2\pi/\omega$, с – наименьший интервал времени, по окончании которого мгновенные значения синусоидальной величины повторяются.
- **частота** $f = 1/T$, Гц – число колебаний (периодов) в секунду.

Единицей частоты является **герц** [Гц], названная в честь немецкого физика [Генриха Герца](#) ($1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$). Промышленная частота всех энергетических систем в России и других развитых стран равна 50 Гц, то есть 50 периодов в секунду, за исключением США, Канады, Японии, где $f = 60 \text{ Гц}$. Длительность одного периода при частоте 50 Гц составляет $T = 1/50 = 0,02 \text{ с} = 20 \text{ мс}$.

- **сдвиг фаз** φ между синусоидальными напряжением u и током i – алгебраическая величина, определяемая разностью начальных фаз этих величин $\varphi = \psi_u - \psi_i$, рад.
- **действующее значение** напряжения U , ЭДС E и тока I синусоидальных величин определяется как среднеквадратичное значение соответствующих мгновенных значений u, e, i этих величин за период T .

Так, действующее значение синусоидального напряжения определяется:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (U_m \sin \omega t)^2 dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,71 U_m \quad (1.2)$$

То есть действующее значение синусоидального напряжения U в $\sqrt{2} \approx 1,41$ раз меньше амплитуды этого напряжения U_m . Поэтому, если действующее значение напряжения равно 220 В, имея частоту 50 Гц, то амплитудное значение напряжения достигает дважды за период или 100 раз в секунду $U_m \approx 1,41U = 1,41 \times 220 = 310$ В.

Также определяются действующие значения синусоидальных ЭДС E и тока I :

$$E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (E_m \sin \omega t)^2 dt} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \approx 0,71 E_m;$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (I_m \sin \omega t)^2 dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,71 I_m.$$

С физической точки зрения действующее значение синусоидального тока равно такому значению постоянного тока, который за время равное одному периоду выделяет в том же резисторе такое же количество тепла, как и синусоидальный ток.

В паспорте различных электротехнических устройств переменного тока указываются величины напряжений и токов этих устройств в действующих значениях. Большинство приборов, используемые для измерения переменных напряжений и токов, также отградуированы в действующих значениях этих величин.

1.3. Представление синусоидальных величин вращающимися векторами

Представления синусоидальных функций при помощи вращающихся векторов (векторных диаграмм), как показано на рис 1.2, позволяет наглядно показать количественные и фазовые соотношения между разными

напряжениями, токами и широко используется при анализе электротехнических процессов в цепях переменного синусоидального тока.

Мгновенное значение синусоидальной функции времени t или угла поворота (фазы) ωt можно представить в виде изменяющейся проекции на вертикальную ось вращающегося с угловой скоростью ω соответствующего вектора (см. рис 1.2). Векторы, отображающие синусоидальные функции времени, обозначаются, как и комплексные величины, точками вверху соответствующих прописных латинских букв. Сравнивая рис. 1.2, а и рис. 1.2, б, можно видеть, что длины векторов напряжения $\dot{U}_m$ и тока $\dot{I}_m$ равны амплитудам напряжения U_m и тока I_m синусоидальных функций напряжения u и тока i .

При вращении векторов $\dot{I}_m$ и $\dot{U}_m$ с угловой скоростью ω их проекции на ось ординат y (см. рис. 1.2, б) для данного момента времени t_1 или фазы ωt_1 равны мгновенным значениям синусоидальных функций напряжения u_1 и тока i_1 (рис. 1.2, а)

$$u_1 = U_m \sin(\omega t_1 - \psi_u);$$

$$i_1 = I_m \sin(\omega t_1 + \psi_i).$$

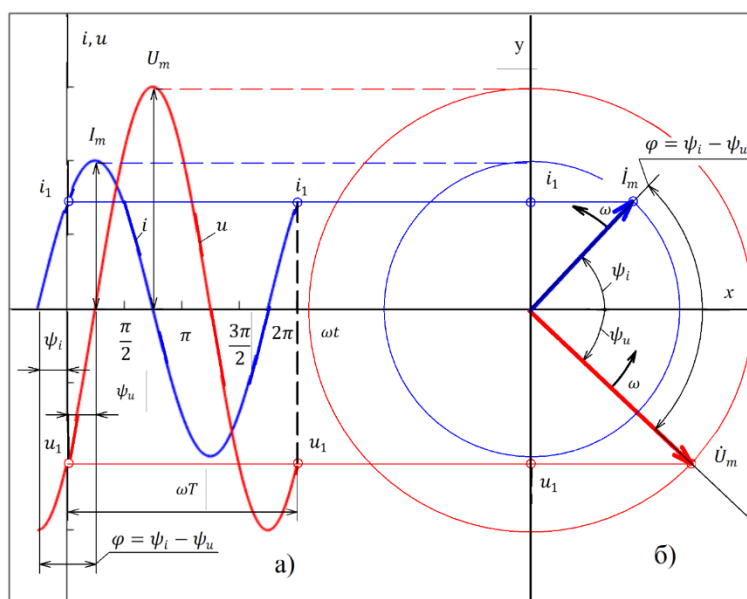


Рис. 1.2 Соответствие синусоидальных функций u, i и вращающихся векторов $\dot{U}_m$ и $\dot{I}_m$: а) графики мгновенных значений синусоидальных величин напряжения и тока; б) вращающиеся с угловой скоростью ω векторы $\dot{U}_m$ и $\dot{I}_m$

Начальные фазы ψ_u и ψ_i будут соответствовать углам наклона векторов $\dot{U}_m$ и $\dot{I}_m$ к оси x в начальный момент времени $t = 0$ (рис. 1.2, б). Легко убедиться, что векторы $\dot{U}_m$ и $\dot{I}_m$, вращающиеся с одной угловой скоростью ω , будут взаимно неподвижными и для любого момента времени сохраняют неизменным фазовый сдвиг между синусоидальными напряжением и током:

$$\varphi = \psi_i - \psi_u = \text{const}$$

Так как фазовые сдвиги между напряжениями, токами и ЭДС одной частоты ω остаются неизменными в течение времени, то от системы вращающихся векторов можно перейти к эквивалентной системе неподвижных векторов для момента времени $t = 0$.

В электротехнике принято оперировать действующими значениями величин напряжений U , ЭДС E и токов I . Поэтому длины векторов на векторных диаграммах соответствуют не амплитудным, а действующим значениям, которые, как было выше сказано, в $\sqrt{2} = 1,41$ раз меньше амплитудных значений.

Таким образом, любой **вектор** на векторной диаграмме определяется через два параметра синусоидальной величины – **действующее значение** этой величины и ее **начальную фазу**. Третий параметр – **угловую частоту** ω вращения вектора также следует определить.

За положительное направление вращения вектора с угловой скоростью ω принято направление вращения этого вектора против вращения часовой стрелки (рис 1.2, б). Если с одной угловой скоростью вращаются два вектора, то **первый по направлению вращения вектор считается опережающим следующий за ним вектор на фазовый угол φ** , который, в свою очередь, считается **отстающим** на тот же угол φ относительно первого вектора. Например, показанный на рис. 1.2, б вектор напряжения $\dot{U}_m$ отстает от вектора тока $\dot{I}_m$ на фазовый угол φ или наоборот, можно считать, что вектор тока $\dot{I}_m$ опережает вектор напряжения $\dot{U}_m$ на тот же угол φ .

Если для двух синусоидальных величин одной частоты ω начальные фазы одинаковы, то вращающиеся с одной и той же угловой скоростью ω векторы этих величин всегда направлены в одну сторону, т.е фазовый угол между ними равен нулю ($\varphi = 0$) и говорят, что эти величины **совпадают по фазе (синфазны)**. Когда для двух синусоидальных величин одной частоты ω разность фаз $\varphi = \pm\pi$, то на векторной диаграмме векторы этих величин направлены в противоположные стороны. В этом случае говорят, что эти величины **противоположны по фазе** или **находятся в противофазе**.

Векторной диаграммой ЭДС, напряжений и токов называется совокупность вращающихся с одной угловой частотой (скоростью) векторов, для определенного момента времени (фазы), которые соответствуют их синусоидальным величинам одной частоты и относятся к одной электрической цепи.

Использование векторных диаграмм делает наглядным анализ электрической цепи. В этом методе сложение и вычитание мгновенных значений синусоидальных величин можно заменить геометрическим сложением и вычитанием их векторов.

1.4. Отдельные электроприемники в однофазной цепи переменного тока

Физические явления, происходящие в электрических цепях переменного тока, вызывают процессы, которые принципиально отличаются от процессов в цепях постоянного тока. Переменные токи и напряжения вызывают появление в некоторых элементах цепи дополнительных ЭДС и токов. Так, переменное магнитное поле вызывает возникновение ЭДС самоиндукции в катушке индуктивности, а изменение электрического поля – токи зарядки и разрядки (токи электрического смещения зарядов в конденсаторах). Эти ЭДС и токи усложняют расчет цепей переменного тока. В цепях переменного тока **частота f** напряжения источника питания имеет большое значение. От частоты протекающего тока зависит влияние величины индуктивности и емкости на их

реактивные сопротивления и, следовательно, на происходящие процессы в цепи синусоидального тока.

Особенности цепей переменного тока обуславливают ряд новых, характерных явлений для этих цепей:

- сдвиг фаз между переменным синусоидальным током и напряжением;
- явления резонанса напряжений и резонанса токов;
- возникновение реактивных мощностей, их компенсация и др.

При расчете режимов цепей синусоидального тока часто используются понятия, методы и формулы расчета для цепей постоянного тока.

Рассмотрим процессы, происходящие в цепи однофазного переменного тока с отдельно взятым элементом: резистором R , индуктивностью L и конденсатором C .

Резистивный элемент в цепи синусоидального тока

Резистивный элемент или **резистор** характеризуется **активным сопротивлением** R , которое является его параметром и отражает наличие электрического сопротивления проводника переменному току (без учета индуктивности и емкости).

Часто наименование элемента «резистор» заменяется наименованием его параметра «активное сопротивление». В активном сопротивлении (резисторе) **электрическая энергия преобразуется, причем необратимо, в другие виды энергии, в частности, в тепловую энергию, которая рассеивается в окружающее пространство** и частично затрачивается на **нагревание** самого **резистора**.

Резистивный элемент в схемах замещения может также учитывать потери энергии в магнитопроводе (сердечнике) катушки индуктивности или электрической машины при прохождении через этот сердечник переменного магнитного потока.

При промышленной частоте $f = 50$ Гц активное сопротивление практически **не отличается** от сопротивления проводника постоянному току.

Следует отметить, что в цепях переменного тока низкой частоты **резистор с активным сопротивлением R рассматривается как линейный элемент, не зависящий от величины тока, напряжения и частоты**, то есть $R = const$.

В цепи синусоидального тока с активным сопротивлением R приложенное напряжение и протекающий ток **совпадают по фазе** (см. рис. 1.3), т. е. угол сдвига фаз синусоидальных напряжения и тока равен нулю:

$$\varphi = \psi_i - \psi_u = 0$$

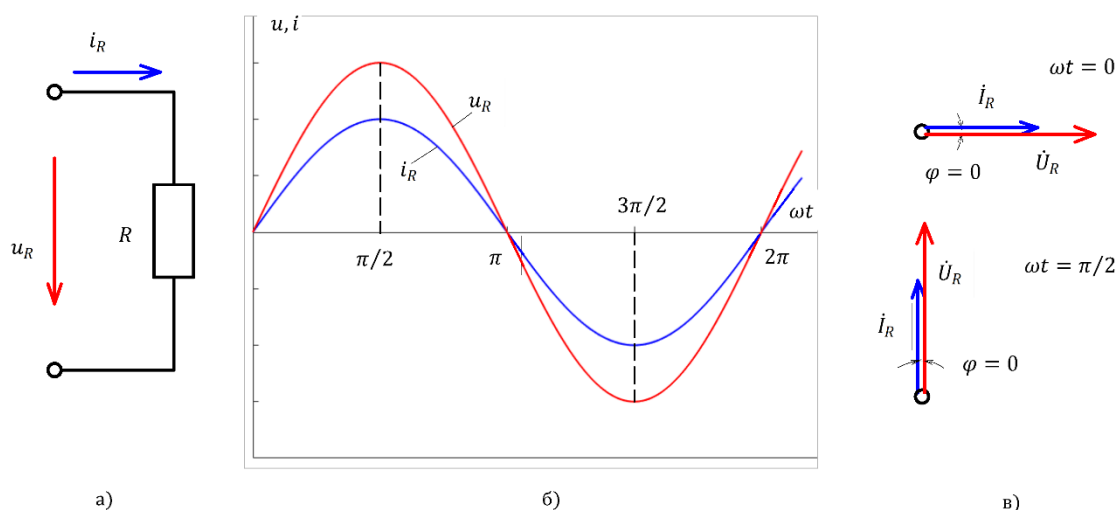


Рис 1.3 Резистор (R -элемент) в цепи синусоидального тока: а) эквивалентная схема замещения для резистора R ; б) графики мгновенных значений синусоидального напряжения и тока для резистора; в) векторная диаграмма действующих значений синусоидального напряжения и тока для резистора

Для участка цепи с активным сопротивлением закон Ома для действующих значений синусоидального тока и напряжения имеет вид:

$$I_R = \frac{U_R}{R} \quad (1.3)$$

Катушка индуктивности в цепи синусоидального тока

Катушка индуктивности представляет собой многовитковую катушку, намотанную изолированным проводом с числом витков W .

При протекании через катушку электрического тока внутри и вокруг нее возникает магнитное поле. Сумма магнитных потоков Φ , пронизывающих

отдельные витки катушки, то есть сцепленных с ее витками, называется **потокосцеплением** и обозначается Ψ .

Если все W витков катушки охвачены одним и тем же магнитным потоком, то потокосцепление равно

$$\Psi = W\Phi.$$

Единица измерения магнитного потока – Вебер [Вб], которая названа в честь немецкого учёного [В.Э. Вебера](#).

Потокосцепление и ток катушки в линейной цепи прямо пропорциональны и связаны соотношением:

$$\Psi = Li$$

где i – мгновенное значение синусоидального тока; L – коэффициент пропорциональности, называемый **индуктивностью катушки**.

Единица индуктивности – генри [Гн], названа в честь американского физика-электротехника [Дж. Генри](#):

$$[L] = [\Psi]/[I] = [\text{Вб}]/[\text{А}] = [\text{Гн}].$$

Синусоидальный ток, проходящий по катушке индуктивности, помимо активного сопротивления проводников катушки R_k , испытывает индуктивное сопротивление X_L . Физически индуктивное сопротивление обусловлено ЭДС самоиндукции e , возникающей в катушке из-за периодического изменения во времени магнитного потока Φ , а, следовательно, и потокосцепления Ψ .

Индуктивное сопротивление зависит прямо пропорционально от частоты и индуктивности:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \quad (1.4)$$

Из формулы (1.4) следует, что **индуктивное сопротивление катушки X_L проявляет себя только в цепях переменного тока при $f > 0$** , а в цепях постоянного тока, когда $f = 0, X_L = 0$.

В цепи переменного тока с **чисто индуктивным элементом** (если пренебречь активным сопротивлением проводников катушки индуктивности) **синусоидальный ток отстает по фазе от синусоидального напряжения** на

индуктивности на угол $\pi/2$ или 90° (см. рис. 1.4), и, наоборот, можно считать, что **напряжение на индуктивности опережает проходящий через него ток на тот же угол $\varphi = \pi/2$** . То есть фазовый угол между приложенным синусоидальным напряжением и током:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = \pi/2.$$

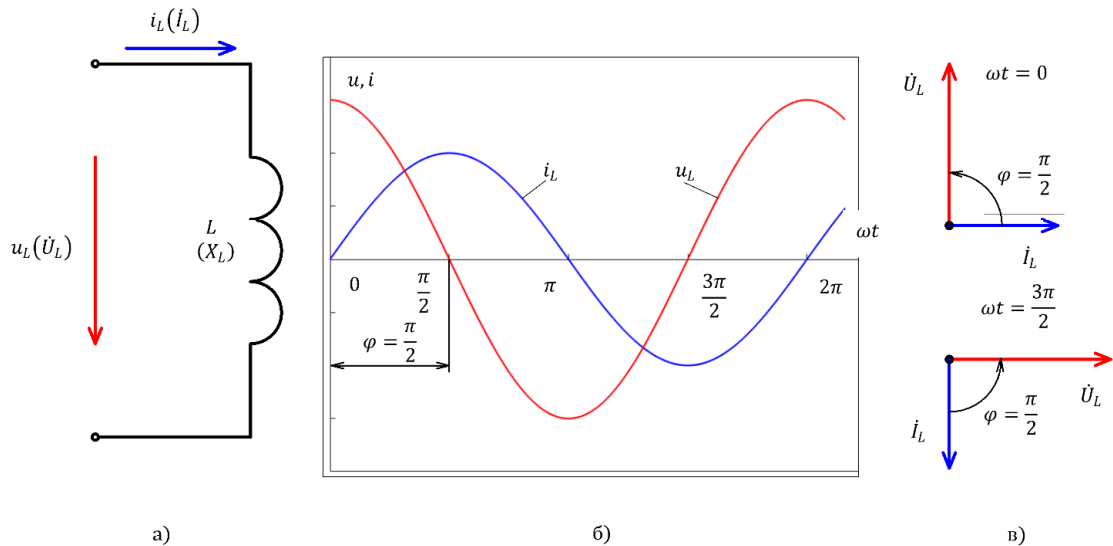


Рис. 1.4 Индуктивность (L -элемент) в цепи синусоидального тока: а) эквивалентная схема замещения для индуктивности L ; б) графики мгновенных значений синусоидального напряжения и тока для индуктивности; в) векторная диаграмма действующих значений синусоидального напряжения и тока для индуктивности

Для участка цепи переменного тока с индуктивным элементом закон Ома в действующих значениях тока и напряжения записывается так:

$$I_L = \frac{U_L}{X_L} = \frac{U_L}{\omega L}, \quad (1.5)$$

где $X_L = \omega L$ – величина индуктивного сопротивления.

Полное сопротивление Z_K катушки индуктивности, которая входит в схему исследуемой цепи с учетом ее активного сопротивления провода R_K , рассчитывается, исходя из закона Ома:

$$Z_K = \frac{U_K}{I_K},$$

а также по формуле из треугольника сопротивлений:

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_L^2},$$

где Z_K – полное сопротивление катушки; R_K и X_L – активное и индуктивное сопротивление катушки.

Отсюда индуктивное сопротивление катушки равно

$$X_L = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}$$

Конденсатор (емкостной элемент) в цепи синусоидального тока

Конденсатор представляет собой электротехническое устройство из двух проводников, заряженных разноименными и равными по абсолютной величине зарядами, разделенными тонким слоем диэлектрика. Проводники, образующие конденсатор и имеющие достаточно большую поверхность и малую толщину, называются его **обкладками** и, как правило, выполняются из **алюминиевой фольги**.

Конденсаторы служат накопителями зарядов и, следовательно, **электрической энергии**. **Емкостью** конденсатора называется физическая величина, равная отношению заряда Q_C , накопленного в конденсаторе, к напряжению или разности потенциалов $U_C = \varphi_1 - \varphi_2$ между его обкладками:

$$C = \frac{Q_C}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{Q_C}{U_C}.$$

Единица емкости называется **фарадой** [Ф], которая названа в честь выдающегося английского физика [М. Фарадея](#).

$$[C] = \frac{[Q]}{[U]} = \frac{[Кл]}{[В]} = [Ф].$$

Фарада – очень большая единица емкости, поэтому на практике применяется в миллион раз меньшая единица – **микрофарада** [мкФ]; $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$.

На основании закона Ома для участка цепи с емкостным элементом (с конденсатором) действующее значение тока равно

$$I_C = \frac{U_C}{X_C} = \frac{U_C}{1/(\omega C)}, \text{ где} \quad (1.6)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1.7)$$

емкостное сопротивление конденсатора.

Из (1.7) видно, что емкостное сопротивление зависит обратно пропорционально от частоты и емкости конденсатора.

Из формул (1.6), (1.7) следует, что **конденсатор не пропускает постоянный ток** так как для цепи постоянного тока частота равна нулю $f = 0$, а емкостное сопротивление будет бесконечно большим $X_C = \infty$. Если конденсатор подключить к источнику **постоянного тока**, то в начальный момент в цепи появится только **кратковременный зарядный ток**. Конденсатор, подключенный к источнику синусоидального напряжения, периодически перезаряжается, и в цепи с конденсатором будет протекать переменный ток той же частоты.

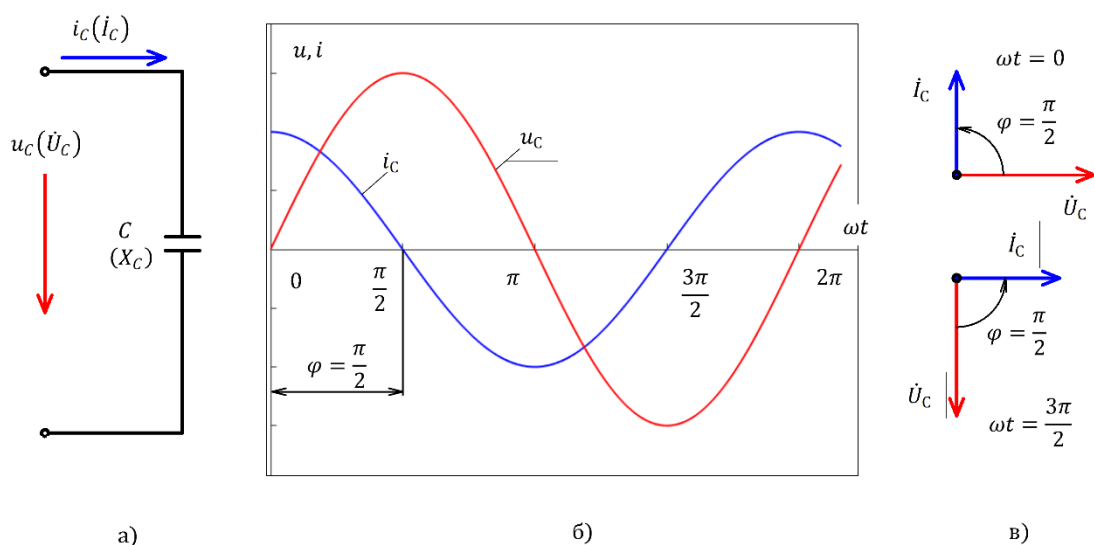


Рис. 1.5 Конденсатор (C-элемент) в цепи синусоидального тока: а) эквивалентная схема замещения для конденсатора C ; б) графики мгновенных значений синусоидального напряжения и тока для конденсатора; в) векторная диаграмма действующих значений синусоидального напряжения и тока для конденсатора

Ток на участке цепи с емкостным элементом при синусоидальном напряжении также синусоидальный и опережает приложенное к конденсатору напряжение на угол $\pi/2$ или 90° (см. рис. 1.5, б) и рис. 1.5, в)).

Можно сказать, что в этом случае **напряжение на конденсаторе отстает по фазе от тока, текущего через конденсатор**, на тот же угол $\varphi = \pi/2$.

Таким образом, угол сдвига по фазе между синусоидальным напряжением и током с учетом знака равен:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = -\pi/2,$$

где ψ_u и ψ_i – начальные фазы синусоидальных напряжения u и тока i , соответственно.

1.5. Цепь однофазного тока при последовательном соединении электроприемников

Рассмотрим однофазную цепь синусоидального тока с последовательной комбинацией R, L, C -элементов, изображенную на рис. 1.6.

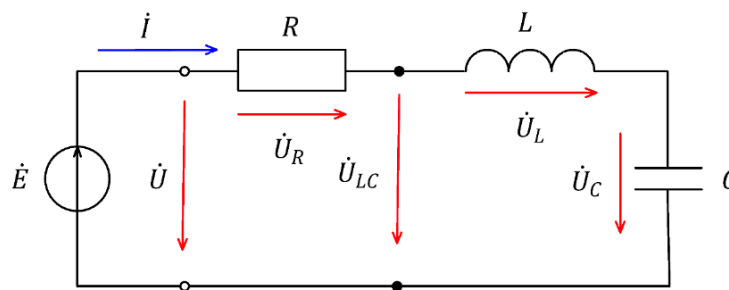


Рис. 1.6 Эквивалентная схема замещения цепи синусоидального тока с последовательным соединением R, L, C –элементов

Согласно **2-му закону Кирхгофа** комплексное напряжение $\dot{U}$, приложенное к входным зажимам цепи на рис. 1.6, равно алгебраической (векторной) сумме комплексных напряжений $\dot{U}_R, \dot{U}_L, \dot{U}_C$ на резистивном, индуктивном и емкостном элементах:

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

Из этого выражения получается формула **закона Ома** в комплексном виде для последовательной цепи с R, L, C – элементами:

$$\dot{U} = [R + j(X_L - X_C)] \dot{i}. \quad (1.9)$$

Отсюда ток в последовательной цепи равен

$$\dot{i} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \frac{\dot{U}}{R + j(X_L - X_C)}, \quad (1.10)$$

где $\underline{Z} = R + j(X_L - X_C)$ – комплексное сопротивление рассматриваемой цепи.

Величина **общего реактивного сопротивления** цепи равна

$$X = |X_L - X_C|.$$

Величина **полного сопротивления** цепи равна

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \frac{U}{I} \quad (1.11)$$

Аргумент комплексного сопротивления, равный углу сдвига по фазе между синусоидальным напряжением и током $\varphi = \psi_u - \psi_i$, определяется через составляющие сопротивлений цепи:

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}$$

Знак угла φ сдвига фаз определяется знаком реактивного сопротивления $X = X_L - X_C$. Если $X_L > X_C$, то участок цепи с R, L, C – элементами имеет **активно-индуктивный характер**, и при этом **ток отстает по фазе от напряжения на угол φ** . При соотношении сопротивлений $X_L < X_C$ нагрузка имеет **активно-емкостной характер** и **ток опережает напряжение на фазовый угол φ** .

Построение векторных диаграмм

Векторная диаграмма тока и напряжений в последовательной цепи с R, L, C – элементами (см. рис. 1.6) строится согласно 2-му закону Кирхгофа. По этому закону комплекс (вектор) общего или входного напряжения $\dot{U}$ определяется через **алгебраическую сумму комплексных величин** напряжений $\dot{U}_R, \dot{U}_L, \dot{U}_C$ или **геометрическую сумму векторов** падений напряжений $\dot{U}_R, \dot{U}_L, \dot{U}_C$ на отдельных элементах цепи, как показано на рис. 1.7.

Векторная диаграмма напряжений на рис. 1.7, а построена для случая, когда $U_L > U_C$, и ток в цепи отстает по фазе от полного напряжения на угол φ (**активно-индуктивный характер нагрузки**), а на рис. 1.7, б $U_L < U_C$ и ток в цепи опережает по фазе напряжение на угол φ (**активно-емкостной характер нагрузки**).

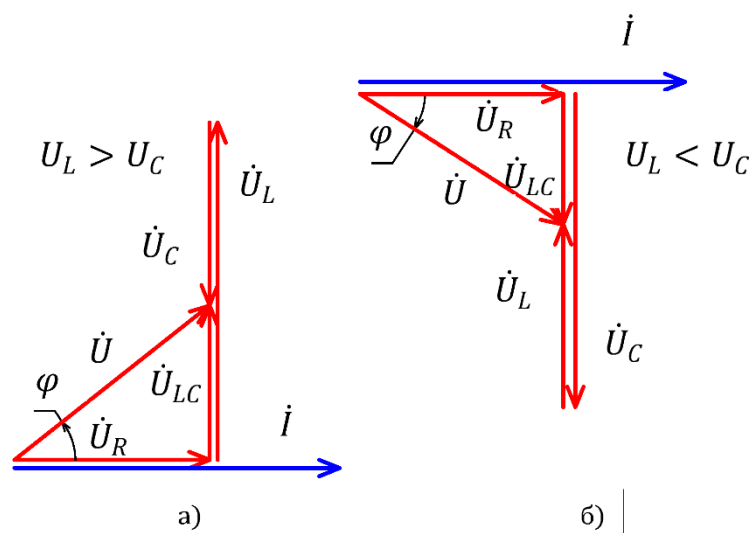


Рис. 1.7 Векторная диаграмма тока и напряжений для цепи с последовательным соединением R, L, C –элементов: а) активно-индуктивная нагрузка ($U_L > U_C$); б) активно-емкостная нагрузка ($U_L < U_C$)

Из рис. 1.7 видно, что векторная диаграмма составляющих полного напряжения $\dot{U}$ с последовательным соединением R, L, C –элементов имеет вид прямоугольного треугольника. Гипотенуза треугольника напряжений равна **полному напряжению** U , а катеты треугольника – **активной составляющей** $U_a = U_R = RI$ и **реактивной составляющей** $U_p = U_{LC} = |U_L - U_C| = |X_L - X_C|I$ полного напряжения U . Реактивная составляющая напряжения U_p опережает по фазе ток на угол $\pi/2$ при активно-индуктивной нагрузке (рис. 1.7, а) и отстает по фазе от тока на угол $\pi/2$ при активно-емкостной нагрузке (рис. 1.7, б).

Из векторных диаграмм (рис. 1.7) легко получаются формулы, связывающие модули (величины) векторов напряжений на отдельных участках цепи, а также формула угла сдвига фаз между напряжением и током:

$$U_a = U_R = U \cos \varphi ; \quad (1.12 \text{ а})$$

$$\cos \varphi = \frac{U_R}{U} ; \quad (1.12 \text{ б})$$

$$U_p = U_{LC} = |U_L - U_C| = U \sin \varphi ; \quad (1.12 \text{ в})$$

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2} = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} ; \quad (1.12 \text{ г})$$

$$\varphi = \arctg \frac{U_L - U_C}{U_R} = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}. \quad (1.12 \text{ д})$$

Формула (1.12 д) показывает, что угол сдвига фаз между током $\dot{I}$ и напряжением $\dot{U}$ питающей сети зависит от характера сопротивлений, включенных в цепь синусоидального тока. Так, при $X_L > X_C$ угол $\varphi > 0$, и напряжение опережает ток на этот угол (**активно-индуктивная нагрузка**), а при $X_L < X_C$ угол $\varphi < 0$, и напряжение отстает по фазе от тока (**активно-емкостная нагрузка**).

Если составляющие напряжений $U, U_R, U_{LC} = |U_L - U_C|$, образующие на векторных диаграммах рис. 1.7, а и рис. 1.7, б треугольник векторов напряжений, разделить на ток I , то на основании закона Ома получим три составляющие сопротивлений Z, R, X . Из них может быть образован прямоугольный **треугольник сопротивлений** (рис. 1.8), подобный треугольнику векторов напряжений на рис. 1.7.

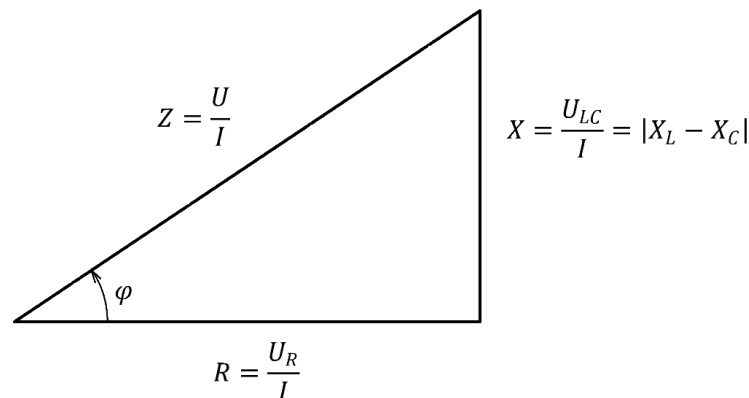


Рис. 1.8 Треугольник сопротивлений для цепи с последовательным соединением R, L, C —элементов (при $X_L > X_C$)

Из треугольника сопротивлений выводятся формулы, выражающие связь между сопротивлениями R, X_L, X_C , а также формулы полного сопротивления Z , угла сдвига фаз φ и коэффициента мощности $\cos \varphi$:

$$R = Z \cos \varphi ; \quad (1.13 \text{ а})$$

$$X = |X_L - X_C| = Z \sin \varphi ; \quad (1.13 \text{ б})$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}; \quad (1.13 \text{ в})$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}. \quad (1.13 \text{ г})$$

Формулы (1.13) показывают, что полное сопротивление Z цепи синусоидального тока зависит не только от параметров цепи R, L, C , но и от частоты $\omega = 2\pi f$ питающего напряжения, подведенного к зажимам цепи, поскольку от этой частоты зависят индуктивное X_L и емкостное X_C сопротивления:

$$X_L = \omega L; X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (1.14)$$

Умножив сопротивления R, X, Z , составляющие треугольник сопротивлений (рис. 1.8) на квадрат тока I^2 в последовательной цепи с R, L, C —элементами, получим составляющие мощности P, Q, S , образующие **треугольник мощностей** (рис. 1.9), подобный треугольнику сопротивлений.

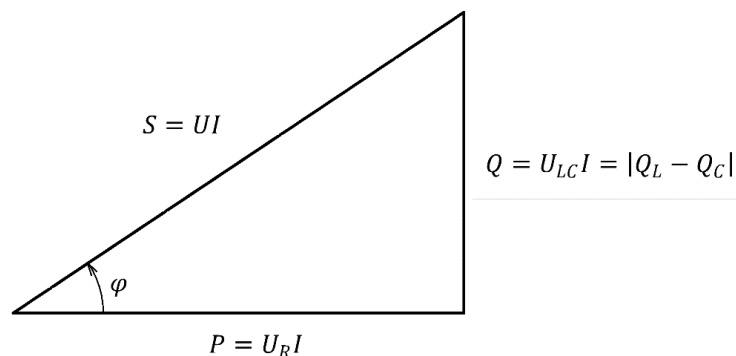


Рис. 1.9 Треугольник мощностей для цепи с R, L, C —элементами

Гипотенуза в этом треугольнике мощностей соответствует полной мощности S , а его катеты – активной мощности P и реактивной мощности Q . Активная мощность P определяется произведением действующих значений напряжения U , тока I и косинуса угла сдвига фаз φ между этими величинами:

$$P = UI \cos \varphi \quad (1.15)$$

Активную мощность P , выделяемую на резисторе с активным сопротивлением R , можно определить по формулам, аналогичным при определении активной мощности в цепях постоянного тока. Это объясняется

тем, что напряжение на этом сопротивлении U_R и протекающий ток I совпадают по фазе, поэтому $\varphi = 0^\circ$; $\cos \varphi = \cos 0^\circ = 1$. Поэтому

$$P = U_R I = I^2 R = \frac{U_R^2}{R} \quad (1.16)$$

1.6. Резонанс напряжений в однофазной цепи

Резонансом напряжений называется режим электрической цепи синусоидального тока с последовательным соединением индуктивного L и емкостного C элементов, при котором угол сдвига фаз φ между приложенным напряжением и током в цепи равен нулю.

Чтобы в последовательной цепи с L, C —элементами возник резонанс напряжений необходимо обеспечить равенство индуктивного сопротивления катушки и емкостного сопротивления конденсатора. Это является параметрическим условием резонанса напряжений:

$$X_L = X_C \quad (1.17)$$

Электрическая цепь, питаемая синусоидальным переменным током, в которую входит конденсатор и катушка индуктивности, называется **колебательным контуром**.

Резонанс напряжений можно получить тремя способами:

1. Изменением **частоты** ω синусоидального тока;
2. Изменением **величин индуктивности** или **емкости** колебательного контура, при котором меняются индуктивное X_L или емкостное X_C сопротивление;
3. При одновременном изменении параметров ω, L, C цепи колебательного контура.

Из условия резонанса напряжения (1.17) следует, что так как $X_L = \omega L$ и $X_C = 1/(\omega C)$, то при резонансе напряжений

$$\omega = \omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (1.18)$$

где $\omega_{\text{рез}}$, рад/сек – резонансная частота последовательного колебательного контура, совпадающая с частотой ω синусоидального напряжения питания цепи.

Резонанс напряжений имеет ряд существенных особенностей.

1. При резонансе напряжений угол сдвига фаз между напряжением и током равен нулю ($\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$), поэтому **коэффициент мощности при наступлении резонанса достигает наибольшего значения, равного единице** ($\cos \varphi = \cos 0^\circ = 1$).

В этом случае, как видно из векторной диаграммы на рис. 1.10, а, вектор тока $\dot{I}$ и вектор общего напряжения $\dot{U}$ совпадают по направлению, так как они имеют равные начальные фазы $\psi_u = \psi_i$.

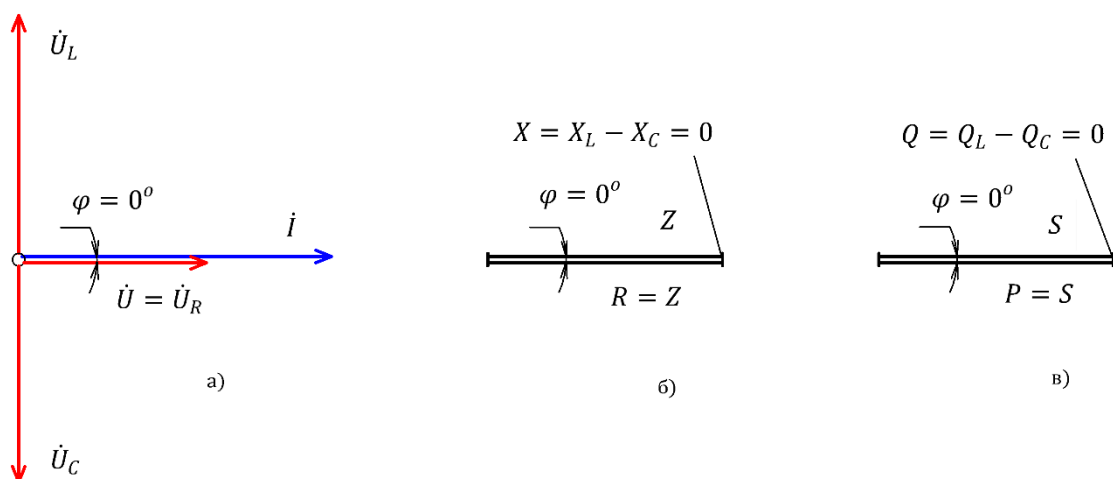


Рис. 1.10 Резонанс напряжений в цепи с последовательным соединением R, L, C –элементов:
 а) векторная диаграмма; б) вырожденный треугольник сопротивлений ($X = 0$); в) вырожденный треугольник мощностей ($Q = 0$).

2. При резонансе напряжений **векторы напряжения на индуктивном и емкостном элементах оказываются равными по величине и противоположными по фазе:** $U_{L\text{рез}} = U_{C\text{рез}}$.

Так как при резонансе $X_L = X_C$, поэтому $U_L = X_L I = X_C I = U_C$, а в комплексной форме $\dot{U}_L = -\dot{U}_C$ (см. рис. 1.10, а).

3. Напряжение на активном сопротивлении при резонансе напряжений оказывается равным напряжению сети (рис. 1.10, а) так как

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_{L\text{рез}} - U_{C\text{рез}})^2} = U_R.$$

В комплексной форме $\dot{U}_R = \dot{U}$.

4. Отношение индуктивного или емкостного сопротивлений к активному сопротивлению цепи с R, L, C —элементами при резонансе называется *добротностью колебательного контура* Q_D

$$Q_D = \frac{X_{L\text{рез}}}{R} = \frac{X_{C\text{рез}}}{R}$$

Умножив числитель и знаменатель этих дробей на ток I , получим выражения для добротности колебательного контура через отношения напряжений

$$Q_D = \frac{U_{L\text{рез}}}{U} = \frac{U_{C\text{рез}}}{U}$$

При больших значениях индуктивного сопротивления X_L и емкостного сопротивления X_C и малых значениях активного сопротивления R цепи ($R \ll X_L = X_C$), т. е. при высоких значениях добротности Q_D колебательного контура напряжения $U_{L\text{рез}} = U_{C\text{рез}} \gg U$:

$$\frac{U_{L\text{рез}}}{U} = \frac{X_{L\text{рез}}}{R} = Q_D \gg 1; \quad (1.19a)$$

$$\frac{U_{C\text{рез}}}{U} = \frac{X_{C\text{рез}}}{R} = Q_D \gg 1, \quad (1.196)$$

то есть величины напряжения на индуктивности и конденсаторе последовательного колебательного контура при его высокой добротности в режиме резонанса напряжений во много раз превышают величину напряжения питания.

Например, если у колебательного контура последовательной цепи с R, L, C —элементами, питаемым синусоидальным напряжением $U = 220 \text{ В}$, $R =$

1 Ом, $X_{L\text{рез}} = X_{C\text{рез}} = 1000$ Ом, добротность $Q_D = 1000$, то напряжение на индуктивности и конденсаторе, как следует из (1.19, а) и (1.19, б) равно:

$$U_{L\text{рез}} = U_{C\text{рез}} = UQ_D = 220 \cdot 1000 = 220000 \text{ В} = 220 \text{ кВ},$$

т. е. в 1000 раз больше напряжения питания U .

Поэтому при работе электротехнического оборудования, питаемого сетевым напряжением 220/380 вольт резонанс напряжений никогда не используется.

Однако в разнообразных устройствах радиотехники и электроники, где напряжение питания колебательного контура составляет микровольты ($1 \text{ мкВ} = 10^{-6} \text{ В}$), резонанс напряжений широко используется, позволяя многократно усилить входной сигнал в виде синусоидального напряжения.

5. Так как при резонансе напряжений $X_L = X_C$ (1.17), то полное сопротивление цепи принимает минимальное значение, равное активному сопротивлению:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = Z_{\text{рез}} = R,$$

а общее реактивное сопротивление цепи становится равным нулю:

$$X_{\text{рез}} = |X_L - X_C| = 0.$$

Поэтому треугольник сопротивлений при резонансе напряжений имеет вырожденный характер, как показано на рис. 1.10, б.

6. На основании закона Ома $I = U/Z$ и из формулы (1.20) следует, что ток I в цепи при резонансе напряжений достигает наибольшего значения:

$$I_{\text{рез}} = \frac{U}{Z_{\text{рез}}} = \frac{U}{R}.$$

Отсюда следует, что ток в цепи при резонансе напряжений может оказаться значительно больше тока, который мог бы быть при отсутствии резонанса.

Это свойство позволяет обнаружить резонанс напряжений при изменении частоты ω , изменении индуктивности L или емкости C . Однако резонансный

ток при определенных условиях опасен. Этот ток может, достигнув чрезмерно большой величины, привести к перегреву элементов цепи и выходу их из строя.

- 7. Активная мощность при резонансе напряжений имеет наибольшее значение,** так как определяется квадратом тока

$$P = I_{\text{рез}}^2 R,$$

а ток $I_{\text{рез}}$ — максимален.

- 8. Общая реактивная мощность Q при резонансе напряжений равна нулю:**

$$Q = Q_L - Q_C = U_L I - U_C I = 0,$$

так как $U_L = U_C$. Поэтому **треугольник мощностей при резонансе имеет вырожденный характер**, как показано на рис. 1.10, в.

- 9. При условии $R \ll X_L = X_C$ реактивная индуктивная и емкостная мощности**

$$Q_L = Q_C \gg S = P,$$

то есть эти мощности могут во много раз превысить потребляемую полную мощность S . При этом полная мощность S при резонансе целиком выделяется на резистивном элементе R в виде активной мощности P .

Физически это объясняется тем, что при резонансе напряжений происходит периодический обмен энергии магнитного поля в индуктивном элементе и энергии электрического поля в конденсаторе.

Кривые, выражающие зависимость полного тока I , сопротивления цепи Z , напряжения на индуктивности U_L и конденсаторе U_C , коэффициента мощности $\cos \varphi$ от емкости батареи конденсатора C , называются **резонансными кривыми**. На рис. 1.11 приведены резонансные кривые $(U_L, U_C, I, Z, \cos \varphi) = F(C)$, построенные в общем виде при $U = \text{const}$ и $\omega = 2\pi f = \text{const}$.

Анализ этих зависимостей показывает, что при увеличении емкости C батареи конденсаторов полное сопротивление цепи Z сначала уменьшается, достигает минимума в режиме резонанса и становится равным активному

сопротивлению R , а затем снова возрастает с увеличением емкости. Соответственно изменению Z меняется полный ток цепи (по закону Ома I обратно пропорционален Z), т. е. с ростом емкости конденсаторов ток I вначале увеличивается, достигает максимума в режиме резонанса, а затем вновь уменьшается.

Коэффициент мощности $\cos \varphi$ изменяется с изменением емкости C в том же порядке, т. е. сначала с увеличением емкости C коэффициент мощности возрастает, достигая максимума равного единице в режиме резонанса, а затем уменьшается, в пределе стремясь к нулю.

Напряжения на индуктивности и конденсаторах имеют максимумы вблизи режима резонанса и становятся равными друг другу в этом режиме. Следует отметить, что достигаемые величины напряжений на конденсаторах и катушке индуктивности в режиме резонанса напряжений и вблизи него могут во много раз превышать входное напряжение, приложенное ко всей цепи.

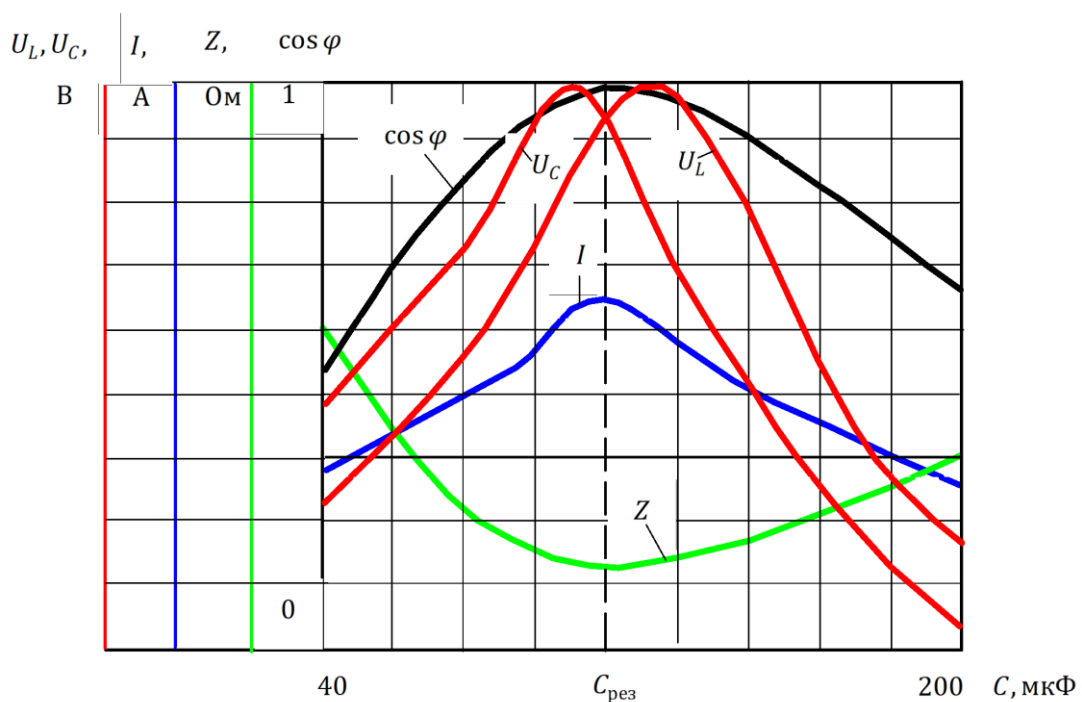


Рис. 1.11 Резонансные кривые $U_L, U_C, I, Z, \cos \varphi$ в зависимости от емкости C при последовательном соединении катушки индуктивности и батареи конденсаторов

С точки зрения электробезопасности и безаварийного режима работы, это следует учитывать при проведении исследования резонанса напряжения на

стенде, задавая величину напряжения питания цепи U в достаточно низких пределах ($U = 20 \div 25$ В).

Таким образом, резонансные кривые позволяют установить минимальное полное сопротивление и наибольший ток в цепи при максимуме коэффициента мощности, равном единице, когда в цепи с последовательным соединением катушки индуктивности и батареи конденсаторов возникает резонанс напряжений.

Выводы:

1. **Резонанс напряжений в промышленных электротехнических установках, питаемых синусоидальным сетевым напряжением 220/380 В – нежелательное и опасное явление.** Это объясняется тем, что наступление резонанса напряжений может вызвать аварийную ситуацию, связанную с возможным перенапряжением на отдельных участках цепи, приводящим к пробое изоляции и коротким замыканиям в токонесущих проводах и кабелях, обмотках электрических машин и аппаратов, конденсаторов. Пробой изоляции и возникшее короткое замыкание часто может привести к выходу из строя перечисленных устройств. Возникающее при этом перенапряжение также опасно для обслуживающего персонала.
2. Однако, **резонанс напряжений широко используется в радиотехнике, в автоматике и электронике** при низких напряжениях (микровольты и милливольты) для настройки колебательных контуров в резонанс на определенную частоту, а также в различных приборах и устройствах, работа которых основана на резонансе напряжений.

1.7. Цепь однофазного тока при параллельном соединении электроприемников

На рис. 1.12 представлена **схема замещения** цепи синусоидального тока с параллельным соединением электроприемников в виде активного

сопротивления R , реальной катушки индуктивности с активным сопротивлением провода R_K и индуктивного сопротивления X_L и емкостного сопротивления X_C конденсатора C .

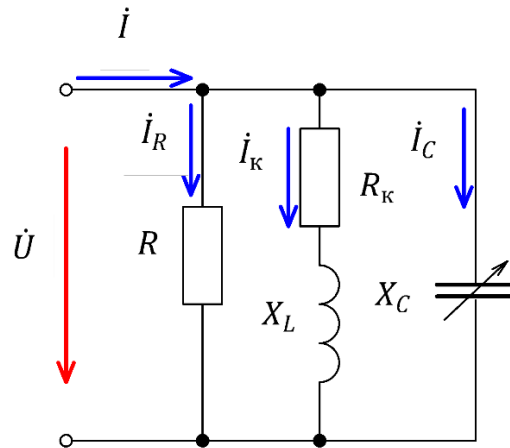


Рис. 1.12 Схема замещения цепи синусоидального тока с параллельным соединением активного сопротивления R , реальной катушки индуктивности с R_K и X_L и емкостного сопротивления X_C

Если пренебречь активным сопротивлением R_K провода катушки индуктивности, так как $R_K \ll X_L$, то получим **упрощенную схему замещения** цепи синусоидального тока с параллельно соединенными R, L, C —элементами (рис. 1.13). С помощью этой схемы можно рассмотреть основные закономерности данной цепи.

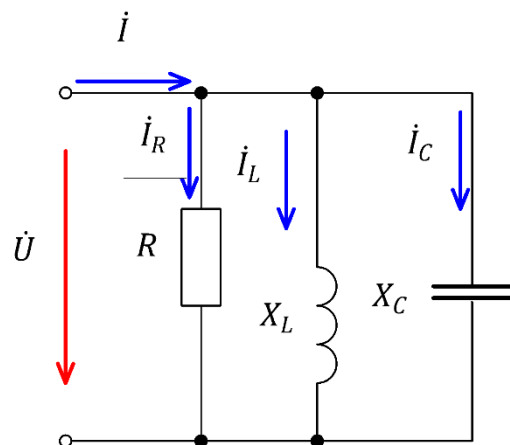


Рис. 1.13 Упрощенная схема замещения цепи синусоидального тока с параллельным соединением R, L, C —элементов

Согласно закону Ома, действующие значения токов в параллельных ветвях схемы замещения цепи с активным R , индуктивным X_L и емкостным X_C сопротивлениями, питаемых общим напряжением U , соответственно равны:

$$I_R = \frac{U}{R} = GU; \quad (1.22a)$$

$$I_L = \frac{U}{X_L} = B_L U; \quad (1.22б)$$

$$I_C = \frac{U}{X_C} = B_C U. \quad (1.22в)$$

Здесь $G = 1/R$ – **активная проводимость** цепи, измеряемая в **сименсах** [См], ([См] = 1 / [Ом]); $B_L = 1/X_L$ – **реактивная индуктивная проводимость** цепи; $B_C = 1/X_C$ – **реактивная емкостная проводимость** цепи; U – действующее значение напряжения питания цепи, одинаковое для всех параллельных ветвей: $U = U_R = U_L = U_C$.

Действующее значение полного тока в неразветвленной части цепи равно:

$$I = \frac{U}{Z} = YU, \quad (1.23)$$

где $Y = 1/Z$, См – **полная проводимость** цепи синусоидального тока.

По 1-му закону Кирхгофа для данной цепи потребляемый ток равен сумме токов в ветвях в комплексной или векторной формах:

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C. \quad (1.24)$$

Построение векторных диаграмм

Векторная диаграмма напряжения и токов параллельной цепи синусоидального тока с R, L, C – элементами строится в соответствии с первым законом Кирхгофа (1.24). За **базовый (опорный)** вектор следует принять **вектор напряжения** $\dot{U}$, отложив его горизонтально вправо (рис. 1.14), так как при параллельном соединении ветвей напряжение на всех элементах цепи одинаково и равно напряжению питания U .

Вектор тока $\dot{I}_R$ ветви, содержащей резистивный элемент R , совпадает по фазе с вектором напряжения $\dot{U}$, так как сопротивление этой ветви активное, не вызывающее сдвига фаз между напряжением и током.

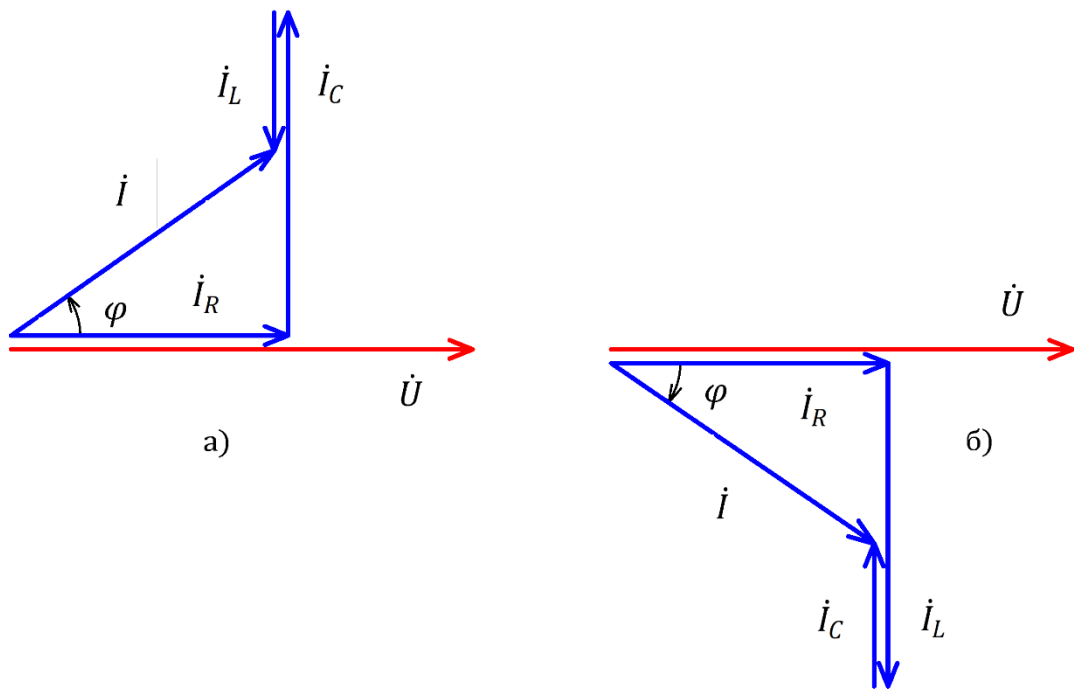


Рис. 1.14 Векторные диаграммы напряжения и токов в цепи с параллельным соединением R, L, C –элементов: а) векторная диаграмма при $I_L < I_C$ (активно-емкостная нагрузка); б) векторная диаграмма при $I_L > I_C$ (активно-индуктивная нагрузка)

Вектор тока $\dot{I}_L$ ветви, содержащий индуктивный элемент L , отстает от вектора напряжения $\dot{U}$ на угол сдвига фаз $\pi/2$ (направлен вертикально вниз), так как сопротивление второй ветви с X_L индуктивное. Вектор тока в ветви, содержащей емкостной элемент X_C , опережает вектор напряжения $\dot{U}$ на угол сдвига фаз $\pi/2$ (направлен вертикально вверх), так как сопротивление третьей ветви – емкостное.

Вектор полного тока $\dot{I}$ в части цепи до разветвления находят путем геометрического сложения векторов токов всех ветвей. Вектор тока $\dot{I}$ опережает вектор напряжения $\dot{U}$ на угол φ , когда емкостной ток $\dot{I}_C$ по величине больше индуктивного тока $\dot{I}_L$ (см. рис. 1.14, а). Эта векторная диаграмма соответствует случаю **активно-емкостной нагрузки**. Когда емкостной ток $\dot{I}_C$ меньше индуктивного тока $\dot{I}_L$ (рис. 1.14, б), то вектор тока $\dot{I}$ отстает от напряжения $\dot{U}$ на угол φ (**активно-индуктивный характер нагрузки**).

На рис. 1.15 построен **треугольник токов**, имеющий вид прямоугольного треугольника и соответствующий векторной диаграмме, представленной на рис. 1.14, а (когда $I_L < I_C$).

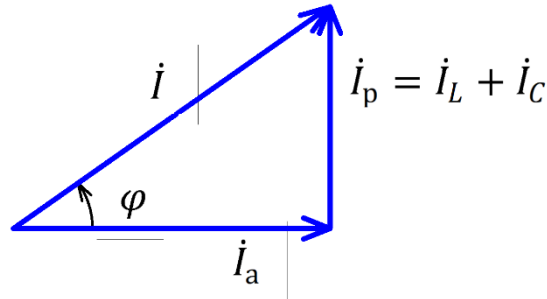


Рис. 1.15 Треугольник векторов токов для цепи с параллельным соединением R, L, C –элементов

Катеты треугольника токов равны активной $I_a = I_R$ и реактивной I_p составляющим тока, а гипотенуза – полному току I .

Вектор активной составляющей тока $\dot{I}_a$, равный вектору тока $\dot{I}_R$, совпадает по фазе с напряжением $\dot{U}$ (направлен горизонтально вправо). Вектор реактивной составляющей тока $\dot{I}_p = \dot{I}_L + \dot{I}_C$, сдвинут по фазе на угол $\pi/2$, относительно общего напряжения $\dot{U}$. Причем, если $I_L > I_C$, то $\dot{I}_p$ отстает по фазе от напряжения $\dot{U}$ на $\pi/2$ (направлен вертикально вниз), если же $I_L < I_C$, то $\dot{I}_p$ опережает напряжение $\dot{U}$ на угол $\pi/2$, как показано на рис. 1.15 (направлен вертикально вверх).

Вектор полного тока $\dot{I}$ равен геометрической сумме векторов $\dot{I}_a$ и $\dot{I}_p$ и повернут относительно вектора напряжения $\dot{U}$ на фазовый угол φ . Из треугольника токов (рис. 1.15) можно получить ряд соотношений между токами.

Модуль (величина) вектора активной составляющей тока $\dot{I}_a$:

$$I_a = I_R = I \cos \varphi.$$

Модуль вектора реактивной составляющей тока $\dot{I}_p$:

$$I_p = |I_L - I_C| = I \sin \varphi.$$

Модуль вектора полного тока $\dot{I}$ в неразветвленной части цепи:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{I_R^2 - (I_L - I_C)^2}. \quad (1.25)$$

Угол сдвига фаз между вектором напряжения $\dot{U}$ и вектором тока $\dot{I}$:

$$\varphi = \arctg \frac{I_L - I_C}{I_a}$$

Полная проводимость Y параллельной цепи синусоидального тока с R, L, C — элементами:

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}. \quad (1.26)$$

Действующее значение полного тока цепи:

$$I = YU = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} \times U. \quad (1.27)$$

Разделив каждую из сторон треугольника токов на действующее значение напряжения U , получим скалярный **треугольник проводимостей** (рис. 1.16), подобный треугольнику токов (рис. 1.15), где **активная** G и **реактивная** $B = |B_L - B_C|$ **проводимости** цепи изображаются катетами, а **полная проводимость** Y — гипотенузой прямоугольного треугольника.

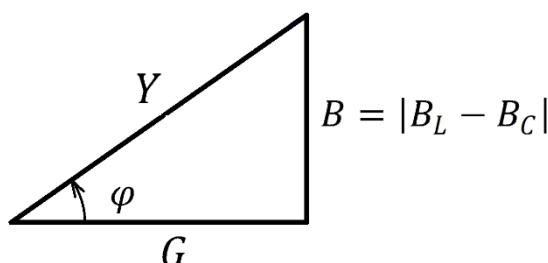


Рис. 1.16. Треугольник проводимостей для цепи с параллельным соединением R, L, C —элементов

Учитывая соотношения для треугольника сопротивлений

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}; \sin \varphi = \frac{X}{Z}$$

из треугольника проводимостей можно получить следующие формулы для проводимостей параллельной цепи синусоидального тока с R, L, C —элементами.

Активная проводимость цепи:

$$G = Y \cos \varphi = \frac{\cos \varphi}{Z} = \frac{R}{Z^2};$$

реактивная проводимость цепи:

$$B = |B_L - B_C| = Y \sin \varphi = \frac{X}{Z^2};$$

аргумент проводимости, равный углу сдвига фаз между напряжением и током:

$$\varphi = \arctg \frac{(B_L - B_C)}{G}.$$

Активная мощность цепи синусоидального тока при параллельном соединении элементов равна алгебраической сумме активных мощностей всех ветвей:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = UI \cos \varphi = UI_a = RI_a^2 = GU^2. \quad (1.28)$$

Реактивная мощность цепи равна модулю алгебраической суммы реактивных мощностей всех ветвей:

$$Q = |Q_1 + Q_2 + Q_3| = UI \sin \varphi = UI_p, \quad (1.29)$$

причем реактивную мощность ветви с индуктивностью берут со знаком плюс $Q_L = B_L U^2$, а ветви с емкостью – со знаком минус $Q_C = -B_C U^2$. Величина общей реактивной мощности равна:

$$Q = |Q_L - Q_C|. \quad (1.30)$$

Полная мощность параллельной цепи синусоидального тока с R, L, C – элементами равна:

$$S = UI = YU^2 = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (1.31)$$

2. Трехфазные цепи

2.1. Области применения трехфазных электротехнических устройств

Трехфазная цепь представляет собой совокупность трех электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, различающиеся по фазе и создаваемые общим источником энергии. Каждую из частей трехфазной системы, характеризующуюся одинаковыми значениями тока, принято называть **фазой**.

Электроснабжение с помощью трехфазных цепей получило наибольшее распространение в современной электроэнергетике. Это объясняется рядом преимуществ трехфазных цепей по сравнению с однофазными цепями переменного тока: экономичностью передачи электроэнергии по трехфазным линиям электропередачи, возможностью получения кругового вращающегося магнитного поля, необходимого для работы большинства вращающихся электрических машин (как электродвигателей, так и генераторов), а также двух различных эксплуатационных напряжений в одной установке – фазного и линейного.

Важнейшей предпосылкой создания трехфазных систем явилось открытие явления вращающегося магнитного поля ([Г. Феррарис](#) и [Н. Тесла](#)). Наибольшая заслуга в разработке трехфазных систем и трехфазных электротехнических устройств принадлежит выдающемуся русскому электротехнику [М. О. Доливо-Добровольскому](#), создавшему трехфазные асинхронные двигатели, трехфазные трансформаторы, разработавшему четырех и трехпроводную цепи систем электроснабжения.

Трехфазные системы имеют ряд преимуществ перед другими системами (как однофазными, так и многофазными):

- они позволяют легко получить круговое вращающееся магнитное поле (на этом основан принцип работы разных двигателей переменного тока);
- трехфазные системы наиболее экономичны, имеют высокий КПД;

- конструкция трехфазных двигателей, генераторов и трансформаторов наиболее проста, что обеспечивает их высокую надежность;
- один трехфазный генератор позволяет получать два различных (по величине) напряжения.

Современные электрические системы, состоящие из генераторов, электростанций, трансформаторов, линий передачи электроэнергии и распределительных сетей, представляют собой в подавляющем числе случаев трехфазные системы переменного тока.

2.2. Цепь трехфазного тока при соединении электроприемников звездой

Трехфазной электрической цепью называется совокупность трех однофазных электрических цепей переменного тока с синусоидальными ЭДС и напряжениями одной и той же частоты, которые сдвинуты друг от друга на один и тот же фазовый угол $\varphi = 2\pi/3 = 120^\circ$.

Каждую из однофазных частей трехфазной цепи называют **фазой**. Понятие **фаза в электротехнике** имеет два смысла: фаза, как аргумент синусоидально меняющейся во времени величины, второе значение фазы – часть одно, трех, или, в общем случае, многофазной системы электрической цепи.

В электрических машинах под фазой также подразумевают одну из идентичных m –фазных обмоток статора или ротора (где m – общее число фаз).

Фазы трехфазной цепи обозначают буквами: A, B, C – при соединении фаз **звездой** и двойными буквами AB, BC, CA – для схемы соединения фаз **треугольником**. Индексы фазных величин используют те же буквы.

Источником электроэнергии в трехфазной системе являются **трехфазные синхронные генераторы**, установленные на всех крупных электростанциях. Простейший двухполюсный синхронный генератор, схематично изображенный на рис. 2.1, имеет на статоре три одинаковые обмотки, оси которых пространственно сдвинуты друг от друга на угол 120° . При вращении ротора с

угловой частотой ω , выполненного в виде двухполюсного магнита с полюсами $N - S$, в фазах-обмотках статора индуцируются три **синусоидальные во времени ЭДС e_A, e_B, e_C одной частоты и с одинаковыми амплитудами E_m , сдвинутыми друг от друга на один и тот же фазовый угол $2\pi/3$ или 120°** (см. рис. 2.2, а). Такие ЭДС называются **симметричными**.

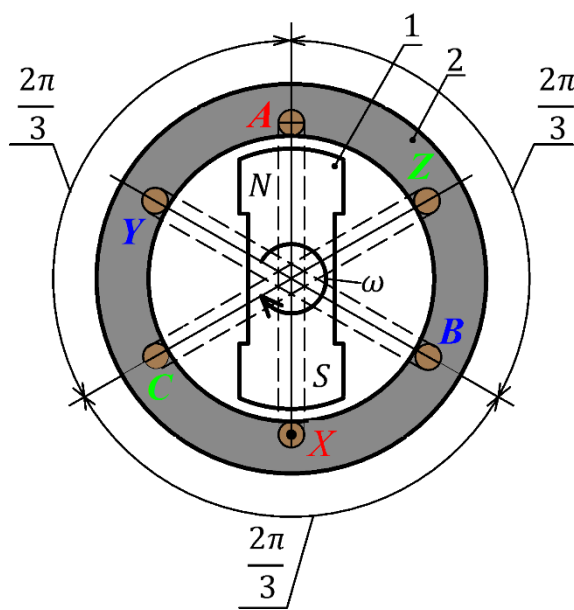


Рис. 2.1 Упрощенная конструкция трехфазного генератора: 1 – двухполюсный ротор (полюса $N-S$ создаются постоянным током в обмотке возбуждения ротора, не показанной на рисунке) 2 – статор с трехфазной обмоткой $A - X, B - Y, C - Z$

Если для ЭДС фазы A её начальную фазу установить равной нулю, то синусоидальные ЭДС всех трех фаз равны:

$$e_A = E_m \sin \omega t; \quad (2.1a)$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3); \quad (2.1б)$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t + 2\pi/3). \quad (2.1в)$$

Трехфазную систему мгновенных значений синусоидальных ЭДС можно представить в виде трех равных по величине векторов $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$, сдвинутых друг от друга на фазовый угол $\pm 2\pi/3$, как показано на рис. 2.2, б. Такие векторы называются **трехфазными симметричными векторами**.

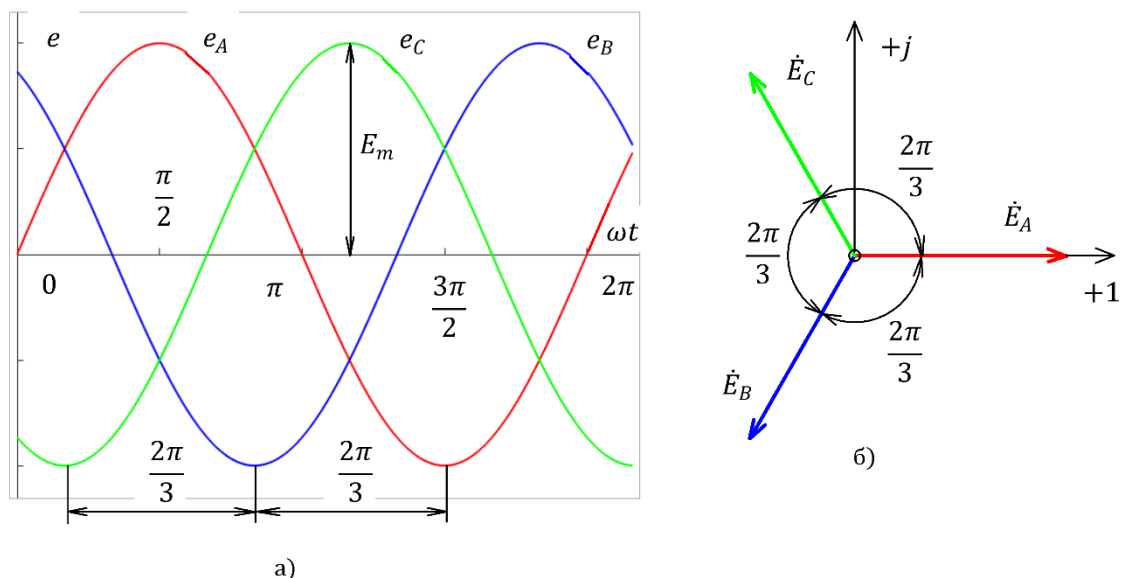


Рис. 2.2 Трехфазная симметричная система ЭДС. а) график мгновенных значений трехфазной системы ЭДС; б) векторная диаграмма трехфазной системы ЭДС.

В трехфазных цепях используют две схемы соединения фаз обмоток трехфазного источника электроэнергии (генератора) и трехфазных электроприемников:

1. Схема соединения, которая называется «звезда» с условным обозначением «Y»;
2. Схема соединения, которая называется «треугольник» с условным обозначением «Δ».

При соединении фаз A, B, C звездой концы фаз обмоток трехфазного генератора или трехфазных электроприемников объединяют в общий узел, который называют **нейтралью** или **нейтральной точкой** и обозначают буквой «N».

Нейтральные точки трехфазного источника и трехфазного электроприемника соединены проводом, который называют **нейтральным проводом**. Нейтральный провод часто соединяют с землей (заземляют) и тогда его принято называть **нулевым**.

Три провода, соединяющие фазы трехфазного источника и электроприемника называются **линейными проводами**, которые обозначают теми же буквами A, B, C что и одноименные фазы.

Эквивалентная схема замещения трехфазной цепи при схеме соединения звездой показана на рис. 2.3.

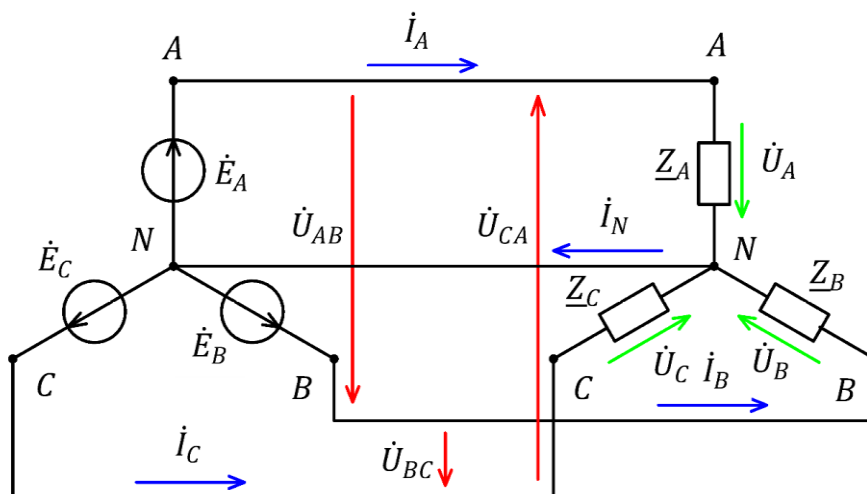


Рис. 2.3 Схема замещения цепи трехфазного тока при соединении фаз источника (трехфазного генератора) и электроприемников звездой

Из схемы замещения на рис. 2.3 видно, что токи в линиях I_A, I_B, I_C являются теми же токами в одноименных фазах источников и электроприемников. Таким образом, для трехфазной цепи при соединении фаз звездой **линейные токи** (в общем виде обозначаемые I_L) равны одноименным **фазным токам** I_ϕ

$$I_L = I_\phi. \quad (2.2)$$

Для трехфазной схемы соединения источников и электроприемников звездой (см. рис. 2.3) на основании второго закона Кирхгофа, если пренебречь активным сопротивлением нейтрального и линейных проводов, можно считать, что **фазные ЭДС источников равны одноименным фазным напряжениям**:

$$\dot{E}_A = \dot{U}_A; \dot{E}_B = \dot{U}_B; \dot{E}_C = \dot{U}_C. \quad (2.3)$$

Из закона Ома можно определить соотношение между фазными токами, напряжениями и сопротивлениями:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A}; \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B}; \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C}. \quad (2.4)$$

где $\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$ – комплексные сопротивления электроприемников (трехфазной нагрузки).

Для активной нагрузки фаз линейные или фазные токи равны:

$$I_A = \frac{\dot{U}_A}{R_A}; I_B = \frac{\dot{U}_B}{R_B}; I_C = \frac{\dot{U}_C}{R_C}. \quad (2.5)$$

Из выражений (2.5) видно, что для случая активной нагрузки фаз одноименные фазные напряжения и токи совпадают по фазе ($\varphi = 0$).

Из первого закона Кирхгофа следует, что:

$$I_A + I_B + I_C = I_N. \quad (2.6)$$

т. е. ток в нейтральном проводе равен сумме комплексных фазных (линейных) токов или в геометрическом представлении – геометрической сумме векторов этих токов.

Помимо трех фазных напряжений при схеме соединения звездой, как видно из рис. 2.3, имеются три напряжения между тремя парами линий $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$, которые называются **линейными напряжениями**.

На основании второго закона Кирхгофа из выражений (2.3) для схемы на рис. 2.3 можно получить соотношения между фазными ЭДС и линейными напряжениями:

$$\dot{E}_A - \dot{E}_B = \dot{U}_{AB}; \quad (2.7a)$$

$$\dot{E}_B - \dot{E}_C = \dot{U}_{BC}; \quad (2.7б)$$

$$\dot{E}_C - \dot{E}_A = \dot{U}_{CA}. \quad (2.7в)$$

Анализ этих выражений показывает, что для симметричных ЭДС линейные напряжения также будут симметричными, т. е. равны по величине и сдвинуты на одинаковый фазовый угол $2\pi/3 = 120^\circ$.

Соотношения между фазными и линейными напряжениями для схемы соединения звездой по второму закону Кирхгофа имеют вид, аналогичный формулам (2.7а) - (2.7в):

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \quad (2.8a)$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \quad (2.8б)$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A. \quad (2.8в)$$

Если сопротивления фаз имеют одинаковый характер и равны по величине:

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = Z_\phi e^{j\varphi_\phi},$$

то такую нагрузку называют **симметричной**. Для симметричной активной нагрузки:

$$Z_\phi = R_A = R_B = R_C = R_\phi. \quad (2.9)$$

Из выражений (2.7а) - (2.7в) видно, что симметричная трехфазная система комплексных ЭДС в сумме образует ноль:

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0. \quad (2.10)$$

Это означает, что для любого момента времени алгебраическая сумма мгновенных значений этих ЭДС (рис. 2.2, а), как и их векторная сумма (рис. 2.2, б) также равны нулю:

$$e_A + e_B + e_C = 0.$$

Из соотношений (2.3) и (2.10) следует, что сумма комплексных симметричных фазных напряжений также равна нулю:

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0. \quad (2.11)$$

Для симметричной трехфазной нагрузки, определяемой соотношениями (2.5), (2.6), следует, что фазные (линейные) токи также будут симметричными, т. е. равными по величине и сдвинутыми на одинаковый фазовый угол $2\pi/3 = 120^\circ$.

Сумма симметричных комплексных токов аналогично формулам (2.10) и (2.11) также равна нулю:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0. \quad (2.12)$$

Сопоставление выражений (2.6) и (2.12) показывает, что для симметричной нагрузки фаз, соединенных звездой ток в нейтральном проводе всегда равен нулю

$$i_N = i_A + i_B + i_C = 0. \quad (2.13)$$

Если нагрузка фаз трехфазного электротехнического устройства по своей конструкции **всегда симметричная**, как например, в **трехфазных асинхронных двигателях** (где три симметричные фазы-обмотки статора имеют одинаковые сопротивления), то для их соединения по схеме звезда к трехфазной сети нейтральный провод никогда не присоединяется к нейтральной точке «N» фазных обмоток статора.

Примечание. В то же время заземленный (нулевой) нейтральный провод используется в целях электробезопасности за счет его присоединения к корпусу асинхронного двигателя.

На рис. 2.4 показана векторная диаграмма для напряжений и токов трехфазной симметричной активной нагрузки, соединенной звездой, которая построена на основании формул (2.5), (2.8), (2.11), (2.13). Из нее видно, что в прямоугольном треугольнике $\triangle CNM$ отношение катета CM , равного половине линейного напряжения $U_L/2$, к гипотенузе CN , соответствующей фазному напряжению U_ϕ (т. к. $|\dot{U}_C| = U_\phi$) определяется по формуле:

$$\frac{U_L/2}{U_\phi} = \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Из этого выражения следует, что

$$\frac{U_L}{U_\phi} = \sqrt{3} \approx 1,73 \quad (2.14)$$

т. е. для симметричной нагрузки фаз, соединенных звездой, линейные напряжения больше фазных в $\sqrt{3} \approx 1,73$ раз.

Таким образом, если линейные напряжения в трехфазной сети равны 380 В, то фазные напряжения для трехфазной нагрузки соединенной звездой будут в $\sqrt{3}$ раз меньше и равны 220 В. Напряжения 220/380 В являются стандартными величинами фазных и линейных напряжений в низковольтных сетях промышленной частоты 50 Гц в нашей стране и в других европейских странах.

Общие активную P , реактивную Q и полную S мощности электроприемников в трехфазной цепи при их соединении звездой можно **при любой несимметрии** вычислить как **арифметические суммы** этих мощностей для отдельных фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C;$$

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C;$$

$$S = S_A + S_B + S_C = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Для симметричной трехфазной нагрузки мощности вычисляются для одной фазы, а затем утраиваются:

$$P = 3P_\phi; Q = 3Q_\phi; S = 3S_\phi.$$

Для симметричной трехфазной нагрузки мощности P, Q, S можно вычислить через линейные напряжения $U_\text{л}$ и токи $I_\text{л}$ по формулам:

$$P = \sqrt{3}U_\text{л}I_\text{л} \cos \varphi; \quad (2.19)$$

$$Q = \sqrt{3}U_\text{л}I_\text{л} \sin \varphi; \quad (2.20)$$

$$S = \sqrt{3}U_\text{л}I_\text{л}. \quad (2.21)$$

где φ – угол сдвига по фазе между фазными током и напряжением.

2.3. Цепь трехфазного тока при соединении электроприемников треугольником

Эквивалентная схема замещения трехфазной цепи при соединении фаз электроприемников треугольником показана на рис. 2.5.

Анализируя схему, изображенную на рис. 2.5 можно отметить следующие особенности данной цепи.

1. По сравнению с трехфазной нагрузкой, соединенной звездой, которая может быть подсоединена к **четырёхпроводной сети с нейтральным проводом N** , трехфазные электроприемники, соединенные **треугольником**, могут быть подсоединены к трехфазной питающей сети **только по трехпроводной схеме**.
2. Напряжения между тремя парами линий A, B, C равны падениям напряжений на фазах, которые присоединены к этим линиям. То есть для **трехфазной нагрузки, соединенной треугольником** **напряжения между линиями (линейные напряжения) равны соответствующим фазным напряжениям:**

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}. \quad (2.22)$$

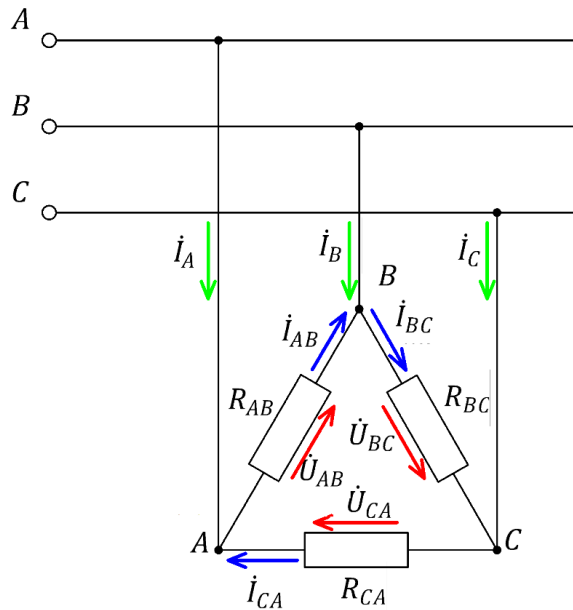


Рис. 2.5 Эквивалентная схема замещения трехфазной цепи при соединении электроприемников треугольником

3. На основании 1-го закона Кирхгофа соотношения между фазными и линейными токами для схемы рис. 2.11:

$$i_A = i_{AB} - i_{CA}. \quad (2.23a)$$

$$i_B = i_{BC} - i_{AB} \quad (2.23б)$$

$$i_C = i_{CA} - i_{BC} \quad (2.23в)$$

4. Для симметричной трехфазной активной нагрузки, когда

$$R_{AB} = R_{BC} = R_{CA} = R_{\phi}. \quad (2.24)$$

и исходной симметричной системы линейных напряжений, **фазные токи**, определяемые законом Ома, **также будут симметричны**:

$$i_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{R_{\phi}}; \quad (2.25a)$$

$$i_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{R_{\phi}}; \quad (2.25б)$$

$$i_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{R_{\phi}}, \quad (2.25\text{в})$$

т. е. одинаковы по величине:

$$I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_{\phi} \quad (2.25\text{г})$$

и сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол 120° .

Закон Ома для фазных величин при симметричной активной нагрузке:

$$I_{\phi} = U_{\phi} R_{\phi}. \quad (2.26)$$

5. Анализ формул (2.23а) – (2.23в) показывает, что для **симметричной нагрузки линейные токи также будут симметричны и по величине равны друг другу:**

$$I_A = I_B = I_C = I_L \quad (2.27)$$

На рис. 2.6 показана векторная диаграмма для токов и напряжений симметричной активной нагрузки, соединенной треугольником, построенная на основе соотношений (2.22) – (2.27).

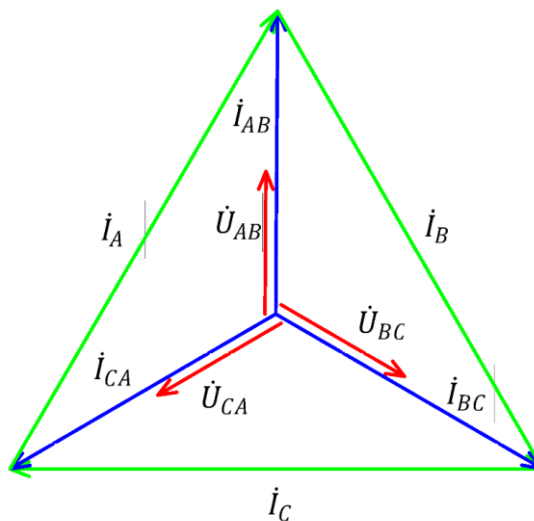


Рис. 2.6 Векторная диаграмма для токов и напряжений трехфазной симметричной активной нагрузки, соединенной треугольником

Из векторной диаграммы рис. 2.6 можно получить соотношение между фазными и линейными токами для симметричной нагрузки:

$$I_L = 2I_{\phi} \cos 30^\circ = 2I_{\phi} \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}I_{\phi}. \quad (2.28)$$

Таким образом, при соединении фаз треугольником и симметричной нагрузке фаз линейные токи больше фазных в $\sqrt{3} = 1,73$ раз.

Из диаграммы на рис. 2.6 видно, что для активной нагрузки фазные (линейные) напряжения и соответствующие фазные токи совпадают по фазе. Из этой же диаграммы видно, что сумма комплексных линейных напряжений, как симметричная система векторов равна нулю.

Если сложить равенства (2.23а) – (2.23в), то можно получить соотношение между линейными токами при соединении трехфазной нагрузки треугольником:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0, \quad (2.29)$$

т. е. комплексная (векторная) сумма линейных токов равна нулю при любой трехфазной нагрузке, включенной треугольником, в частности несимметричной, и может быть изображена в виде замкнутой треугольной цепочки векторов линейных токов $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$.

Общую активную P , реактивную Q и полную S мощности электроприемников в трехфазной цепи при их соединении треугольником (для симметричной и несимметричной нагрузки) можно вычислить как арифметические суммы этих мощностей отдельных фаз:

$$P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA};$$

$$Q = Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CA};$$

$$S = S_{AB} + S_{BC} + S_{CA} = \sqrt{P^2 + Q^2},$$

где мощности P_ϕ, Q_ϕ, S_ϕ для отдельной фазы вычисляются по следующим формулам:

$$P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi = \frac{U_\phi^2}{R_\phi} = I_\phi^2 R_\phi;$$

$$Q_\phi = U_\phi I_\phi \sin \varphi = \frac{U_\phi^2}{X_\phi} = I_\phi^2 X_\phi;$$

$$S_\phi = U_\phi I_\phi = \frac{U_\phi^2}{Z_\phi} = I_\phi^2 Z_\phi,$$

где R_ϕ, X_ϕ, Z_ϕ - соответственно активное, реактивное и полное сопротивление одной из фаз.

Для симметричной трехфазной нагрузки мощности вычисляются для одной фазы, а затем утраиваются:

$$P = 3P_\phi; Q = 3Q_\phi; S = 3S_\phi.$$

Для симметричной трехфазной нагрузки соединенной треугольником мощности P, Q, S можно вычислить также, как для схемы трехфазной нагрузки, соединенной звездой, через линейные напряжения $U_\text{л}$ и токи $I_\text{л}$ по формулам (2.19) – (2.21).

3. Трансформаторы

3.1. Однофазный трансформатор

Трансформатором называется статический (без подвижных частей) электромагнитный аппарат, служащий для преобразования посредством магнитного поля переменного (синусоидального) напряжения одной величины в переменное напряжение другой величины той же частоты.

Первые идеи создания трансформатора принадлежали талантливому русскому изобретателю [П.Н. Яблочкову](#), который в 1876 году разработал и использовал трансформатор для питания электрических свечей. Быстрое развитие трансформаторостроения началось тогда, когда выдающимся русским инженером электротехником [М.О. Доливо-Добровольским](#) была разработана **система передачи электроэнергии с помощью трехфазных цепей** и впервые в мире созданы конструкции **трехфазного трансформатора** и **трехфазного асинхронного двигателя**.

Трансформаторы применяются в энергетических установках систем энергоснабжения при передаче и распределении электрической энергии. В энергетических системах трансформатор является важнейшим элементом. С целью уменьшения сечения и экономии проводов передача больших мощностей на дальние расстояния осуществляется при высоких напряжениях и относительно небольших значениях тока.

Генераторы крупных электростанций вырабатывают электроэнергию хоть и высоким напряжением (порядка 6 – 12 кВ), но недостаточно большим для ее передачи на дальние расстояния. Поэтому в начале линии электропередачи устанавливаются трансформаторы, повышающие напряжение переменного тока, вырабатываемого на электростанциях до величины сотен киловольт. В конце линии электропередачи устанавливаются трансформаторы, понижающие напряжение, так как с целью безопасной эксплуатации и высокой надежности все промышленные электроустановки рассчитаны на сравнительно низкие напряжения $U_{\phi}/U_{л} = 220/380$ В, а электробытовая техника переменного тока – на однофазное напряжение 220 В.

Трансформаторы малой мощности применяются в радио- и телеустройствах, в системах автоматики, связи и др. В этих случаях трансформаторы преобразуют напряжение переменного тока одной величины в напряжение другой величины, которое требуется для работы блока питания устройства и отличается от напряжения внешнего источника питания.

Трансформаторы в зависимости от числа фаз могут быть **однофазными** и **многофазными**, чаще всего – **трехфазными**.

Трансформаторы выполняются **двухобмоточными** (на одну фазу) и **многообмоточными** (с одной первичной и двумя или более вторичными обмотками). Трансформаторы выполняются с **концентрическими** и **чередующимися обмотками**.

Обмотки трансформатора выполняются в виде катушек из медного изолированного провода. Для усиления индуктивной (магнитной) связи между обмотками их помещают на **ферромагнитный сердечник** из электротехнической стали, называемый **магнитопроводом**. Для уменьшения магнитных потерь на вихревые токи сердечник трансформатора набирается из отдельных пластин электротехнической стали (толщиной 0,5 мм), с двух сторон покрытых тонким слоем изоляции или оксидной пленки.

Трансформаторы малой мощности имеют сравнительно большую удельную поверхность теплоотвода, и поэтому для них вполне достаточным является **естественное воздушное охлаждение**. Трехфазные трансформаторы большой мощности для улучшения условий теплоотвода выполняются с **масляным охлаждением**.

Преобразование напряжения в простейшем **однофазном двухобмоточном трансформаторе** осуществляется **переменным магнитным потоком**, пронизывающим витки обеих обмоток (рис. 3.1). Обмотка с числом витков W_1 , подключенная к сети, называется **первичной обмоткой**, обмотка с числом витков W_2 , к которой подключена нагрузка, называется **вторичной обмоткой**. Подаваемое на первичную обмотку трансформатора напряжение переменного тока u_1 называют **первичным напряжением (или напряжением питания)**. Снимаемое напряжение u_2 со вторичной обмотки трансформатора – **вторичным напряжением**.

Если напряжение на вторичной обмотке выше, чем на первичной ($u_2 > u_1$), то такой **трансформатор называется повышающим**. При снижении величины преобразуемого напряжения в трансформаторе ($u_2 < u_1$) он называется **понижающим**.

В зависимости от значения сопротивления нагрузки различают три режима работы трансформатора.

1. В **режиме холостого хода**, когда вторичная обмотка разомкнута, можно считать, что сопротивление нагрузки $Z_H = \infty$ (**ненагруженный трансформатор**).
2. При сопротивлении нагрузки $Z_H = 0$, когда вторичная обмотка замкнута накоротко, устанавливается аварийный **режим короткого замыкания**.
3. При сопротивлении нагрузки $0 < Z_H < \infty$ считается, что трансформатор работает **в режиме под нагрузкой (нагруженный трансформатор)**.

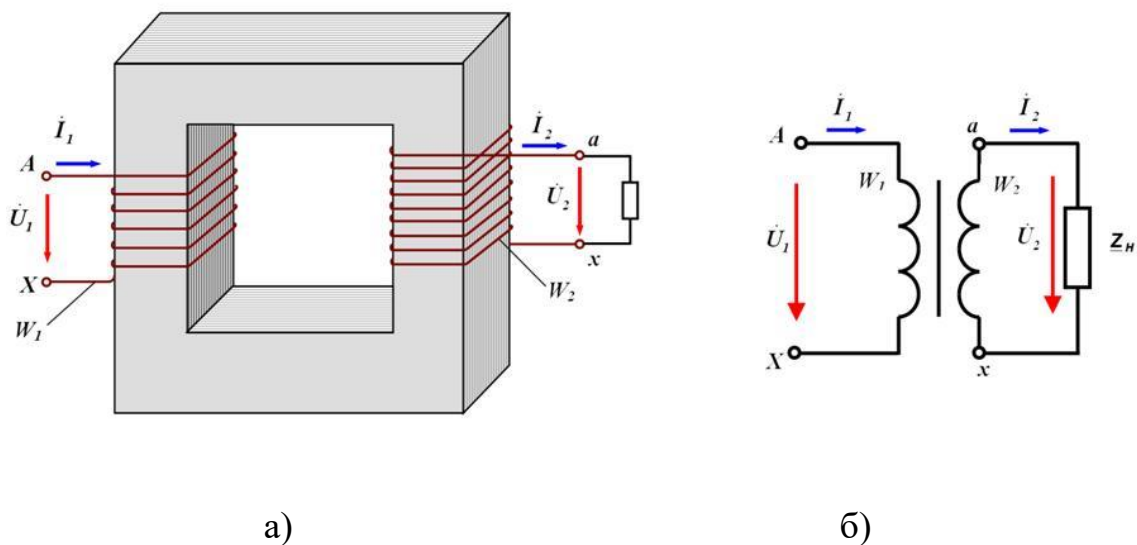


Рис. 3.1 Однофазный двухобмоточный трансформатор: а) конструктивная схема; б) принципиальная схема

Режим холостого хода трансформатора

Преобразование напряжения в трансформаторе, основанное на явлении **электромагнитной индукции**, открытое в 1831 году [М. Фарадеем](#), рассмотрим для режима холостого хода (рис. 3.2). Если первичную обмотку трансформатора с числом витков W_1 подключить к источнику синусоидального напряжения u_1 частотой f , то переменный ток i_{10} с действующим значением I_{10} , называемый **током холостого хода**, создает в магнитопроводе **основной переменный магнитный поток** Φ_0 той же частоты:

$$\Phi_0 = \Phi_{0m} \sin \omega t. \quad (3.1)$$

Единица измерения магнитного потока вебер [Вб] названа в честь немецкого физика [В. Вебера](#).

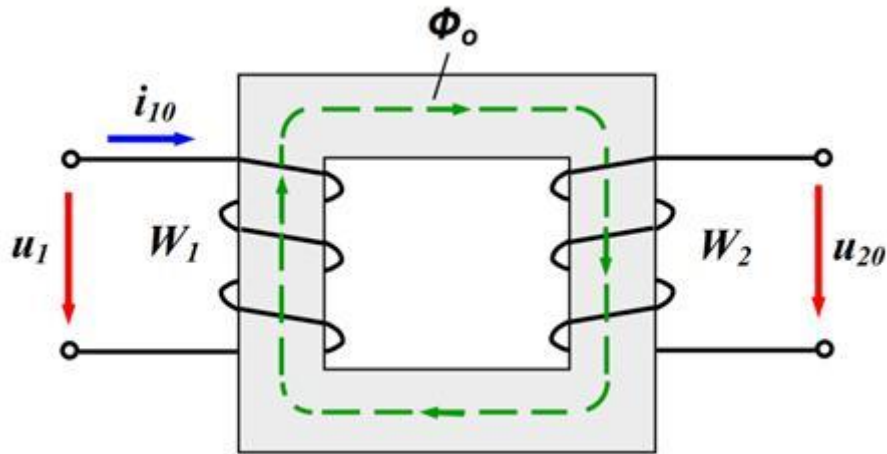


Рис. 3.2 Однофазный двухобмоточный трансформатор в режиме холостого хода

Магнитный поток Φ_0 сцепляется с витками как первичной, так и вторичной обмотками трансформатора, и за счет электромагнитной индукции **наводит (индуцирует)** в них соответствующие **электродвижущие силы (ЭДС)**:

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = E_{1m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right); \quad (3.2)$$

$$e_2 = -W_2 \frac{d\Phi_0}{dt} = E_{2m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (3.3)$$

где E_{1m} и E_{2m} – амплитудные значения наводимых ЭДС в первичной и вторичной обмотках, причем

$$E_{1,2m} = 2\pi f W_{1,2} \Phi_{0m}.$$

Из выражений (3.2) и (3.3) видно, что ЭДС в обмотках e_1, e_2 отстают от магнитного потока Φ_0 на угол $\pi/2$.

После подстановки выражения (3.1) в формулы (3.2) и (3.3), проведения дифференцирования и перехода к действующим значениям величины ЭДС, наводимые в первичной и вторичной обмотках, будут иметь следующий вид:

$$E_1 = 4,44f W_1 \Phi_{0m}; \quad (3.4a)$$

$$E_2 = 4,44f W_2 \Phi_{0m} \quad (3.4б)$$

Из формул (3.4) следует, что действующее значение синусоидальной ЭДС в обеих обмотках прямо пропорциональна амплитуде магнитного потока Φ_{0m} ,

его частоте f (скорости изменения магнитного потока во времени) и числу витков W_1, W_2 соответствующей обмотки.

Явление электромагнитной индукции применительно к трансформатору приводит к тому, что отношение ЭДС обмоток, сцепленных с одним и тем же переменным магнитным потоком, равно отношению их чисел витков, которое называется **коэффициентом трансформации K** :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = K. \quad (3.5)$$

В режиме холостого хода из **второго закона Кирхгофа** следует, что величина напряжения на концах разомкнутой вторичной обмотки U_{20} равна величине наведенной в ней ЭДС E_{20} , а векторы этих величин противоположно направлены:

$$\dot{U}_{20} = -\dot{E}_{20}. \quad (3.6)$$

Напряжение питания первичной обмотки $\dot{U}_1$ определяется из уравнения электрического равновесия для этой обмотки:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_{10} + jX_1 \dot{I}_{10}, \quad (3.7)$$

где $\dot{I}_{10}$ – ток первичной обмотки при разомкнутой вторичной обмотке, называемый **током холостого хода**; R_1 – **активное (электрическое) сопротивление провода** первичной обмотки, X_1 – **индуктивное сопротивление рассеяния** этой обмотки, обусловленное небольшим магнитным потоком рассеяния $\Phi_{1\sigma}$ (см. рис. 3.5).

Исходя из уравнений (3.6) и (3.7), на рис. 3.3 построена **векторная диаграмма** трансформатора для режима холостого хода.

Можно считать, что величина напряжения первичной обмотки U_1 приближенно равна величине ЭДС E_1 (см. рис. 3.3), т. е. $U_1 \approx E_1$, если пренебречь относительно малым (несколько процентов) падением напряжения U_{W10} на первичной обмотке

$$\dot{U}_{W10} = Z_1 \dot{I}_{10}$$

от тока холостого хода $\dot{I}_{10}$ на сопротивлении первичной обмотки $Z_1 = R_1 + jX_1$

$$U_{W10} \ll U_1 \approx E_1.$$

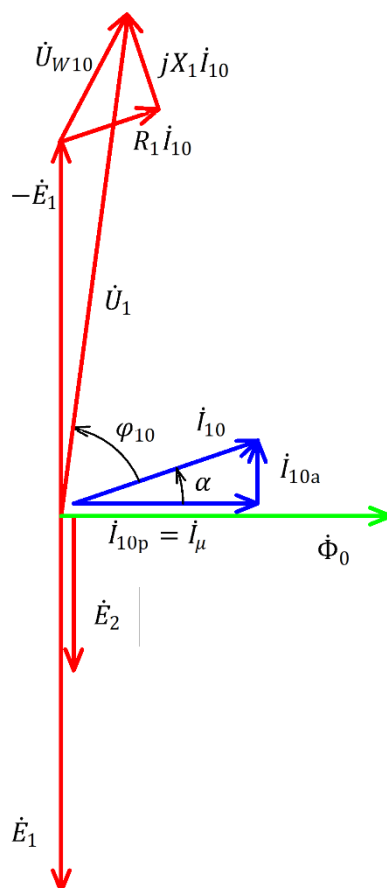


Рис. 3.3 Векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода

Поэтому **коэффициент трансформации** трансформатора с достаточной для практики точностью можно определить опытным путем из режима холостого хода через отношение напряжений на первичной W_1 и вторичной W_2 обмотках трансформатора:

$$K = \frac{W_1}{W_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}}. \quad (3.8)$$

Из выражения (3.8) видно, что для **повышающего трансформатора** ($u_2 > u_1$) **коэффициент трансформации K меньше единицы**, а для **понижающего** ($u_2 < u_1$) наоборот – **K больше единицы**.

При прохождении переменного магнитного потока по магнитопроводу трансформатора в нем возникают **магнитные потери** мощности $P_{\text{маг}}$, затраченные на перемангничивание стального сердечника (**потери на**

гистерезис) $P_{\text{мг}}$ и магнитные потери $P_{\text{мв}}$, связанные с нагревом магнитопровода **вихревыми токами**, наводимыми в сердечнике пульсирующим магнитным потоком (**потери от вихревых токов**):

$$P_{\text{маг}} = P_{\text{мг}} + P_{\text{мв}}. \quad (3.9)$$

Магнитные потери в стали сердечника $P_{\text{маг}}$ зависят от марки стали, из которой выполнен сердечник, от частоты сети и магнитной индукции в сердечнике. Так как частота сети и магнитная индукция в сердечнике остаются неизменными при работе трансформатора, то и **потери в стали не зависят от нагрузки и остаются постоянными**.

В режиме холостого хода потерями мощности в первичной обмотке P_{W10} от прохождения небольшого тока I_{10} по активному сопротивлению R_1 этой обмотки можно пренебречь:

$$P_{W10} = I_{10}^2 R_1 \approx 0. \quad (3.10)$$

Поэтому активная мощность P_0 , потребляемая трансформатором в этом режиме, называемая **потерями холостого хода**, идет в основном на покрытие магнитных потерь в сердечнике трансформатора:

$$P_0 = P_{W10} + P_{\text{маг}} \approx P_{\text{маг}}. \quad (3.11)$$

Ток холостого хода I_{10} , как видно из векторной диаграммы (см. рис. 3.3), содержит активную I_{10a} и реактивную I_{10p} составляющие:

$$I_{10} = \sqrt{I_{10a}^2 + I_{10p}^2}. \quad (3.12)$$

Активная составляющая тока холостого хода I_{10a} обусловлена магнитными потерями $P_{\text{маг}}$ в трансформаторе и может быть рассчитана по формуле:

$$I_{10a} = \frac{P_{\text{маг}}}{U_1}. \quad (3.12)$$

Реактивная составляющая тока холостого хода I_{10p} , создающая магнитный поток, называется **током намагничивания** I_{μ} . Ток холостого хода трансформатора I_{10} сравнительно мал и составляет 4 – 10% от номинального

тока первичной обмотки $I_{1\text{ном}}$ нагруженного трансформатора. Относительное значение тока холостого хода уменьшается при увеличении номинальной мощности трансформатора

В режиме холостого хода можно опытным путем определить зависимости потерь холостого хода P_0 и тока холостого хода I_{10} от величины напряжения U_1 , подаваемого на первичную обмотку трансформатора. Эти зависимости называются **характеристиками холостого хода** трансформатора. Как видно из рис. 3.4, насыщение сердечника трансформатора приводит к тому, что ток I_{10} растет быстрее, чем увеличивается напряжение U_1 .

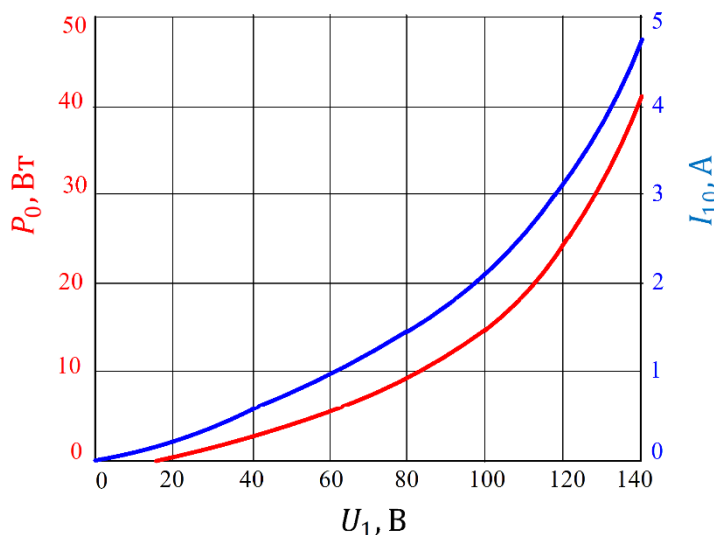


Рис. 3.4 Характеристики холостого хода трансформатора

Режим короткого замыкания

Замыкание накоротко вторичной обмотки трансформатора в процессе эксплуатации приводит к **аварийному режиму короткого замыкания**.

При наступлении режима короткого замыкания и подаче на первичную обмотку трансформатора номинального напряжения U_1 , в первичной и вторичной обмотках возникают весьма значительные **токи короткого замыкания** $I_{1к}, I_{2к}$ (в десятки и сотни раз выше номинальных). Эти токи вызовут очень большие тепловые потери $P_{1к}, P_{2к}$ в активных сопротивлениях R_1, R_2 проводов обеих обмоток трансформатора:

$$P_{1к} = I_{1к}^2 R_1; \quad (3.13a)$$

$$P_{2к} = I_{2к}^2 R_2. \quad (3.136)$$

Под действием этих потерь обмотки очень быстро разогреются до высокой температуры, их изоляция обуглится, произойдет закорачивание витков обмоток, уменьшение их активных сопротивлений R_1 и R_2 , еще больший рост токов короткого замыкания, дальнейшее увеличение потерь в обмотках и их нагрев и т. д. Этот лавинообразный процесс аварийного режима короткого, если не произойдет срабатывание защитных устройств, происходит до тех пор, пока провод одной из обмоток не расплавится, после чего произойдет разрыв в первичной или вторичной цепях обмоток трансформатора и токи в обеих обмотках уменьшатся до нуля. В результате такого аварийного режима короткого замыкания, длительность которого составляет доли секунды, трансформатор выходит из строя.

Опыт короткого замыкания

В отличие от вышеописанного аварийного режима короткого замыкания, лабораторный **опыт короткого замыкания совершенно безопасен**. При проведении опыта короткого замыкания с замкнутой накоротко вторичной обмоткой к первичной обмотке трансформатора подводится низкое напряжение такой величины, чтобы токи короткого замыкания в обмотках $I_{1к}$ и $I_{2к}$ были равны номинальным токам:

$$I_{1к} = I_{1ном}; \quad (3.14a)$$

$$I_{2к} = I_{2ном}. \quad (3.146)$$

В опыте короткого замыкания напряжение, подводимое к первичной обмотке, сравнительно мало и составляет $U_{1к} = (0,05 \div 0,1)U_{1ном}$, т. е. $U_{1к} \approx E_{1к} \ll U_{1ном}$.

Магнитный поток в опыте короткого замыкания $\Phi_{0тк}$, как видно из (3.4), прямо пропорционален ЭДС $E_{1к}$:

$$\Phi_{0тк} = \frac{E_{1к}}{4,44W_1f} \quad (3.15)$$

и, следовательно, этот поток будет значительно меньше, чем при холостом ходе и в номинальном режиме.

Поэтому **магнитная индукция** в сердечнике, определяемая выражением $B_m = \Phi_{0mк}/S$ (где S – площадь поперечного сечения сердечника) будет также мала.

Единица измерения магнитной индукции – **тесла** [Тл] названа в честь выдающегося сербского ученого и изобретателя [Н. Теслы](#).

Следует учесть, что **магнитные потери** (3.9) в сердечнике трансформатора прямо пропорциональны квадрату амплитуды магнитной индукции B_m . Из-за низкой индукции величина магнитных потерь $P_{\text{маг,к}}$ в опыте короткого замыкания будет мала и ею можно пренебречь, т. е. $P_{\text{маг,к}} = 0$.

Поэтому в опыте короткого замыкания вся потребляемая трансформатором активная мощность P_k расходуется на тепловыделение и нагрев обмоток, которая с учетом (3.14) равна **электрическим потерям** в проводах при номинальной нагрузке $P_{\text{э,ном}}$:

$$P_k = P_{\text{э,ном}} = I_{1к}^2 R_1 + I_{2к}^2 R_2 = I_{1\text{ном}}^2 R_1 + I_{2\text{ном}}^2 R_2. \quad (3.16)$$

Из формулы (3.16) видно, что **потери в обмотках пропорциональны току во второй степени**. Поэтому электрические потери в проводах обмоток называют **переменными потерями трансформатора**.

По измеренным в опыте короткого замыкания величинам $U_{1к}, I_{1к}, I_{2к}$ определяют **электрические потери** в проводах обмоток трансформатора при номинальной нагрузке $P_{\text{э,ном}}$:

$$P_{1к} = P_{\text{э,ном}},$$

коэффициент трансформации трансформатора через отношение токов в его обмотках

$$K_{\text{тр}}^* = \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{I_{2к}}{I_{1к}},$$

а также **относительную величину напряжения первичной обмотки трансформатора**

$$\frac{U_{1к}}{U_{1н}} 100\%.$$

Режим работы нагруженного трансформатора

В режиме работы под нагрузкой (см. рис. 3.5) ко вторичной обмотке W_2 трансформатора подключена нагрузка с величиной полного сопротивления Z_H :

$$Z_H = \sqrt{R_H^2 + X_H^2}, \quad (3.17)$$

где R_H и X_H – соответственно, активная и реактивная составляющие сопротивления нагрузки.

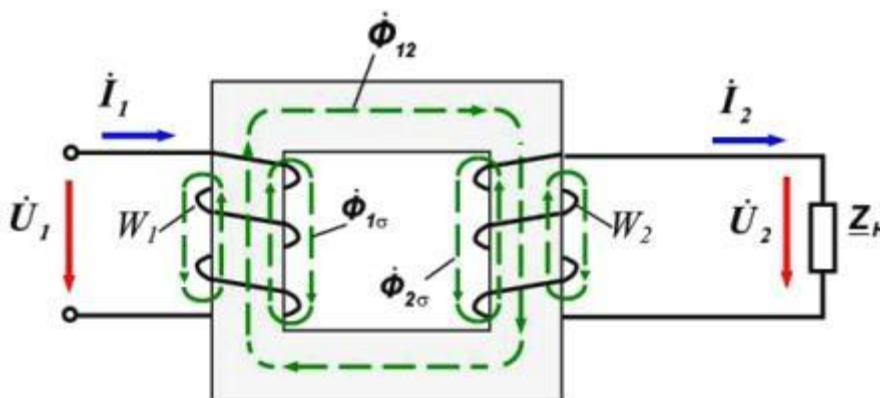


Рис. 3.5 Однофазный двухобмоточный трансформатор в режиме под нагрузкой

По первичной обмотке W_1 проходит ток I_1 , который, как известно, создает **магнитодвижущую силу (МДС) $\dot{F}_1$** этой обмотки и, тем самым, магнитный поток Φ_1 :

$$\dot{F}_1 = I_1 W_1. \quad (3.18)$$

Во вторичной обмотке W_2 и нагрузке, в общем случае активно-индуктивной с сопротивлением $\underline{Z}_H = R_H + jX_H$, будет протекать ток I_2 , образуя МДС этой обмотки $\dot{F}_2$:

$$\dot{F}_2 = I_2 W_2. \quad (3.19)$$

МДС $\dot{F}_2$ создаст свой магнитный поток Φ_2 , который будет складываться с магнитным потоком Φ_1 , создаваемым МДС $\dot{F}_1$ в первичной обмотке W_1 , образуя общий магнитный поток Φ_{12} в трансформаторе, сцепляющийся с витками обеих обмоток (см. рис. 3.6, б):

$$\dot{\Phi}_{12} = \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2.$$

Индукционный ток $\dot{I}_2$, образуемая им МДС $\dot{F}_2$ и создаваемый магнитный поток $\dot{\Phi}_2$ подчиняются **правилу Ленца**, которое применительно к магнитным потокам ненасыщенного трансформатора заключается в том, что поток $\dot{\Phi}_2$ стремится компенсировать магнитный поток $\dot{\Phi}_1$ так, чтобы общий магнитный поток $\dot{\Phi}_{12}$ в трансформаторе оставался постоянным и примерно равным потоку в режиме холостого хода $\dot{\Phi}_0$ (см. рис. 3.6, а). Это равенство соблюдается, если пренебречь магнитными потоками рассеяния $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ и $\dot{\Phi}_{2\sigma}$ (см. рис. 3.5) ввиду их малости по сравнению с основным магнитным потоком $\dot{\Phi}_0$, а также не учитывать влияние насыщения.

Для нагруженного трансформатора величины МДС обеих обмоток также можно сложить, заменив их сумму на эквивалентную МДС, равную МДС первичной обмотки в режиме холостого хода $\dot{F}_0 = \dot{I}_{10}W_1$:

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0, \quad (3.20)$$

или

$$\dot{I}_1W_1 + \dot{I}_2W_2 = \dot{I}_{10}W_1. \quad (3.21)$$

Магнитные потоки и образующие их МДС будут совпадать по фазе (см. рис. 3.6), если пренебречь магнитными потерями в трансформаторе.

Таким образом, общий магнитный поток $\dot{\Phi}_{12}$ и индуцируемые им ЭДС $\dot{E}_1$ и $\dot{E}_2$ в первичной и вторичной обмотках в ненасыщенном трансформаторе **остаются практически постоянными** при изменении тока нагрузки $\dot{I}_2$ в пределах от холостого хода до номинальной нагрузки трансформатора.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа уравнения электрического равновесия для первичной и вторичной обмоток нагруженного трансформатора имеют вид:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + (R_1 + jX_1)\dot{I}_1; \quad (3.22a)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - (R_2 + jX_2)\dot{I}_2; \quad (3.22б)$$

где R_1, R_2 и X_1, X_2 – соответственно, активные сопротивления провода и индуктивные сопротивления рассеяния первичной и вторичной обмоток.

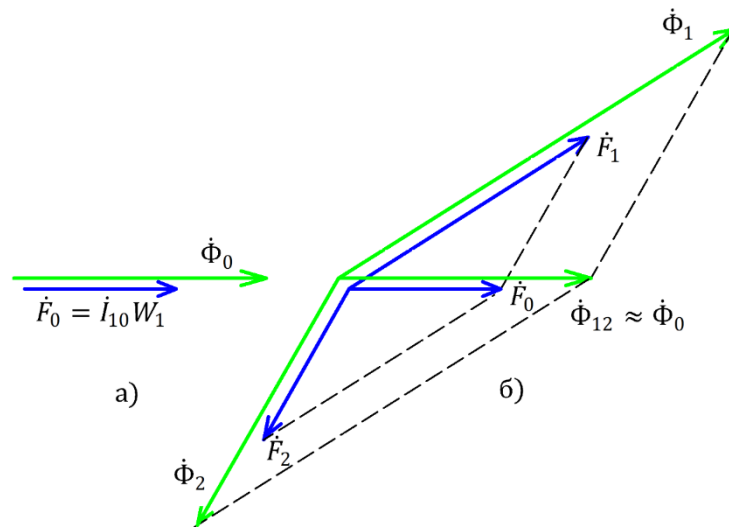


Рис. 3.6 Векторные диаграммы магнитных потоков и МДС обмоток: а) в режиме холостого хода трансформатора; б) в режиме нагруженного трансформатора

Из уравнения (3.22б) видно, что при увеличении тока нагрузки I_2 происходит увеличение падения напряжения на активно-индуктивном сопротивлении вторичной обмотки трансформатора и для активной или активно-индуктивной нагрузки – снижение вторичного напряжения U_2 . Снижение напряжения U_2 объясняется не только увеличением падения напряжения на вторичной обмотке, но и за счет уменьшения величины ЭДС E_2 . Уменьшение ЭДС E_2 вызвано насыщением магнитопровода и уменьшением основного магнитного потока Φ_0 при значительном увеличении тока нагрузки. Зависимость величины вторичного напряжения U_2 от тока нагрузки I_2 при $\cos \varphi_2 = \text{const}$ и $U_1 = U_{1\text{ном}} = \text{const}$ называется **внешней характеристикой** трансформатора.

Если пренебречь потерями в магнитопроводе и обмотках трансформатора (ввиду их малости по сравнению с передаваемой активной мощностью), то можно считать, что полные мощности, потребляемые трансформатором из сети $S_1 = U_1 I_1$ и отдаваемые в нагрузку $S_2 = U_2 I_2$, примерно равны друг другу, т.е. $S_1 \approx S_2$.

Из этого следует, что отношение токов нагруженного трансформатора обратно пропорционально отношению напряжений в обмотках и также может приближенно определить **коэффициент трансформации**:

$$K = \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}. \quad (3.23)$$

Выражение (3.23) показывает, что обмотка трансформатора высокого напряжения имеет более низкий ток, чем другая обмотка низкого напряжения с более высоким током.

Поэтому обмотка трансформатора высокого напряжения всегда имеет большее число витков и выполнена из провода с меньшим сечением, чем обмотка низкого напряжения.

К **нагрузочным характеристикам** трансформатора относятся зависимости от изменения тока нагрузки I_2 потребляемой активной мощности P_1 , коэффициента полезного действия (КПД) η , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ и напряжения на вторичной обмотке U_2 . Зависимость U_2 от I_2 также называют, как выше сказано, **внешней характеристикой трансформатора** (см. рис. 3.7).

На рис. 3.7 в единой координатной системе построена внешняя характеристика $U_2^*(I_2^*)$ и нагрузочные характеристики $P_1^*(I_2^*)$, $\eta(I_2^*)$, $\cos \varphi_1(I_2^*)$ однофазного двухобмоточного трансформатора малой мощности для активной нагрузки. В данном примере использованы нормированные значения характеристик, а именно:

$$I_2^* = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}}; \quad U_2^* = \frac{U_2}{U_{2\text{ном}}}; \quad P_1^* = \frac{P_1}{P_{1\text{ном}}}.$$

Зависимость коэффициента мощности трансформатора от тока нагрузки определяется выражением:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{U_1 I_1}. \quad (3.24)$$

Из рис. 3.7 видно, что при отсутствии нагрузки ($I_2 = 0$) коэффициент мощности больше нуля $\cos \varphi_{10} > 0$. Это объясняется тем, что в режиме холостого хода трансформатор потребляет активную мощность P_{10} , равную

потерям холостого хода, состоящим, как выше указано, из магнитных потерь в сердечнике трансформатора (см. формулу (3.11)).

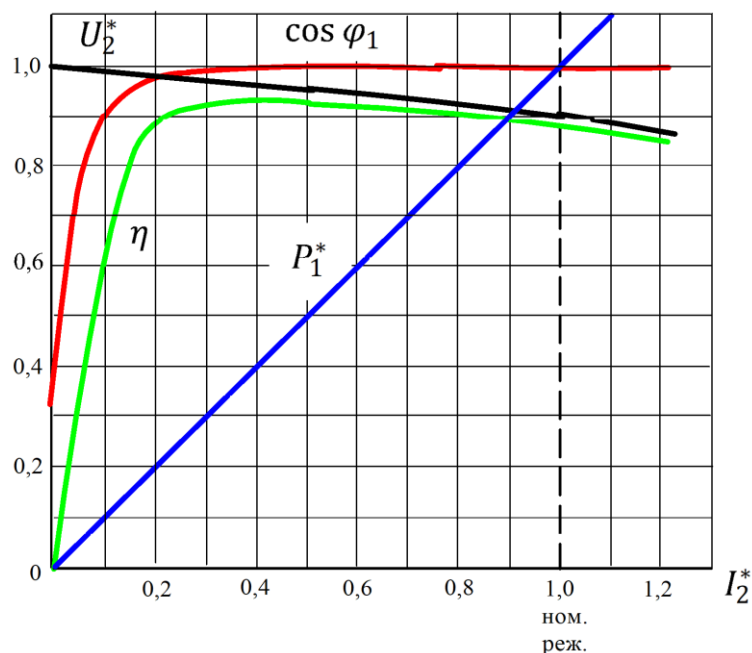


Рис. 3.7 Внешняя $U_2^*(I_2^*)$ и нагрузочные $P_1^*(I_2^*)$, $\eta(I_2^*)$, $\cos \varphi_1(I_2^*)$ характеристики однофазного трансформатора для активной нагрузки

Коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора η равен отношению полезной мощности P_2 , выделяемой в нагрузке, к активной мощности P_1 , потребляемой трансформатором из сети. Потребляемую мощность P_1 в свою очередь можно представить в виде суммы полезной мощности P_2 и мощности потерь ΔP , состоящей из суммы электрических потерь P_3 в обеих обмотках трансформатора:

$$P_3 = P_{W1} + P_{W2} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (3.25)$$

и магнитных потерь в сердечнике $P_{\text{маг}}$ (см. формулу (3.9)).

Таким образом, КПД нагруженного трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{P_2}{P_2 + P_3 + P_{\text{маг}}}. \quad (3.26)$$

Полезная мощность однофазного трансформатора при любой нагрузке равна $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$. С учетом этой формулы КПД трансформатора будет равен

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{\Sigma} + P_{\text{маг}}}. \quad (3.27)$$

Наибольший КПД трансформатора достигается при нагрузке, для которой магнитные потери в сердечнике равны электрическим потерям в обмотках. У современных трансформаторов большой мощности КПД достигает высоких значений (95% – 99%).

3.2. Автотрансформаторы

Автотрансформатор (АТ) – это трансформатор, в котором две или более обмотки соединены электрически, имея общую часть. Обмотки автотрансформатора соединены как электрически, так и магнитно. При этом передача электроэнергии из первичной цепи во вторичную цепь и нагрузку происходит как за счет магнитного поля путем электромагнитной индукции, так и за счет электрической связи обмоток. В автотрансформаторе одна часть всей поступающей энергии трансформируется магнитосвязанными обмотками, а другая часть передается непосредственно электрически из системы одного напряжения в систему другого напряжения без электромагнитной трансформации.

Обмотка высшего напряжения однофазного автотрансформатора может быть как первичной, так и вторичной. На рис. 3.8 показаны две схемы АТ с обмоткой высшего напряжения, подсоединенной к первичному напряжению (рис. 3.8, а), или к нагрузке (рис. 3.8, б). Обмотка низшего напряжения, служащая частью обмотки высшего напряжения, или подсоединена к напряжению сети (рис. 3.8, б), или соединена с нагрузкой (рис 3.8, а).

Формулы для ЭДС (3.2) и (3.3), которые наводятся в обмотках трансформатора, применимы и к обмоткам АТ, поэтому коэффициент трансформации автотрансформатора выражается теми же соотношениями (3.5), (3.23), что и для обычного трансформатора:

$$K = \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}. \quad (3.28)$$

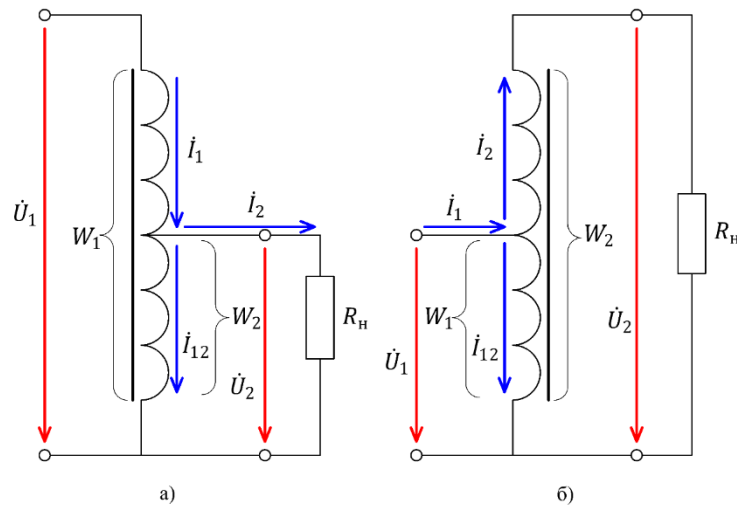


Рис. 3.8 Схемы двухобмоточного автотрансформатора: а) – первичная обмотка W_1 высшего напряжения; б) – первичная обмотка W_1 низшего напряжения

Формула (3.28) показывает, что когда обмотка высшего напряжения подключена к первичному напряжению, то АТ является понижающим, так как $U_2 < U_1$ (рис. 3.8, а), а когда обмотка высшего напряжения подключена к нагрузке (рис. 3.8, б), то АТ является повышающим $U_2 > U_1$.

Из схем на рис. 3.8 видно, что по 1-му закону Кирхгофа комплексный ток $\dot{I}_{12}$ в общей части обмотки равен разности комплексов действующих значений первичного и вторичного токов $\dot{I}_{12} = \dot{I}_1 - \dot{I}_2$.

Поскольку фазы комплексов первичного $\dot{I}_1$ и вторичного $\dot{I}_2$ токов АТ практически одинаковы, то можно считать, что величина тока I_{12} в общей части обмотки определяется модулем разности токов I_1 и I_2 :

$$I_{12} = |I_1 - I_2|. \quad (3.29)$$

Сопоставление формул (3.28) и (3.29) показывает, что когда коэффициент трансформации $K = W_1/W_2 = I_2/I_1$ незначительно отличен от единицы, то величины токов I_1 и I_2 примерно одинаковые. Вследствие этого разность токов $|I_1 - I_2|$, соответствующая току I_{12} , в общей части первичной и вторичной обмоток мала по сравнению с каждым из токов. Поэтому общую часть обмотки можно выполнить из провода с меньшим сечением. Это уменьшает расход проводниковых материалов и габариты АТ, а также снижает стоимость АТ по

сравнению с обычным трансформатором соизмеримой мощности и с тем же коэффициентом трансформации.

Преимуществами автотрансформатора по сравнению с обычным трансформатором при незначительных коэффициентах трансформации ($K = 0,5 \div 2,5$) являются:

- более простая конструкция;
- меньший расход меди;
- более высокий КПД за счет сравнительно меньших потерь в обмотках и магнитопроводе.

Это объясняется тем, что как было выше сказано, в АТ энергия из первичной сети во вторичную частично передается по электрической связи, а в обычном трансформаторе – только электромагнитным путем.

Однако автотрансформатор по сравнению с обычным трансформатором имеет **ряд недостатков**:

- сравнительно большой ток короткого замыкания (КЗ) из-за малого сопротивления КЗ;
- электрическая связь между первичной и вторичной обмотками, что представляет опасность в случае прикосновения человека к проводам в цепи нагрузки при высоком первичном напряжении.

Поэтому АТ нельзя использовать, например, в сетях напряжением 220 В распределительных подстанций, питаемых от высоковольтных сетей 6/10 кВ.

3.3. Измерительные трансформаторы

Измерительный трансформатор тока

Трансформатор тока используется для расширения пределов измерения в цепях переменного тока и включается по схеме, представленной на рис. 3.14. Первичная обмотка W_1 трансформатора тока зажимами L_1 и L_2 включается в линию переменного тока последовательно с электроприемником (нагрузкой R_H). К вторичной обмотке трансформатора тока через зажимы I_1 и I_2 подключается амперметр и, в случае необходимости, катушки других

измерительных приборов (ваттметра, счетчика электроэнергии и др.), которые соединяются между собой последовательно.

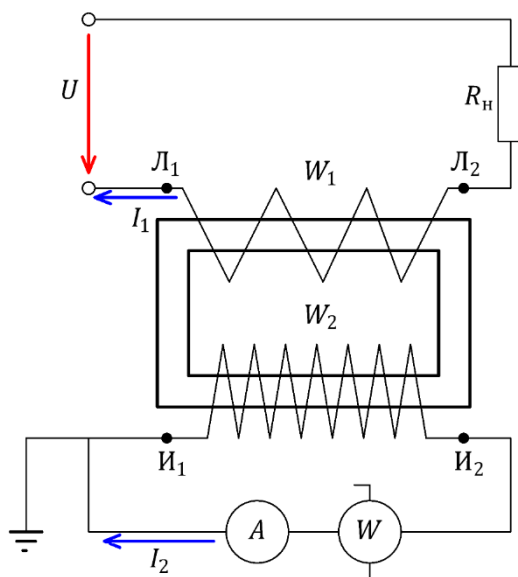


Рис. 3.9 Схема включения измерительного трансформатора тока

Трансформатор тока функционирует в условиях, близких к условиям короткого замыкания. Поэтому можно считать, что:

$$I_1 = \frac{W_2}{W_1} I_2 = K_I I_2, \quad (3.28)$$

то есть, первичный ток I_1 определяется умножением вторичного тока I_2 , измеряемого амперметром, на постоянный коэффициент трансформации K_I , который больше единицы, поскольку у трансформатора тока $W_2 > W_1$.

Номинальный ток вторичной обмотки для любых трансформаторов тока принимается равным 5А, независимо от коэффициента трансформации.

Шкала амперметра, использующего трансформатор тока, градуируется на первичный ток. На ней указывается, какой трансформатор тока должен быть включен с амперметром, например, 100/5 А, 200/5 А и т. д. **Вторичная цепь, в которую включен трансформатор тока, должна быть всегда замкнута.** В целях электробезопасности один вывод вторичной обмотки и кожух трансформатора заземляются (рис. 3.9).

Кроме расширения пределов измерения, трансформаторы тока электрически отделяют цепи низкого напряжения измерительных приборов от главных цепей, которые могут находиться под высоким напряжением.

Измерительный трансформатор напряжения

Для безопасной работы при измерении высокого напряжения цепях переменного тока напряжением свыше 1 кВ, а также с целью расширения пределов при измерении напряжения применяют **измерительные трансформаторы напряжения**, включаемые по схеме, представленной на рис. 3.10.

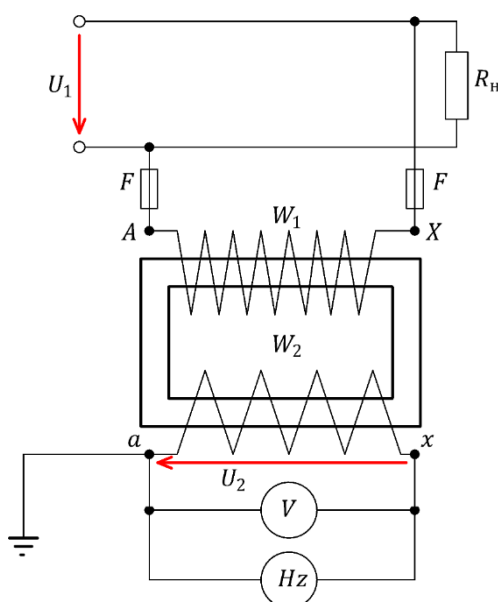


Рис. 3.10 Схема включения трансформатора напряжения с вольтметром в измерительную цепь

Первичная обмотка трансформатора напряжения (зажимы "А" и "Х"), которая является **обмоткой высшего напряжения (ВН)** с бóльшим числом витков W_1 , подключается к измеряемому высокому напряжению U_1 , а **вторичная обмотка W_2** , являясь **обмоткой низкого напряжения** (зажимы "а" и "х") замыкается на вольтметр и подсоединяется к цепям напряжения других приборов: ваттметра, счетчика электроэнергии, частотомера и др. Все эти приборы присоединяются к обмотке трансформатора низшего напряжения параллельно.

Трансформатор напряжения работает в режиме, близкому к режиму холостого хода. Поэтому можно считать, что

$$U_1 = \frac{W_1}{W_2} U_2 = K_U U_2,$$

то есть первичное высокое напряжение U_1 может быть определено умножением вторичного напряжения U_2 на постоянный коэффициент трансформации $K_U = W_1/W_2$ больше единицы, поскольку в трансформаторе напряжения $W_1 > W_2$.

Вторичное номинальное напряжение у трансформатора напряжения принимается равным $U_2 = 100$ В, независимо от коэффициента трансформации.

Шкала вольтметра градуируется на первичное напряжение. На ней указывается, с каким трансформатором напряжения должен включаться вольтметр, например, 6000/100 В, 10000/100 В и т. д. Обмотки трансформатора напряжения защищены плавкими предохранителями F (см. рис. 3.15).

Кроме расширения пределов измерения приборов переменного тока, трансформаторы напряжения отделяют цепи низкого напряжения измерительных приборов от главных цепей высокого напряжения.

В целях электробезопасности один из зажимов вторичной обмотки и металлический корпус трансформатора напряжения заземляются, как показано на рис. 3.15.

3.4. Специальные трансформаторы

По назначению трансформаторы делятся на **силовые** и **специального назначения**.

Силовые трансформаторы используются:

- в цепях переменного тока при передаче и распределении электроэнергии;
- в установках со статическими преобразователями частоты при преобразовании переменного тока в постоянный ток (выпрямители),

или при преобразовании постоянного тока в переменный ток (инверторы);

- для получения определенных напряжений в цепях с электроприводами, в цепях местного освещения, для питания электробытовой техники и др.

В свою очередь **трансформаторы специального назначения** подразделяются на:

- печные, сварочные и др.;
- измерительные – для безопасного включения и работы электрических измерительных приборов в цепи с высоким напряжением или большим по величине током;
- испытательные – для создания высоких напряжений, которые требуются при проведении испытаний на электрическую прочность изоляции различных электротехнических изделий;
- радиотрансформаторы – используемые в радиотехнике и проводной связи, в системах автоматики и телемеханики для получения необходимых напряжений звуковой частоты и т. д.

4. Электрические машины

Трехфазные асинхронные двигатели

Трехфазный асинхронный двигатель (АД) – наиболее распространенный тип электрического двигателя.

Асинхронный двигатель отличается простотой конструкции, относительно низкой стоимостью, высокой надежностью в эксплуатации. Как и любые электродвигатели, АД осуществляет преобразование электрической энергии источника питания в механическую энергию, передаваемую с помощью вала рабочему механизму.

В зависимости от системы питания переменным током асинхронные электродвигатели выполняются **трехфазными** или **однофазными**. В приводе электробытовой техники используются маломощные однофазные асинхронные двигатели. В промышленности и строительстве наиболее распространены трехфазные асинхронные электродвигатели.

Устройство трехфазного асинхронного двигателя

Основные части АД – **неподвижный статор** и разделенный небольшим воздушным рабочим зазором ($0,25 \div 1,0$ мм) **вращающийся ротор**. Конструктивно трехфазные асинхронные двигатели разделяются на два типа: **асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором** (кз-ротором) и **асинхронные двигатели с фазным ротором**. Рассмотрим устройство трехфазного АД с кз-ротором (рис. 4.1), которые получили наиболее широкое применение.

Статор АД состоит из корпуса 1 (литого алюминиевого или сварного стального), внутри которого расположен сердечник статора 2 в виде полого зубчатого цилиндра, набранного из отдельных штампованных пластин (колец) толщиной 0,5 мм из электротехнической стали. Для уменьшения магнитных потерь от вихревых токов пластины покрыты тонкой оксидной пленкой и, тем самым, изолированы друг от друга. В пазах сердечника статора размещена трехфазная обмотка статора 3 из медного изолированного провода. Ротор 4, насаженный на вал 5 выполняется с литой алюминиевой или медной короткозамкнутой обмоткой (кз-обмотка). Для интенсификации теплоотдачи с внутренних частей АД на обеих сторонах ротора имеются вентиляционные лопасти 6.

Ротор с кз-обмоткой (см. рис. 4.2) представляет собой цилиндрический сердечник 1 с зубцами 3, собранный в пакет из тонких изолированных дисковых пластин электротехнической стали с выштампованными пазами. Короткозамкнутая обмотка ротора выполняется или литой под давлением из алюминия или сварной из меди.

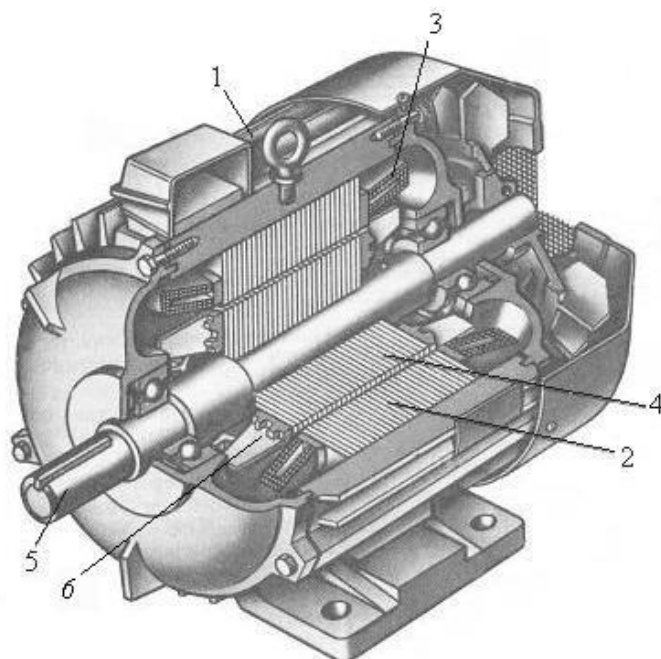


Рис. 4.1 Устройство трехфазного АД с кз-ротором: 1 – корпус; 2 – сердечник статора; 3 – обмотка статора; 4 – ротор с кз-обмоткой; 5 – вал; 6 – кз-кольца с лопатками вентилятора

При изготовлении кз-обмотки ротора из алюминия пазы залиты под давлением, образуя стержни обмотки 2, соединяемые по торцам литыми короткозамыкающими кольцами (кз-кольцами) 4 и вентиляционными лопатками 5 из того же материала (рис. 4.2). В медной кз-обмотке круглые стержни размещены в круглых пазах сердечника, а по торцам приварены к двум медным кз-кольцам (рис. 4.3). Полученная таким образом кз-обмотка ротора напоминает по конфигурации «беличью клетку».

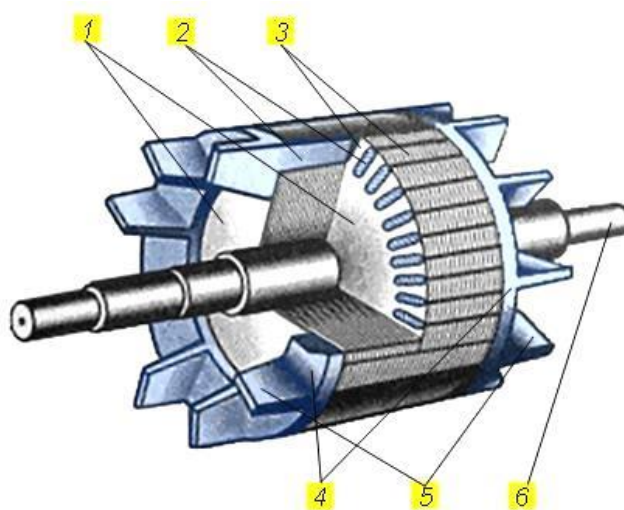


Рис. 4.2 Ротор асинхронного двигателя с литой кз-обмоткой: 1 – сердечник ротора с пазами; 2 – стержни кз-обмотки ротора; 3 – зубцы сердечника ротора; 4 – КЗ-кольца обмотки ротора; 5 – вентиляционные лопатки; 6 – вал

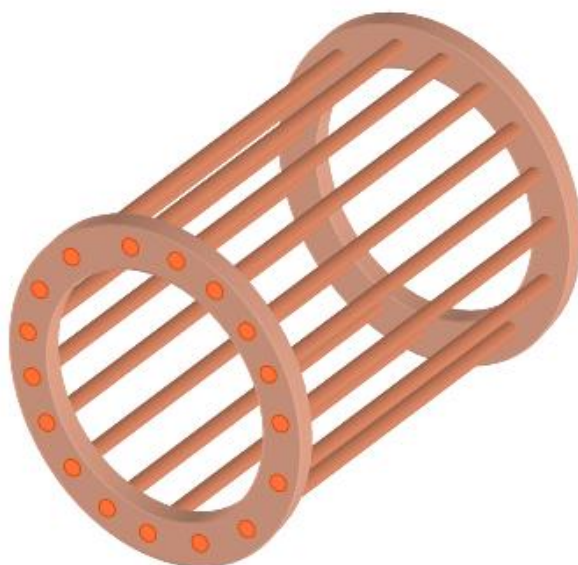


Рис. 4.3. Сварная медная кз-обмотка ротора асинхронного двигателя

Трехфазная обмотка статора выполнена в виде трех отдельных фазных обмоток, оси которых смещены в пространстве на угол 120° . Многовитковые катушки обмотки статора изготавливаются из медного изолированного провода с круглым или прямоугольным сечением, и укладываются в пазы зубчатого сердечника (рис. 4.1). Фазные обмотки могут соединяться звездой (рис. 4.4, а) или треугольником (рис. 4.4, б), в зависимости от величины номинального напряжения трехфазной питающей сети.

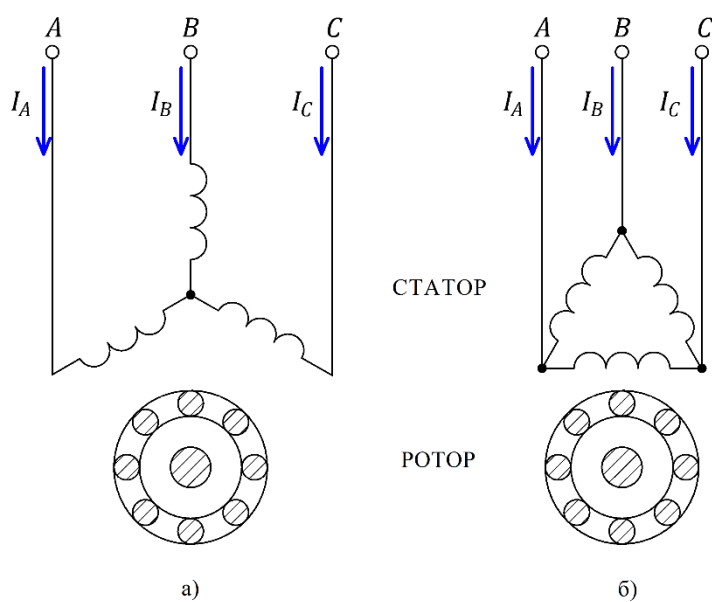


Рис. 4.4 Схемы включения фаз трехфазной обмотки статора звездой - а) и треугольником - б).

Фазный ротор

Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором, схема которого представлена на рис. 4.5, питается от трехфазной сети 1, имея такую же симметричную трехфазную обмотку статора 2, как и АД с кз-обмоткой ротора.

В фазном роторе АД трехфазная многовитковая обмотка 3 уложена в пазы сердечника ротора. Три конца фаз обмотки ротора сведены в один электрический узел, а три начала фаз обмотки a, b, c подключены к контактному кольцам 5. Контактные кольца через три угольные щетки 6 обеспечивают скользящий контакт с тремя пусковыми реостатами 7.

Введение пусковых реостатов в фазные цепи обмотки ротора обеспечивает существенное снижение величины пускового тока при одновременном увеличении пускового момента в начале пуска АД. По мере разгона асинхронного двигателя с фазным ротором его пусковой ток будет уменьшаться. В процессе перехода к установившемуся режиму работы АД пусковые реостаты полностью выводятся из фазных цепей обмотки ротора (на рис. 4.5 скользящие контакты реостатов 7 перемещаются в верхнее положение, закорачивая реостаты).

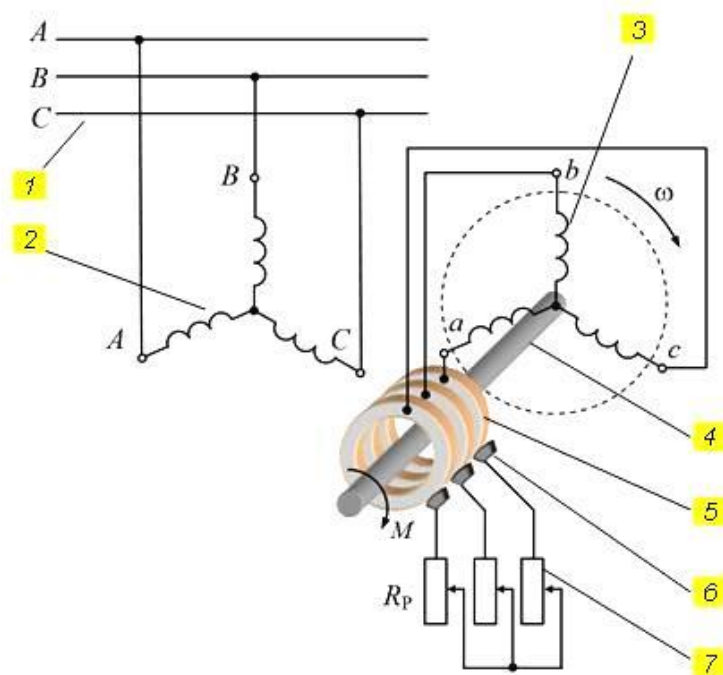


Рис. 4.5 Схема трехфазного АД с фазным ротором: 1 – трехфазная линия питания; 2 – трехфазная обмотка статора АД; 3 – трехфазная обмотка ротора; 4 – вал; 5 – контактные кольца; 6 – щетки; 7 – регулировочные реостаты

Принцип действия асинхронного двигателя

При подключении к трехфазной обмотке статора асинхронного двигателя трехфазного напряжения питания с частотой f_1 , Гц в фазных обмотках возникают синусоидальные токи с той же частотой, сдвинутые на фазный угол $120^\circ (2\pi/3 \text{ рад})$, как показано на рис. 4.6.

Протекающие по обмоткам токи

$$i_A = I_m \sin \omega t ;$$

$$i_B = I_m \sin(\omega t - 2\pi/3);$$

$$i_C = I_m \sin(\omega t + 2\pi/3)$$

будут создавать синусоидальные во времени магнитные потоки, пульсирующие по осям трех фаз-обмоток с частотой питающей сети f_1 , также сдвинутые на фазный угол $2\pi/3$.

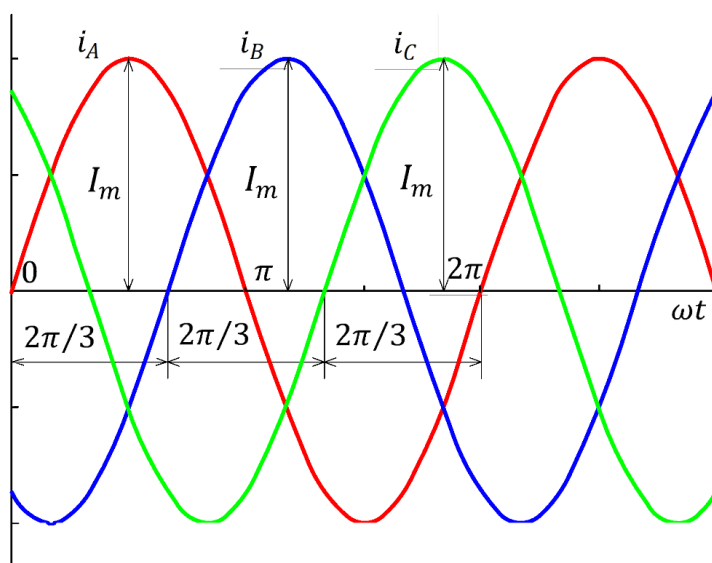


Рис. 4.6. График мгновенных значений токов в обмотках статора трехфазного АД

Особенности конструкции сердечника и трехфазных обмоток статора позволяют получить пространственное распределение магнитных потоков в рабочем воздушном зазоре АД, близкое к синусоидальному, причем оси потоков сдвинуты по окружности на угол $2\pi/3$ рад. Складываясь друг с другом, эти синусоидальные в пространстве и во времени потоки образуют результирующий вращающийся магнитный поток, синусоидально

распределенный по окружности рабочего зазора с постоянной амплитудой $\Phi_{от}$ и неизменной **частотой вращения** n_1 (**круговое вращающееся магнитное поле** АД). Скорость (частота) вращения магнитного поля называется **синхронной скоростью (частотой)** n_1 , об/мин и определяется через частоту сети f_1 и число **пар полюсов** p выражением:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}. \quad (4.1)$$

Синхронная частота вращения из формулы (4.1), при промышленной частоте тока $f_1 = 50$ Гц зависит только от числа пар полюсов ($n_1 = 60f_1/p = 3000/p$ об/мин). Из этого следует, что наибольшая синхронная частота вращения поля при частоте 50 Гц оказывается равной 3000 об/мин (для двухполюсного двигателя). Частота вращения поля уменьшается обратно пропорционально числу пар полюсов (см. табл. 4.1).

Таблица 4.1

Соответствие числа полюсов $2p$, пар полюсов p и частоты вращения n_1 поля статора АД при частоте сети 50 Гц

$2p$	2	4	6	8	10	12
p	1	2	3	4	5	6
n_1 , об/мин	3000	1500	1000	750	500	500

Для изменения направления вращения ротора асинхронного двигателя на противоположное (**реверс**) необходимо изменить направление вращения магнитного поля. Это достигается изменением порядка чередования токов i_A, i_B, i_C в фазных обмотках статора (рис. 4.6) за счет переключения любых двух из трех проводов A, B, C (см. рис. 4.4 и рис. 4.5), питающих двигатель от трехфазной сети.

Вращающийся магнитный поток АД пересекает обмотки статора и стержни кз-обмотки ротора и, вследствие **электромагнитной индукции**, наводит в них **электродвижущие силы (ЭДС)** E_1 и E_2 , соответственно. ЭДС E_1 , индуцируемая в обмотке статора, уравнивает бóльшую часть

приложенного напряжения U_1 , а ЭДС E_2 вызывает в стержнях кз-обмотки ротора токи I_2 . Эти токи, взаимодействуя с результирующим магнитным потоком, создают по закону [Ампера](#) электромагнитные силы $F_{эм}$ и результирующий электромагнитный вращающий момент M .

Этот момент приводит во вращение ротор АД по направлению вращающегося магнитного поля.

При этом **скорость (частота) вращения ротора n_2 всегда меньше скорости (частоты) n_1 вращения поля**. Если бы короткозамкнутый ротор вращался с частотой вращения поля статора ($n_2 = n_1$), то его обмотка была бы взаимно неподвижна с этим полем и в ней бы не наводилась ЭДС E_2 . Следствием этого было бы отсутствие токов в обмотке ротора I_2 , электромагнитных сил $F_{эм}$ и вращающего момента M .

Поэтому двигатель должен замедлить свою скорость до тех пор, пока в обмотке роторе не возникнет ЭДС и не появится ток, необходимый для создания соответствующего момента, уравнивающего тормозной момент нагрузки. После этого двигатель продолжит вращаться меньшей частотой вращения ($n_2 < n_1$). Поэтому данный двигатель и называется **асинхронным**, то есть буквально **с неодновременным** вращением магнитного поля и ротора.

Относительная разность скорости (частоты) вращения магнитного поля и скорости ротора называется **скольжением S** :

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (4.2)$$

В режиме работы АД без нагрузки на валу, который называется **холостым ходом двигателя**, частота вращения ротора n_{20} приближена к частоте вращения магнитного поля n_1 и скольжение двигателя, составляя доли процентов, близко к нулю ($S \approx 0$). При увеличении нагрузки на валу скольжение возрастает (n_2 уменьшается). При **номинальной нагрузке номинальное скольжение** составляет $S_{ном} = 0,02 \div 0,1$ (меньшие значения

скольжения относятся к более мощным АД). В начальный момент пуска ротор неподвижен ($n_2 = 0$) и скольжение равно единице ($S = 1$).

Основные характеристики асинхронного двигателя

Вращающий момент M асинхронного двигателя при постоянной частоте и неизменном напряжении питания однозначно определяется величиной скольжения. График зависимости $M(S)$, представленный на рис. 4.8, иногда называют **механической характеристикой** АД. При наибольшем вращающем моменте M_m наступает **критическое скольжение** $S_{кр}$, которое делит кривую $M(S)$ на два участка: участок **устойчивой работы** АД ($0 < S \leq S_{кр}$) и участок **неустойчивой работы** при $S_{кр} < S \leq 1$.

На участке **устойчивой работы** АД развивает вращающий момент M , автоматически становясь равным противодействующему моменту сопротивления (нагрузки) M_c рабочей машины. Так, при увеличении момента сопротивления M_c скорость вращения ротора будет уменьшаться, а скольжение S - увеличиваться. При этом вращающий момент двигателя M будет возрастать до наступления нового равновесия моментов $M = M_c$. При уменьшении M_c скорость увеличивается, а скольжение S и вращающий момент двигателя M соответственно уменьшаются. Такое свойство АД на участке устойчивой характеристики представляет собой **саморегулирование вращающего момента**.

На **неустойчивой части** характеристики $M(S)$ асинхронный двигатель не обладает свойством саморегулирования. Поэтому в условиях неравенства вращающего момента M и момента сопротивления M_c на этом участке АД работает кратковременно.

Так, если $M > M_c$, то двигатель будет увеличивать скорость (при этом уменьшается скольжение S) и затем перейдет на устойчивый участок работы (это процесс пуска АД). Если же вращающий момент будет меньше момента сопротивления ($M < M_c$), то скорость двигателя уменьшится до полной

остановки ($S = 1$), что приведет к новому равенству моментов ($M_{\pi} = M_c$) с неподвижным ротором.

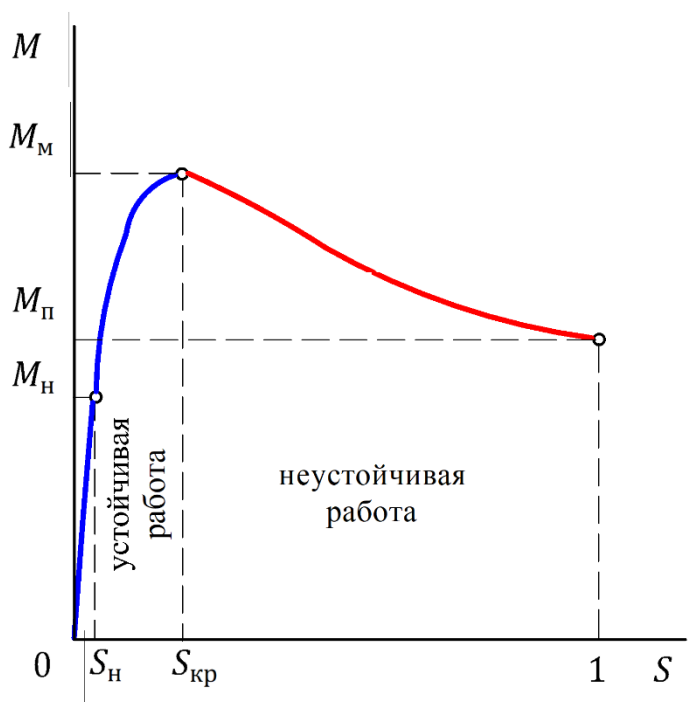


Рис. 4.8 График зависимости $M(S)$ асинхронного двигателя

Между скольжением ротора АД и его частотой вращения n_2 существует прямая взаимосвязь. Частота вращения ротора n_2 , об/мин определяется через скольжение S по формуле, вытекающей из выражения (4.2):

$$n_2 = n_1(1 - S). \quad (4.3)$$

Записав скольжение через частоту вращения ротора, представим зависимость частоты вращения асинхронного двигателя от момента в виде кривой $n_2(M)$, также называемой **механической характеристикой асинхронного двигателя** (рис. 4.9).

Когда наступает установившейся режим работы АД, **вращающий момент** M , Нм, который также называют **моментом на валу**, **механическая мощность**, **передаваемая нагрузке (полезная мощность)** P_2 , Вт и скорость вращения ротора n_2 , об/мин связаны соотношением

$$M = 9,55 \frac{P_2}{n_2}. \quad (4.4)$$

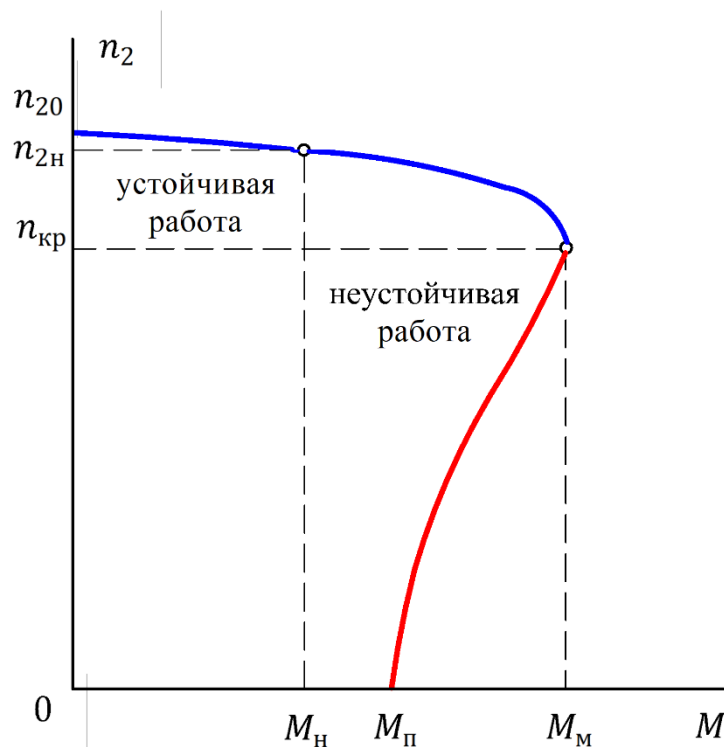


Рис. 4.9 Механическая характеристика трехфазного АД с кз-ротором

Режим работы, при котором двигатель может длительно работать и не перегреваться выше допустимой температуры называется **номинальным режимом**. В этом режиме номинальными будут вращающий момент ($M = M_{\text{н}}$) и мощность на валу ($P_2 = P_{2\text{н}}$). Номинальному режиму соответствуют номинальная частота вращения $n_{2\text{н}}$, номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{1\text{н}} = P_{1\text{н}} / (\sqrt{3} U_{1\text{н}} I_{1\text{н}})$, номинальный коэффициент полезного действия (КПД) $\eta_{\text{н}} = P_{2\text{н}} / P_{1\text{н}}$, номинальное линейное напряжение питания $U_{1\text{л}} = U_{1\text{н}}$, номинальный линейный ток, потребляемый двигателем $I_{1\text{л}} = I_{1\text{н}}$:

$$I_{1\text{н}} = \frac{P_{2\text{н}}}{\sqrt{3} U_{1\text{н}} \eta_{\text{н}} \cos \varphi_{1\text{н}}}. \quad (4.5)$$

5. Общие вопросы электроснабжения

5.1. Производство, передача и распределение электрической энергии

Энергетическая система (энергосистема) – совокупность установок по выработке, преобразованию, передаче, распределению и потреблению электроэнергии и тепловой энергии, связанных между собой электрическими и тепловыми сетями.

В понятие «энергетическая система» в широком аспекте также может входить совокупность **энергетических ресурсов** разных видов, а также методов и средств их получения (добычи), преобразования, распределения и использования.

В энергетическую систему в общем случае могут входить: котлы, турбины, генераторы, линии электропередачи, трубопроводы для передачи пара и горячей воды, трансформаторы, оборудование подстанций, электроустановки потребителей (электродвигатели, осветительные и нагревательные приборы и др.), потребители теплоэнергии.

Электроэнергетической системой называется совокупность электрической части энергосистемы и питающихся от нее потребителей электрической энергии, объединенных общностью процессов при производстве, передаче, распределении и потреблении электрической энергии.

Электрическая часть энергосистемы (электрическая система) – совокупность электроустановок электрических станций, подстанций и электрических сетей энергосистемы.

В нашей стране создана **Единая энергетическая система России (ЕЭС России)**. ЕЭС России представляет собой совокупность производственных объектов электроэнергетики, связанных единым процессом при производстве, преобразовании и распределении электрической и тепловой энергии, и имеет централизованное диспетчерское управление.

ЕЭС России с помощью межсистемных связей объединяет энергетические системы отдельных регионов, соединяя их линиями электропередачи (ЛЭП).

Системой электроснабжения называется совокупность электроустановок, предназначенная для снабжения потребителей электрической энергией.

Приемниками электроэнергии (электроприемниками) называются аппараты, агрегаты и др., предназначенные для преобразования электроэнергии в другой нужный вид энергии.

Потребителями электрической энергии являются электроприемники или группа электроприемников, которые объединены общим технологическим процессом и размещены на определенной территории.

Основными потребителями электрической энергии являются промышленные и сельскохозяйственные предприятия, транспорт, строительство, объекты коммунального хозяйства городов и поселков.

Электроустановка – совокупность электрических машин, линий электропередачи, аппаратов, а также вспомогательного электрооборудования, включая помещения и сооружения, в которых они установлены, связанные с производством, трансформацией, передачей, распределением электроэнергии, а также с ее приемом и преобразованием в другие виды энергии.

При сооружении, реконструкции или техническом перевооружении электроустановок руководствуются Правилами устройства электроустановок (ПУЭ).

Все электроустановки потребителей энергии характеризуются **номинальным напряжением**. Номинальным напряжением электродвигателей генераторов, трансформаторов, приемников электроэнергии и электрических сетей называется напряжение, предназначенное для нормальной работы потребителей.

Электрические сети и электроустановки потребителей электрической энергии по величине напряжения разделяются на две категории:

- Электроустановки напряжением до 1 кВ;
- Электроустановки напряжением выше 1 кВ.

Такое разделение обусловлено различием в типах и конструкциях электроустановок, а также с различием условий электробезопасности и требований, связанных с сооружением и эксплуатацией электроустановок разных напряжений.

Стандартные напряжения для электрических сетей и электроприемников, принятые в России, приведены в табл. 5.1.

Напряжения электросетей и питания электроприемников в России

Электроустановки до 1 кВ										
Номинальное напряжение (В)	220	380	660							
Наибольшее рабочее напряжение (В)	230	400	690							
Класс напряжения	Низкое напряжение									
Электроустановки свыше 1 кВ										
Номинальное напряжение (кВ)	6	10	20	35	110	220	330	500	750	1150
Наибольшее рабочее напряжение (кВ)	7,2	12	24	40,5	126	252	363	525	787	1200
Класс напряжения	Среднее напряжение			Высокое напряжение			Сверхвысокое напряжение		Ультравысокое напряжение	

Наряду с трехфазным переменным током в ряде отраслей промышленности и на транспорте для питания потребителей используют постоянный ток, получаемый выпрямлением переменного тока (электрифицированный транспорт, электролиз в цветной металлургии и химической промышленности и др.).

Источники и потребители электроэнергии

В электроэнергетической системе электроснабжения объектов можно выделить три вида электроустановок:

- по производству электроэнергии – **электрические станции**;
- по передаче, преобразованию и распределению электроэнергии – **электрические сети и подстанции**;
- по потреблению электроэнергии в производственных и бытовых нуждах – **приемники электроэнергии**.

Источниками электроэнергии называются электротехнические изделия (устройства), преобразующие различные виды неэлектрической энергии (механической, химической, тепловой и др.) в электрическую энергию.

Приемником электрической энергии (электроприемником) называется часть электроустановки, получающая электроэнергию от источника и служащая для преобразования этой энергии в другой вид энергии (механическую, тепловую, химическую, световую энергию) для ее практического использования.

Например, электродвигатели электрическую энергию, получаемую от источника питания, преобразуют в механическую энергию; лампы накаливания, газоразрядные и светодиодные – в световую; аккумуляторы при зарядке электрическую энергию от зарядного устройства – в химическую; электронагреватели – в тепловую и др.

5.2. Электрические сети

Электрическая сеть – это совокупность электроустановок, которые передают и распределяют электрическую энергию. Электрическая сеть включает в себя подстанции, распределительные устройства, соединенные различными линиями электропередачи, которые работают на определенной территории. Электрическая сеть служит для преобразования, распределения и передачи электроэнергии от мест ее производства до мест потребления.

Электрическая **подстанция**, входящая в состав электрической сети, осуществляет прием электроэнергии с ее дальнейшим преобразованием и распределением. В состав любой подстанции входят трансформаторы или иные преобразователи электроэнергии, распределительные устройства,

измерительные устройства, устройства управления и защиты, а также различные вспомогательные устройства.

С помощью **распределительной подстанции (РП)**, поступающая на подстанцию электроэнергия, распределяется по другим связанным сетям или потребителям **без ее трансформации или преобразования**.

Электрические сети характеризуются следующими признаками.

1. **Напряжение электрической сети.** Сети и электроустановки, (см. табл. 5.1) классифицируются как **низковольтные** или **сети низкого напряжения (НН)** с использованием напряжения до 1 кВ, так и **высоковольтные**, или **сети высокого напряжения (ВН)** с напряжением выше 1 кВ.
2. **Вид тока.** По этому признаку сети передают и распределяют электроэнергию постоянного или переменного тока.

Электрические сети **переменного тока** в основном выполняются в системе электроснабжения, использующей **трехфазный переменный (синусоидальный) ток**. Такое электроснабжение является наиболее экономичным, так как при этом достаточно просто происходит повышение или понижение напряжения при передаче электроэнергии на расстояние. Кроме этого, трехфазная система электроснабжения проявляет все свои преимущества при работе трехфазных электрических машин, как генераторов, так и электродвигателей.

Сети маломощных потребителей, квартирные сети имеет, как правило, однофазное исполнение. **Однофазное напряжение** переменного тока поступает к потребителю с помощью распределительного устройства или распределительного щита по двум проводам («фаза» и «ноль»).

Питание **постоянным током** используется в большинстве контактных сетей, в некоторых сетях автономного электроснабжения, а также в сетях сверхвысокого напряжения (750 кВ и выше).

3. Назначение и область применения. По назначению и области применения сети подразделяются на:

- **сети общего назначения** для электроснабжения, промышленных, сельскохозяйственных, строительных, транспортных и бытовых потребителей;
- **сети автономного электроснабжения** для питания различных автономных объектов: транспортных средств, судов, самолётов, космических аппаратов, автономных станций, роботов и др.;
- **сети технологических объектов** для электроснабжения производственных объектов и различных инженерных сетей (водоснабжения и водоотведения, тепловых сетей, газовых сетей);
- **контактные сети** – сети электрического транспорта, служащие для электроснабжения движущихся вдоль сети различных транспортных средств (метро, трамвай, троллейбус, локомотив и др.).

4. Мощность и размеры сетей. Электрические сети классифицируются по величине территории, которую они охватывают, величинам используемого напряжения сети и передаваемой мощности.

Магистральные сети охватывают территории отдельных регионов и стран, и взаимодействуют как с крупными источниками электроэнергии (электростанциями большой мощности), так и со сверхмощными центрами электропотребления. Магистральные сети отличаются высоким и сверхвысоким уровнем напряжения (330, 500, 750 кВ), а также большими перетоками мощности (гигаватты).

Региональные сети – это сети регионального масштаба. Региональные сети получают электроэнергию, как от магистральных сетей, так и от собственных региональных источников питания, обслуживая крупных электропотребителей. Региональные сети характеризуются высоким напряжением (110, 220 кВ) и достаточно большими потоками мощности (сотни мегаватт).

Районные сети – это сети масштаба отдельного района. Районные сети получают питание обычно от региональных сетей. Эти сети, как правило, не имея собственных источников питания, обеспечивают электроснабжение небольших городов и поселков, предприятий с небольшим энергопотреблением, не крупных месторождений, транспортных узлов и др. Районные сети имеют средний уровень напряжения (10-35 кВ) и небольшие потоки мощности (порядка единиц мегаватт).

Внутренние сети обеспечивают распределение электроэнергии в пределах небольшого города, или его квартала, села, фабрики, завода. Как правило, внутренние сети имеют подключение к внешней сети через одну или две точки питания. Для бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей внутренние сети располагают собственным резервным источником питания. Эти сети характеризуются низким и средним уровнем напряжения (до 10-20 кВ) и небольшой мощностью (от сотен киловатт до единиц мегаватт).

Электропроводкой называется электрическая сеть нижнего уровня, которая служит для электроснабжения отдельного здания или помещения, цеха промышленного предприятия и др. и часто входит в состав внутренней сети. Электропроводки характеризуются низким уровнем напряжения (до 1 кВ) и небольшими потоками мощности (до сотен киловатт).

5. Конструктивное выполнение сетей. Линии электросетей могут быть:

- воздушными;
- кабельными;
- токопроводами.

Подстанции электросетей в зависимости от условий эксплуатации бывают **открытыми и закрытыми.**

5.3. Электрические станции

Электрической станцией (электростанцией) называется совокупность электроустановок, электрооборудования и аппаратуры, используемых

непосредственно для производства электрической энергии, а также необходимые для этого сооружения и здания, расположенные на определённой территории.

На электростанциях различные виды энергии (энергия топлива, падающей воды, пара и др.) с помощью электрических машин, называемых **генераторами**, преобразуются в электрическую энергию.

В зависимости от вида используемой первичной энергии существующие электростанции разделяются по типам на тепловые, гидравлические, атомные, ветряные, солнечные и др.

Тепловые электрические станции (ТЭС)

На **тепловой электростанции** процесс выработки электрической энергии связан с преобразованием энергии сгораемого топлива в тепловую энергию водяного пара, который приводит во вращение **турбоагрегат** в виде паровой турбины, соединенной с генератором. В генераторе механическая энергия, поступающая от вращающегося вала турбины, преобразуется в электрическую энергию.

Для электростанций в качестве сгораемого топлива используют природный газ, уголь, торф, нефть, горючие сланцы, мазут и др.

Тепловые электрические станции делятся на:

- теплоэлектроцентрали (ТЭЦ);
- районные (ГРЭС);
- конденсационные (КЭС).

ГРЭС (историческое название — **государственная районная электростанция**) представляет собой крупную **тепловую конденсационную электростанцию**, производящую только электрическую энергию большой мощности (тысячи МВт), и работающую в объединённой энергосистеме совместно с другими крупными электростанциями.

При сгорании угля в нагревательном котле ГРЭС вода, протекающая в трубной системе котла, нагревается до состояния перегретого пара (свыше 500°C), который поступает в паровую турбину.

Поступая в паровую турбину, пар расширяется и снижает давление (меньше атмосферного примерно в 20 раз). При этом потенциальная энергия перегретого и сжатого пара преобразуется в кинетическую энергию вращающейся турбины. Вал турбины передает кинетическую энергию вращающемуся ротору генератора, который, в свою очередь, преобразует ее в электроэнергию, отдаваемую в электрическую сеть или питающую крупного потребителя.

Паровая турбина и электрогенератор в целом составляют **паротурбинную установку (турбоагрегат)**. Избыточное тепло выбрасывается в атмосферу или поступает в близлежащий водоём через конденсационные установки в отличие от теплофикационных электростанций, отдающих избыточное тепло на нужды близлежащих объектов (отопление домов).

Конденсационные электростанции (КЭС) снабжают потребителей только электрической энергией, но по принципу действия соответствуют ГРЭС. КЭС, как правило, располагаются вдали от энергетических ресурсов (угля, торфа, газа и др.) и имеют сравнительно меньшие мощности, чем ГРЭС.

В КЭС и ГРЭС только 30–40% всей энергии, полученной при сгорании топлива, превращается в электроэнергию, а большая часть тепловой энергии безвозвратно выбрасывается отходящими газами через дымовую трубу в атмосферу, а также теряется при теплоотдаче воды в конденсаторе турбины, градирне и в охлаждающем водоеме. Поэтому конденсационные станции вырабатывают электроэнергию с недостаточно высокой эффективностью.

Теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) в отличие от ГРЭС и КЭС снабжают потребителей не только электрической, но и тепловой энергией. ТЭЦ всегда расположены в районе потребления тепловой энергии из-за больших потерь тепла при ее транспортировке по трубопроводам. ТЭЦ используют теплоту

горячей воды, полученную после отработавшего пара в турбинах в промышленном производстве, а также при отоплении, кондиционировании воздуха и горячем водоснабжении жилых и промышленных зданий.

Атомные электростанции (АЭС)

Отличие **атомной электростанции** от паротурбинной станции заключается в том, что на АЭС в качестве источника тепловой энергии используется тепловая энергия, полученная при ядерных реакциях радиоактивных материалов: урана, плутония, тория.

АЭС сооружаются практически в любом месте, поскольку их эксплуатация не зависит от места расположения запасов топлива. При работе АЭС окружающая среда не загрязняется дымом, пылью, золой, сернистым газом, как при работе тепловых станций.

Гидроэлектростанции (ГЭС)

Гидроэлектростанции (ГЭС) представляют собой электростанции с плотинами и водохранилищами, расположенные на равнинных и горных реках. При работе ГЭС источником энергии является кинетическая энергия движущейся массы воды.

На ГЭС кинетическая энергия воды, полученная из ее потенциальной энергии, запасенной в водохранилище, вначале преобразуется в механическую энергию при вращении гидравлической турбины, а затем в соединенном с турбиной генераторе – в электрическую энергию.

Достаточно высокий КПД при низкой себестоимости выработанной электроэнергии являются достоинствами гидроэлектростанций

Однако проектирование и возведение крупной ГЭС связано с длительным сроком ее сооружения и большими капитальными затратами, что определяет большой срок окупаемости (десятки лет).

Автономные источники электроэнергии

Альтернативой крупным сетевым ТЭС в последнее время стали **когенерационные установки** малой мощности, так называемые **мини**

теплоэлектростанции (мини-ТЭС), которые, являясь **автономными источниками электроэнергии,** способны обеспечить, как и крупные ТЭЦ, электрической и тепловой энергией отдельные здания, сооружения или небольшие предприятия.

Главным преимуществом когенерационной технологии на базе мини-ТЭС (мини-ТЭЦ) является более высокая **энергоэффективность** и значительная экономия топлива по сравнению с использованием отдельных тепло- и электрогенерирующих установок малой мощности.

Приближенность источников тепло- и электроэнергии на базе мини-ТЭС к потребителям позволяет сократить протяженность сетей, уменьшить потери при транспортировке энергии и улучшить ее качество, повысить долю полезного использования энергии природного газа.

5.4 Качество электроэнергии

Качеством электрической энергии (КЭ) называется соответствие основных параметров и характеристик электроэнергии в энергосистеме установленным нормам при ее производстве, передаче и распределении. Выход показателей качества электроэнергии за установленные пределы приводит к следующим негативным последствиям:

- увеличению расхода и потерь электроэнергии в системах электроснабжения;
- снижению надёжности работы электроустановок и электрооборудования и к их неисправностям;
- нарушению технологических производственных процессов;
- снижению или временному прекращению объёмов выпуска продукции.

Показатели качества электроэнергии определены в ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

6. Передача и преобразование электрической энергии. Общие схемы электроснабжения населенных пунктов

6.1. Преобразовательные и распределительные подстанции

Главная схема электрических соединений, относящаяся к электростанции (подстанции), представляет собой совокупность условных обозначений различного электрооборудования (генераторов, трансформаторов, линий электропередачи), коммутационных, защитных, измерительных и других устройств со всеми необходимыми электрическими соединениями между ними.

Для наглядного и простого изображения электрических станций и подстанций обычно используют **однолинейные схемы**, которые показывают соединение электрических частей, относящихся к **одной фазе**.

Графическое изображение систем электроснабжения, а также их отдельные части и элементы с электрическими соединениями между ними выполняют, используя принятые условные обозначения. На рис. 6.1 приведены условные обозначения элементов системы электроснабжения для однолинейных схем.

<i>Машина переменного тока (генератор)</i>	
<i>Трансформатор силовой двухобмоточный</i>	
<i>Трансформатор силовой трехобмоточный</i>	
<i>Автотрансформатор</i>	
<i>Дугогасительный реактор</i>	
<i>Выключатель</i>	
<i>Проводник (линия электропередачи)</i>	
<i>Кабельная линия</i>	
<i>Нагрузка</i>	

Рис. 6.1 Условные обозначения элементов однолинейной схемы электроснабжения

На чертежах схемы в основном изображаются в однолинейном виде при отключенном состоянии всех элементов установки. Иногда отдельные элементы схемы изображают в рабочем (включенном) положении.

Элементы схемы и электрические соединения между ними изображаются в соответствии с Единой системой конструкторской документации (ЕСКД). Условные графические обозначения основных элементов схем выполняют согласно ГОСТ 2.710–81 Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах.

Основные сведения о подстанциях и распределительных устройствах

Ниже приведены определения электротехнических устройств, входящих в системы электроснабжения, согласно ГОСТ 24291-90 Электрическая часть электростанции и электрической сети. Термины и определения.

Электрической подстанцией называется электроустановка, обеспечивающая прием, преобразование и распределение электрической энергии, которая включает в свой состав трансформаторы или другие преобразователи электрической энергии, а также устройства управления, распределительные и вспомогательные устройства.

Распределительным устройством (РУ) называется электроустановка без трансформаторов, обеспечивающая приём и распределение электрической энергии одного класса напряжения с неизменной частотой.

Распределительное устройство содержит набор коммутационных аппаратов, устройства релейной защиты и автоматики, средства учёта электроэнергии и измерения основных электрических параметров.

По конструктивному исполнению **распределительные устройства (РУ)** делятся на **открытые** и **закрытые**.

Распределительные устройства бывают **комплектными**, когда их сборка производится на предприятии-изготовителе, а также **сборными**, когда сборка полностью или частично проводится на месте установки РУ.

Комплектным распределительным устройством (КРУ) называется распределительное устройство, в комплект которого входят металлические шкафы, закрытые частично или полностью, блоки со встроенными электрическими аппаратами, устройства автоматики и защиты, измерительные приборы и вспомогательные устройства, поставляемые в заранее собранном комплекте или в предварительно подготовленном для сборки виде и предназначенные для установки на месте.

Комплектным распределительным устройством наружной установки (КРУН) называется КРУ, предназначенное для установки вне помещения на открытом воздухе.

Распределительным пунктом (РП) в системе электроснабжения называется распределительное устройство, которое, не входя в состав подстанции, обеспечивает прием и распределение электрической энергии при одном напряжении без трансформации и преобразования.

По назначению подстанции делятся на:

- трансформаторные подстанции (ТП);
- преобразовательные подстанции;
- выпрямительные подстанции;
- инверторные подстанции;
- вставки постоянного тока;
- тяговые подстанции.

Трансформаторной подстанцией (ТП) называется электрическая подстанция, обеспечивающая преобразование электроэнергии одной величины напряжения в другую величину напряжения той же частоты с помощью трансформаторов.

Комплектной трансформаторной подстанцией (КТП) называется подстанция, имеющая трансформаторы и блоки КРУ или КРУН, и поставляемая в собранном комплекте, готовым к работе, или в виде, подготовленном для сборки КТП на месте установки.

Трансформаторные подстанции имеют следующие основные части:

- распределительные устройства (РУ) высшего напряжения (ВН);
- трансформаторы;
- РУ низшего напряжения (НН).

Трансформаторные подстанции являются основной частью всей системы электроснабжения.

В зависимости от своего положения в системе электроснабжения, назначения ТП, величин первичного и вторичного напряжений трансформаторные подстанции делятся на:

- районные трансформаторные подстанции;
- подстанции промышленных предприятий;
- подстанции городской электрической сети;
- тяговые подстанции и др.

Снабжение электроэнергией **районных и узловых подстанций** происходит от межрайонных сетей, входящих в энергетическую систему. Эти подстанции предназначены для электроснабжения крупных районов, в которых расположены городские, промышленные, сельскохозяйственные и другие электропотребители.

Величины первичных напряжений на районных подстанциях составляют 110, 150, 220, 330, 500, 750 кВ, а величины вторичных напряжений – 6, 10, 20, 35, 110, 150, 220 кВ.

Трансформаторные подстанции для промышленных предприятий бывают следующих видов:

1. **Главные понизительные подстанции (ГПП)**, имеющие открытые распределительные устройства (ОРУ), предназначенные для осуществления приема электроэнергии от районных систем электроснабжения напряжением 35 – 220 кВ и преобразования ее в напряжение сети промышленного предприятия 6 – 10 кВ, которая в

свою очередь питает цеховые и межцеховые подстанции и мощные потребители.

2. **Трансформаторные подстанции**, а также **распределительные пункты** с закрытыми РУ или КРУ, с установленным на них высоковольтным оборудованием напряжением 6 – 10 кВ и трансформаторов на напряжение 6 – 10/0,4 кВ.
3. **Цеховые трансформаторные подстанции**, служащие для электроснабжения цехов.

6.2 Электроснабжение населенных пунктов

Электрические сети, обеспечивающие электроснабжение промышленных предприятий и городов, – это в основном сети на напряжение выше 1 кВ. В их состав входят подстанции, линии электропередачи, токопроводы, аппаратура присоединения, защиты и управления.

Для электроснабжения потребителей используются **радиальные** и **магистральные** схемы электрических сетей, выбор которых зависит от территориального размещения и от величины нагрузок, и определяется требованиями к надежности электроснабжения, количеством источников питания, характеристиками потребителей, в том числе, резкопеременным графиком нагрузки потребителей, необходимым отделением осветительной нагрузки от силовой и др.

Радиальная схема электрической сети передает электроэнергию от источников питания к электроприемникам (потребителям) без ответвлений к другим потребителям (рис. 6.2). Такая схема использует большое число электрических аппаратов и линий (чаще кабельных) и служит для электроснабжения крупных и ответственных потребителей.

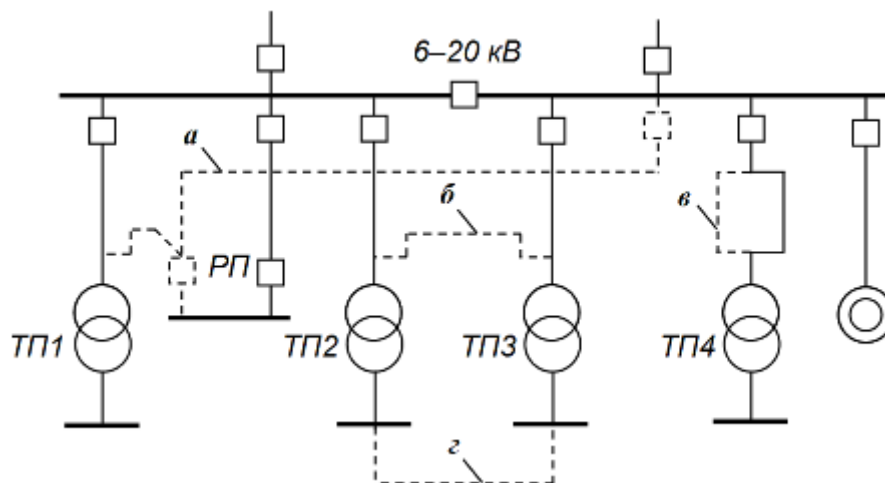


Рис. 6.2 Схемы радиального электроснабжения: *а* – резервная магистраль высокого напряжения; *б* – резервная связь между ТП на стороне высшего напряжения; *в* – резервная линия высокого напряжения; *г* – резервная связь на стороне низкого напряжения между ТП или токопроводами

Магистральная схема электрической сети выполнена в виде линии электропередачи, которая поочередно питает подстанции и распределительные пункты с помощью кабелей или в виде воздушной линии электропередачи с ответвлениями к отдельным подстанциям.

Магистральные схемы применяются, если существует упорядоченное расположение подстанций на территории района или предприятия, когда необходимо зарезервировать подстанцию от другого источника, а также когда спроектированная магистральная схема будет иметь технико-экономическое преимущество по сравнению с другими схемами.

Преимущества магистральной схемы:

- при нормальном режиме магистральной схемы лучшая загрузка кабелей;
- магистральная схема использует меньшее количество шкафов от источников питания, поскольку к ней присоединяются несколько ТП, через одну магистральную линию (рис. 6.3);
- при аварии на питающем пункте резервирование цеховых ТП или РП от других источников питания имеет более простые и надежные способы выполнения.

На рис. 6.3 приведена одиночная магистральная схема. Электроснабжение по этой схеме, хотя и уменьшает число высоковольтных устройств и сокращает расход кабелей, но обеспечивает пониженную надежность.

К магистрали по одиночной схеме обычно присоединяют 2 - 3 трансформатора мощностью 1000 – 2500 кВА каждый или 4 - 5 трансформаторов мощностью 250 – 630 кВА.

Такую схему одиночной магистрали без дополнительного резервирования обычно применяют для электроснабжения неответственных потребителей 3-й категории надежности (см. разд. 7.6).

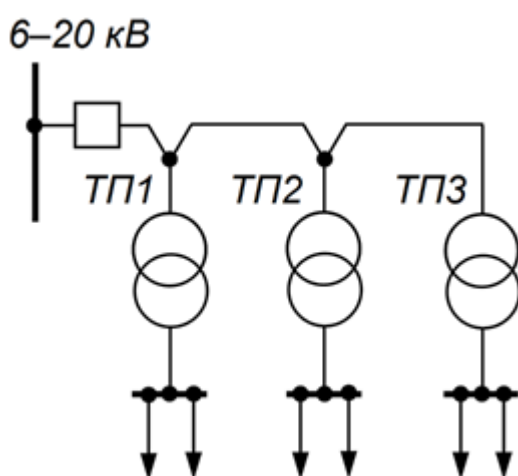


Рис. 6.3 Одиночная магистральная схема

Схема двойных сквозных магистралей (рис. 6.4), сохраняя вышеперечисленные преимущества магистральной схемы, обеспечивает питание с высокой надежностью от двух независимых источников.

Такая схема обеспечивает питание от другой магистрали при повреждении одной из магистралей за счет автоматического или ручного подключения потребителей к секции шин низшего напряжения оставшегося в работе трансформатора. Эта схема позволяет надежно снабжать электроэнергией потребителей любой категории надежности.

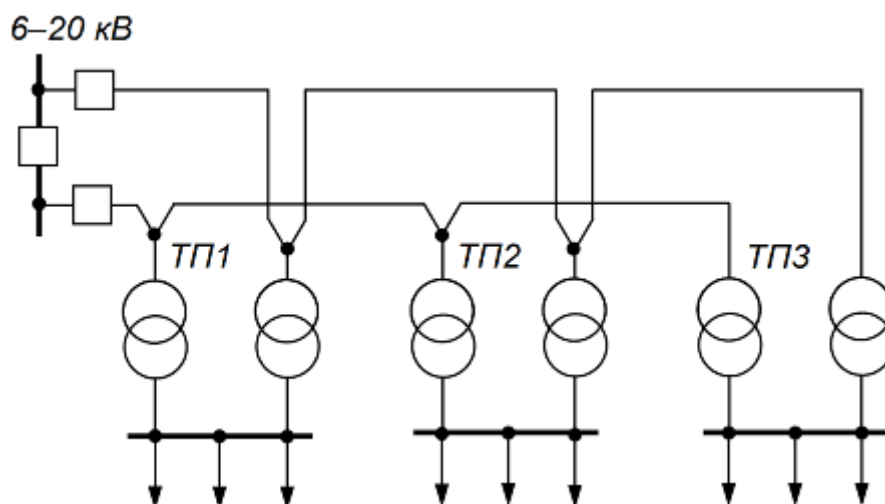


Рис. 6.4 Схема с двойной сквозной магистралью

На рис. 6.5 приведена магистральная схема с резервной перемычкой. В рабочем режиме этой схемы выключатели $Q1$ и $Q2$ включены при отключенном разъединителе QS . Для контроля технического состояния изоляции кабеля резервная перемычка находится под напряжением. В случае аварии происходит отключение выключателя $Q1$ и отсоединение поврежденного участка, с дальнейшим включением разъединителя QS и выключателя $Q2$. В зависимости от места нахождения поврежденного участка в сети происходит включение выключателя $Q2$ или одновременное включение $Q2$ и $Q1$. Такая схема обеспечивает электроснабжение потребителей 2-й и 3-й категорий надежности.

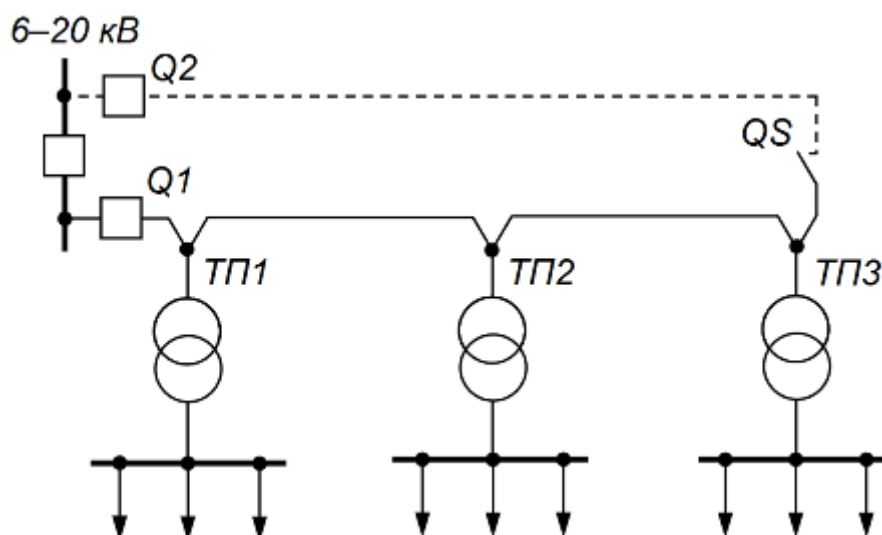


Рис. 6.5 Магистральная схема с резервной перемычкой

Магистральная схема с двухсторонним питанием, показанная на рис. 6.6 применяется, когда необходимо обеспечить электроснабжение потребителей от

двух высоковольтных источников, например, когда цеховая ТП расположена между двумя источниками питания. Такая схема обеспечивает надежность и экономическое преимущество электроснабжения.

В нормальном рабочем режиме выключатель QF разделяет магистраль на две одиночные рабочие части. Такое разъединение магистрали обеспечивает следующие преимущества:

- повышенная надежность электроснабжения;
- уменьшение токов короткого замыкания;
- упрощенная релейная защита;
- облегчение режима эксплуатации.

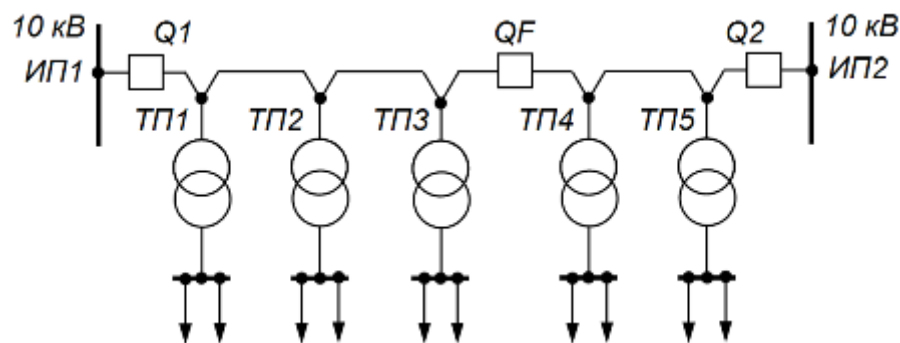


Рис. 6.6 Магистральная схема с двухсторонним питанием

Глубокий ввод — это система электроснабжения потребителей на территории города или промышленного предприятия от электрической сети высокого напряжения (35 — 220 кВ), при которой питающая сеть приближена к установкам потребителей.

Глубокий ввод уменьшает число ступеней трансформации электроэнергии от источника к приемнику и снижает потери энергии.

Электроснабжение городов

Как правило, малые и средние города обеспечиваются электроэнергией от энергосистем, которые по отношению к ним являются внешними источниками.

При этом снабжение электроэнергией районных или городских понижающих подстанций от внешних источников происходит с помощью

электрических сетей напряжением 35 – 500 кВ. К такой сети также присоединяются электростанции, расположенные на территории города.

Главные понижающие подстанции с распределительными устройствами напряжением 6/10 кВ называются **центрами питания (ЦП)** в системе электроснабжения города.

Городская распределительная сеть образована электрическими сетями напряжением 6/10 кВ и 0,4/0,23 кВ, расположенными между центрами питания и вводами в промышленные предприятия и в жилые дома.

Питающая сеть системы электроснабжения города, которая должна обеспечивать электроэнергией приемники любой категории надежности, как правило, имеет устройства **автоматического ввода резерва (АВР)**.

Сеть обычно имеет **радиальную схему** электроснабжения, с помощью которой центры питания связаны отдельно или параллельно работающими линиями с распределительными пунктами.

На рис. 6.7 изображена **структурная схема электроснабжения города**. С помощью трехфазных синхронных генераторов, установленных на ГРЭС вырабатывается электроэнергия напряжением 6/10 кВ. Величина такого напряжения на выходе генераторов явно недостаточна для передачи электроэнергии на большие расстояния (более 4 – 5 км). Поэтому, чтобы уменьшить потери мощности в линиях электроэнергия передается на большое расстояние при высоком напряжении по **воздушным линиям (ВЛ)**. Высокое напряжение обеспечивается размещенными на электростанциях **повышающими силовыми трансформаторами (Тр1)**, величина которого устанавливается из стандартного ряда напряжений: 35, 110, 150, 220, 330, 500, 750 кВ.

Городские электрические **понижающие подстанции** снижают величину высокого напряжения, поступающего от воздушной линии с помощью **понижающих трансформаторов (Тр2)** до стандартных величин 6, 10, 20 кВ. На **главной понижающей подстанции (ГПП-1)** обычно имеется открытая

часть напряжением 110/220 кВ и часть с **закрытым распределительным устройством (ЗРУ)** напряжением 6/10 кВ. Главную понижающую подстанцию часто называют **центром питания (ЦП)**.

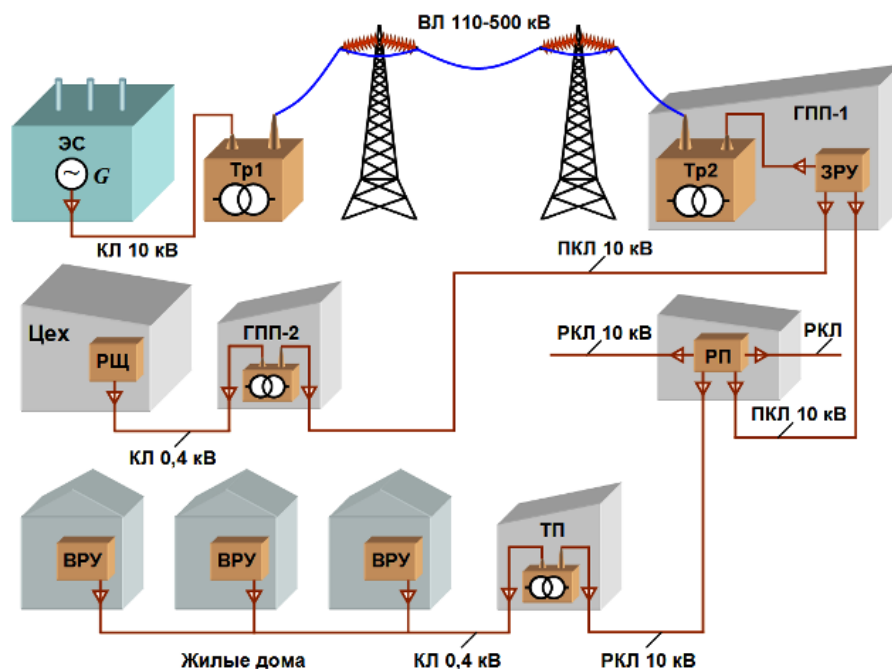


Рис. 6.7 Структурная схема электроснабжения города: ЭС – районная электростанция; G – трехфазный синхронный генератор; Tr1 – повышающий трансформатор при ЭС; ВЛ – воздушная линия электропередачи напряжением 110 – 550 кВ; ГПП – 1 – главная понижающая подстанция города; Tr2 – понижающий трансформатор при ГПП – 1; ЗРУ – закрытое распределительное устройство при ГПП – 1; ПКЛ – питающая кабельная линия с напряжением 10 кВ; ГПП – 2 – главная понижающая подстанция завода 10/0,4 кВ; РЩ – распределительный щит в цехе завода; РП – распределительный пункт с напряжением 10 кВ; РКЛ – распределительная кабельная линия напряжением 10 кВ; ТП – трансформаторная подстанция 10/0,4 кВ; КЛ – кабельная линия с напряжением 0,4 кВ; ВРУ – вводно-распределительные устройства в жилых домах

Центр питания (ЦП) является распределительным устройством генераторного напряжения на электростанции или распределительным устройством вторичного напряжения, которое совместно с устройством регулирования напряжения установлено на понижающей подстанции. К центру питания обычно присоединены районные электрические сети.

Строительство понижающих подстанций обходится дешевле при установке не закрытых, а открытых распределительных устройств (ОРУ) напряжением 6, 10, 20 кВ, расположенных на территории подстанции. Обычно ОРУ представляет собой комплектное распределительное устройство наружной установки (КРУН) в виде группы металлических шкафов. Силовые

трансформаторы, как правило, размещают на открытой части понижающей подстанции.

Понижающие подстанции передают электроэнергию потребителям от РУ напряжением 6, 10, 20 кВ по кабельным или воздушным линиям. Как правило, в городской черте передача происходит по кабельным линиям, проложенным от подстанций в коллекторах или кабельных туннелях. Воздушные линии электропередачи на территории городов обычно не устанавливают, поскольку они мешают движению городского транспорта и препятствуют городской застройке, а также представляю большую опасность в случае обрыва проводов с высоким напряжением.

Как видно из рис. 6.7, **кабельные линии от главной понижающей подстанции (ГПП – 1) проложены к главной понижающей подстанции завода (ГПП – 2) и к распределительному пункту (РП).** Эти линии, не имеющие распределения электроэнергии по ее длине, называются **питающими кабельными линиями (ПКЛ).**

Распределительный пункт является распределительным устройством 6 – 20 кВ, предназначенным для приема электроэнергии с помощью питающих линий, отходящих от ГПП или ЦП с последующей передачей электроэнергии в распределительную сеть. Сам распределительный пункт состоит из сборных и соединительных шин, коммутационных аппаратов, устройств защиты, устройств автоматики и телемеханики, а также включает в свой состав различные измерительные приборы и другие вспомогательные устройства.

Распределительный пункт обслуживает трансформаторные подстанции ТП с помощью **распределительных кабельных линий (РКЛ),** отходящих от РП по разным направлениям (см. рис. 6.7).

Распределительный пункт иногда совмещают с трансформаторной подстанцией, которая питает рядом расположенных потребителей.

В районной городской трансформаторной подстанции (ТП) электроэнергия понижается с напряжения 6, 10, 20 кВ до низкого напряжения (в

общем случае до 1 кВ) и при этом напряжении доходит до потребителей. В состав ТП входят силовые трансформаторы, высоковольтные распределительные устройства на 6, 10, 20 кВ, низковольтные РУ (напряжением до 1 кВ), устройства управления, защиты и другие вспомогательные устройства.

Трансформаторная подстанция может быть выполнена в виде комплектной трансформаторной подстанции (КТП), в состав которой входят собственно трансформаторы, распределительное вводное устройство 6, 10, 20 кВ, распределительное устройство 0,4 кВ с токопроводами и другие устройства, которые поставляется в полностью собранном комплекте или в подготовленном для сбора виде. Открытой трансформаторной подстанцией является **столбовая** или **мачтовая подстанция (МТП),** у которой оборудование устанавливается высоко на опорах линий или специальных высоких конструкциях.

От трансформаторных подстанций к потребителям отходят воздушные или кабельные линии с напряжением до 1 кВ через **вводно-распределительные устройства (ВРУ),** иногда называемые **вводами** или **распределительные щиты (РЩ),** находящиеся в зданиях потребителей (в отдельных помещениях или в подвалах).

От распределительных щитов или вводов в домах прокладываются **магистраль (стояки),** с отходящими от них линиями **распределительной сети** к квартирным щиткам и далее к квартирным электропроводкам розеточной и осветительной сети.

Питающие кабельные линии, отходящие от ЦП (ГПП – 1), прокладываются к РП, где нет трансформаторов, а также к главным понижающим подстанциям заводов (ГПП – 2), как показано на рис. 6.7. В этом случае электроэнергия поступает по распределительным кабельным линиям (РКЛ) и преобразуется силовыми трансформаторами в электроэнергию напряжением до 1 кВ. На ГПП – 2 завода размещают силовые трансформаторы,

а в цехах распределительные щиты (РЩ) напряжением до 1 кВ. Электроснабжение цеховых электроприемников обеспечивается шинопроводами или проводами, либо непосредственно кабельными линиями.

7. Электрические сети современных зданий и сооружений

7.1. Электрооборудование современных зданий и сооружений

Электроприемники жилых зданий

Электроприемники в жилых зданиях подразделяются на две группы:

- электроприемники общедомового назначения;
- электроприемники квартир.

К электроприемникам общедомового назначения относится различное силовое электрооборудование, включая лифты, вентиляционные системы, противопожарные устройства, домофоны и др., и осветительные приборы, в том числе, светильники технических подполий, лестничных клеток, вестибюлей, чердаков, холлов, служебных помещений и др. Для освещения коридоров, лестниц, холлов, вестибюлей общего пользования применяют компактные люминесцентные лампы и светодиодные светильники.

В электроприводе лифтовых установок используются трехфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутой обмоткой ротора.

В высотных зданиях используются современные скоростные лифтовые установки со специальным электроприводом, куда входят электромагнитный тормоз, полупроводниковый преобразователь напряжения и частоты и аппаратура управления на базе микропроцессорной техники.

Кроме того, силовыми электроприемниками являются электродвигатели насосов и вентиляторов, различные электромагнитные механизмы, служащие для открывания люков и клапанов в системах дымоудаления жилых зданий высотой больше девяти этажей, аппаратура связи и сигнализации и др.

Электроприемниками квартир являются осветительные приборы и различные электробытовые приборы. Для освещения квартир используются светильники с лампами накаливания, энергосберегающими люминесцентными и светодиодными лампами.

Бытовые электроприборы по назначению делятся на:

- нагревательные: электрические плиты, электрорадиаторы, калориферы, тепловентиляторы, электроутюги, электроплитки, электрогрили, тостеры, электрические одеяла, теплые полы и др.
- хозяйственные: холодильники, морозильники, стиральные машины, посудомоечные машины, микроволновые печи, надплиточные воздухоочистители, пылесосы, швейные машины, кофемолки, миксеры, блендеры и др.;
- санитарно-гигиенические: электробритвы, машинки для стрижки волос, электромассажеры, электрические зубные щетки и др.;
- приборы микроклимата: бытовые кондиционеры воздуха, вентиляторы, увлажнители и ионизаторы воздуха и др.;
- водонагреватели: электрические чайники, электрические проточные и накопительные водонагреватели и др.;
- ручной электроинструмент: электродрели, электрорубанки, электролобзики, угловые шлифовальные машины (болгарки), дисковые электропилы, шуруповерты, электрические отвертки и др.

7.2. Провода, кабели, шинопроводы

Электропроводки проводами и кабелями

Электропроводкой называют сеть переменного и постоянного тока с напряжением до 1 кВ, выполненную с помощью изолированных проводов или с использованием небронированного кабеля с небольшим общим сечением проводников (до 16 мм²) в резиновой или пластмассовой изоляции. Электропроводку прокладывают внутри помещений зданий и сооружений, а иногда – вдоль наружных стен зданий.

Все электропроводки, выполненные внутри помещений, подразделяются на открытые и скрытые.

Открытая электропроводка прокладывается по поверхности стен или потолков помещений, а также по конструкциям сооружений внутри здания и, в зависимости от условий эксплуатации, может иметь различное конструктивное исполнение.

Основным способом выполнения открытой электропроводки в зданиях промышленных предприятий является прокладка в коробах, в специальных лотках, в трубах, а также прокладка на тросах.

Все виды и способы выполнения электропроводок связаны с выполнением требования по надежности и безопасной эксплуатации.

Наружная открытая электропроводка прокладывается вдоль наружных стен зданий и сооружений изолированными проводами на изоляторах и в трубах, под специальными навесами, а также между отдельными зданиями на опорах с помощью проводов и кабелей небольших сечений, обычно из одножильных проводников.

Шинопроводы

Жесткий токопровод напряжением до 1 кВ, поставляемый в виде комплектных секций заводского изготовления, называется **шинопроводом**.

Магистральные и распределительные шинопроводы применяют, как питающие магистральные линии и распределительные сети, в цехах предприятий, где электроустановки расположены упорядоченно по всей площади рядами, а иногда должны согласованно перемещаться из-за технологических требований производственного процесса.

Основные достоинства шинопроводов заключаются:

- в экономии цветных металлов в распределительной и магистральной сетях;
- в технологичности монтажа с малыми затратами времени;
- в эксплуатационной надежности;

- в простоте и удобстве осмотра при эксплуатации и ремонте.

Классификация шинопроводов

Шинопроводы по конструктивному исполнению делятся на **открытые, защищенные и закрытые.**

Открытые шинопроводы используют в магистральных сетях в помещениях с нормальной окружающей средой.

Открытые крановые троллеи и шинные магистрали также относятся к шинопроводам открытого типа.

Открытые шинопроводы изготавливают в виде медных или алюминиевых шин, проложенных с помощью изолированных лотков, прикрепленных к стенам, фермам и колоннам помещения цеха. Открытые шинопроводы должны быть закрыты металлическими сетками или ограждающими коробами в местах возможного прикосновения к токоведущим частям.

Магистральные шинопроводы предназначены для питания распределительных шинопроводов и пунктов, отдельных крупных электроприемников.

Магистральные шинопроводы изготавливаются для прохождения по ним больших токов (1600 – 5000 А) и часто проектируются с ответвлениями для питания распределенных потребителей (по два ответвления на каждые 6 м длины магистрали).

Распределительные шинопроводы прокладываются при прохождении токов до 630 А с большим числом ответвлений к различным электроприемникам.

7.3. Коммутационные и защитные аппараты

Защита от токов короткого замыкания (КЗ) и токов перегрузки

Защитная аппаратура для сетей напряжением до 1 кВ

Главными функциями аппаратов управления и защиты являются:

- включение и отключение электроустановок и сетей;

- защита электроустановок от перегрузок и токов КЗ;
- регулирование числа оборотов электродвигателей;
- электрическое торможение электродвигателей.

В состав пуско-регулирующей и защитной аппаратуры входят:

- плавкие предохранители;
- кнопки управления;
- концевые и путевые выключатели;
- контакторы;
- магнитные пускатели;
- автоматические выключатели.

Плавкие предохранители (предохранители с плавкими вставками) используются для защиты электроустановок от токов КЗ.

В предохранителе основным элементом является **плавкая вставка**, выполненная из легкоплавкого материала на основе цинка в виде штампованной тонкой полоски с сужениями. При значительном повышении тока в цепи с предохранителем его плавкая вставка в месте сужения быстро нагревается, плавится и сгорает в течение короткого промежутка времени (несколько миллисекунд). Когда плавкая вставка расплавляется, то происходит размыкание электрической цепи и обесточивание потребителя. Тем самым, обеспечивается сохранность и работоспособность дорогостоящей электроустановки, а также предотвращение возможного возгорания, вызванного токами КЗ.

Кнопка управления — электрический аппарат для включения (отключения) электрических цепей управления, сигнализации, электроблокировки, а также для ручного дистанционного включения электромагнитных приборов (пускателей, контакторов, реле и др.).

Одноцепные кнопки управления имеют или замыкающие контакты (кнопка «пуск») или размыкающие контакты (кнопка «стоп»). **Двухцепные кнопки управления** имеют обе пары замыкающих и размыкающих контактов

с единым приводом подвижных контактов. Особенность кнопок управления заключается в их способности при помощи возвратных пружин вернуться в первоначальное состояние (самовозврат кнопки) после снятия механического воздействия (прекращения нажатия на кнопку).

Концевой (путевой) выключатель - это электрический коммутационный аппарат, обеспечивающий отключение или переключение в цепи управления электропривода машин и механизмов или их отдельных частей в определённых точках движения. Концевой (путевой) выключатель обычно приводится в действие в конце движения, либо в заданной точке пути следования перемещающимся механизмом. Например, в подъёмно-транспортной машине при подходе к конечным точкам пути происходит срабатывание концевого выключателя и отключение приводного электродвигателя с одновременным включением тормозного устройства, что предохраняет машину от возможной аварии. Концевые выключатели бывают бесконтактными и контактными.

Контактор представляет собой электрический аппарат электромагнитного действия для дистанционного включения и выключения силовых электрических цепей и управления электромашинами и аппаратами. Применяется в системах контактного управления электродвигателями, нагревательными элементами, а также в системах электрического освещения и автоматизации.

Магнитным пускателем называется электромагнитный аппарат для местного или дистанционного управления работой электродвигателей: осуществление пуска, остановки, изменения направления вращения (реверс), а также включения и выключения других электроустановок с их одновременной защитой от возможных перегрузок и токов КЗ.

Автоматическим выключателем (автоматом) называется коммутационный электрический аппарат, предназначенный для включения, проведения тока в нормальном режиме работы цепи и для автоматического защитного отключения цепи в аварийных режимах, при возникновении токов

короткого замыкания, токов перегрузки, при снижении или исчезновении напряжения, при изменении направления тока, при возникновении сильного магнитного поля от мощных генераторов в аварийных условиях и др.

Тепловое реле, входя в состав магнитного пускателя, обеспечивает защиту электродвигателей от возможных перегрузок и предохраняет их от токов КЗ. Действие теплового реле связано с изгибанием биметаллической пластинки, которое происходит при ее нагревании за счет тока перегрузки.

7.4. Системы защитного заземления электрических сетей современных зданий

Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) обеспечение защиты человека с помощью средств и методов современной системы электробезопасности предусматривается в следующих случаях:

- при **прямом прикосновении**, т. е. электрическом контакте с токоведущими частями электроустановки, находящимися под напряжением;
- при **косвенном прикосновении**, т. е. когда человек прикасается к открытым проводящим частям электроустановки, которые при нормальной работе не находятся под напряжением, а при повреждении изоляции в токоведущих частях, проводящие части могут оказаться под напряжением (см. рис. 7.1).

Предельно допустимые величины переменного тока I_h частотой 50 Гц, проходящего через тело человека, связаны со временем соприкосновения t в аварийном режиме бытовых электроустановок и не должны превышать значений, приведенных в табл. 7.1.

Таблица 7.1.

Предельно допустимые значения тока I_h

t, c	<0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	>1,0
I_h, mA	220	200	100	70	55	50	40	35	30	27	25	2

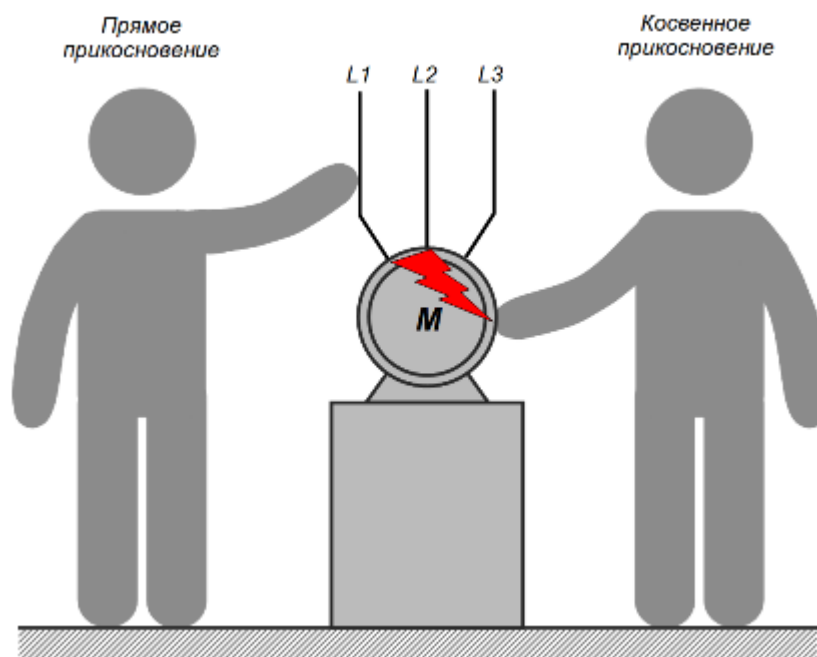


Рис. 7.1 Прямое и косвенное прикосновения

Внимание! Чтобы избежать поражения от электрического тока нужно знать главное правило: в электроустановке не должны быть доступны при прямом прикосновении ее основные токоведущие части и не должны быть потенциально опасными ее проводящие части как при нормальной работе установки, так и при возникшей неисправности.

Основные требования к электробезопасности, связанные с различными защитными мерами, во многом зависят от выбора системы заземления и связанных с этим выбором условий, предохраняющих человека при возникающих неисправностях в работе электроустановки.

В системах электроснабжения в основном используются трехфазные сети и электроустановки с изолированной нейтралью при напряжениях 6/10 кВ и с глухозаземленной нейтралью при напряжениях 0,4 кВ.

Глухозаземленной нейтралью называется нейтраль трехфазного генератора или трансформатора (общая точка соединенных в звезду фазных обмоток), которая соединена непосредственно с заземляющим устройством или через малое электрическое сопротивление.

Глухозаземленная нейтраль предотвращает опасность перехода высокого напряжения (ВН) на сторону низкого напряжения (НН), который

может возникнуть при повреждении изоляции обмоток силового понижающего трансформатора или при аварийном обрыве и падении провода ВН и его контакте с проводом НН. Глухозаземленная нейтраль в случае возникшей аварии также препятствует повышению напряжения в низковольтной сети выше номинальных значений (220/380 В), тем самым предотвращая выход из строя осветительных приборов и других электроустановок, подключенных к этой сети.

Изолированной нейтралью, согласно ПУЭ, называется нейтраль генератора или трансформатора, которая не присоединена к заземляющему устройству или присоединена к нему через большое электрическое сопротивление приборов измерения, сигнализации, защиты и других аналогичных устройств.

Для обеспечения безопасности при аварийных однофазных замыканиях **в сетях напряжением 6/10 кВ с изолированной нейтралью** в основном используется **защитное заземление**. Основная защитная мера в таких сетях связана с **устройством защитного заземления**, обеспечивающим электрическое соединение электропроводных частей электроустановки с землей, которые в случае повреждения изоляции проводов самой электроустановки или питающей сети могут оказаться под напряжением. Защитное заземление выполняется металлическими электропроводными предметами (трубами, стержнями, уголками, полосами), размещенными в земле. Это заземление обеспечивают надежное электрическое соединение между землей и электропроводными частями установки, например, ее металлическим корпусом. Сами заземляющие предметы называются **заземлителями**, а их электрическое соединение с заземляемой частью электроустановки обеспечивается **заземляющими защитными проводниками**. **Заземляющим устройством** называется совместное конструктивное устройство заземляющих проводников и заземлителей.

Важными защитными мерами, обеспечивающими электробезопасность, являются использование технических систем **уравнивания потенциалов** и **выравнивания потенциалов**.

Уравнивание потенциалов, согласно ПУЭ, происходит при общем электрическом соединении проводящих частей установки или при соединении между проводящими частями разных электроустановок для обеспечения равенства их потенциалов.

Система **выравнивания потенциалов** связана со снижением разности потенциалов на поверхности земли (уменьшением шагового напряжения) или напольного покрытия с помощью защитных проводников, прокладываемых в земле, в полу или на их поверхностях и присоединенных к устройству заземления, а также применением специальных электропроводных покрытий (полы с металлическим покрытием).

Защитное уравнивание и выравнивание потенциалов применяется совместно с системами зануления, заземления, и другими защитными мерами.

Заземлитель, служащий для выравнивания потенциалов, выполнен в виде вертикальных металлических (стальных) стержней, соединенных между собой горизонтальными электропроводными (железными) полосами. С уменьшением расстояния между соседними стержнями заземлителя становится ниже напряжение шага $U_{\text{ш}}$ и напряжение прикосновения $U_{\text{пр}}$ на поверхности земли или покрытия при однофазных коротких замыканиях.

Обеспечение безаварийной и безопасной работы электроустановок связано не только со средствами защиты, но и с мерами защиты, которые организуют безопасную эксплуатацию установок, и предотвращают возникновение аварийных ситуаций при возможных ошибочных действиях обслуживающего персонала (так называемая «защита от дураков»).

Проводящие и токоведущие части электроустановок, крепления, изоляторы, ограждения, несущие конструкции, и другие части электрооборудования должны быть изготовлены и установлены так, чтобы в

нормальных режимах работы электроустановок происходящие в них механические усилия, нагрев, возникновение электрических разрядов и дуг и других сопутствующих явлениях при работе установок не могли вызвать их повреждение и возникновение внутренних коротких замыканий или замыканий на землю, а также не могли причинить вред обслуживающему персоналу.

На практике встречаются случаи, когда человек оказывается включенным в цепь переменного тока (рис. 7.2). Основными случаями являются следующие:

1. Одновременное соприкосновение с токопроводящими частями, которые принадлежат двум фазам сети – **двухфазное прикосновение**, являющееся наиболее опасным, так как при таком прикосновении к человеку будет приложено линейное напряжение U_L (см. рис. 7.2, а). В этом случае на величину тока I_{h1} , протекающего через тело человека, не влияет схема трехфазной сети, режим ее нейтрали и другие факторы:

$$I_{h1} = \frac{U_L}{R_h} = \frac{\sqrt{3}U_\phi}{R_h},$$

где R_h – электрическое сопротивление человека.

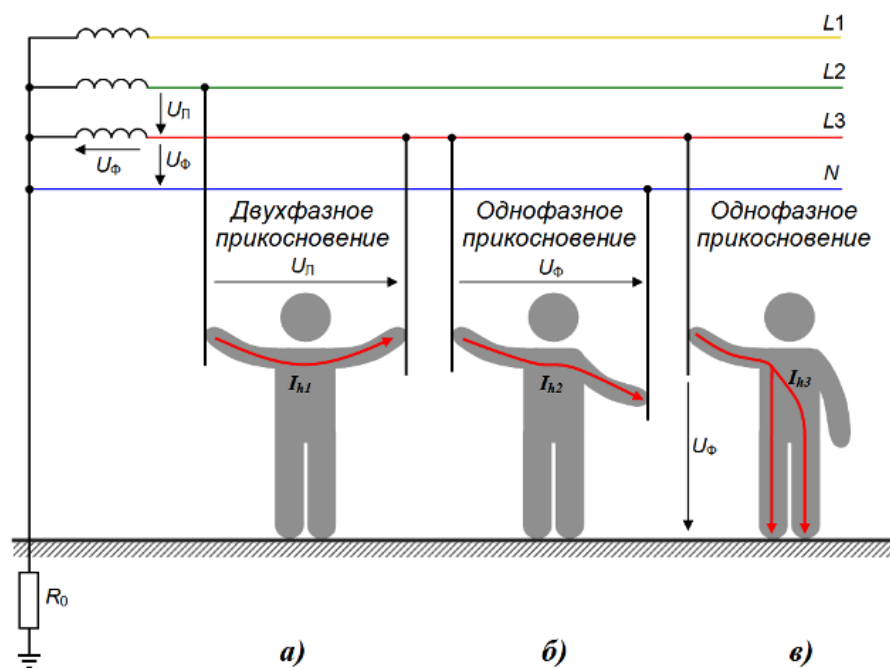


Рис. 7.2 Случаи прямого соприкосновения человека с токоведущими частями сети

В сети с линейным напряжением $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ и при сопротивлении тела человека приблизительно равным $R_h = 1000 \text{ Ом}$ при двухфазном прикосновении через человека будет проходить ток, равный $I_{h1} = 380/1000 = 0,38 \text{ А}$.

Такой ток является, безусловно, **смертельно опасным для жизни человека** (см. табл. 7.1).

2. Соприкосновение между фазой и заземленной нейтралью – **однофазное прикосновение**, также очень опасно, хотя и менее опасно, чем двухфазное прикосновение (см. рис. 7.2, б), и возникает на практике наиболее часто. В этом случае в трехфазной четырехпроводной сети с заземлением нейтрали ток I_{h2} , проходящий через человека равен

$$I_{h2} = \frac{U_{\phi}}{R_h}.$$

В этом случае ток I_{h2} будет в $\sqrt{3} \approx 1,73$ раза меньше, чем ток I_{h1} при двухфазном прикосновении, то есть в сети с фазным напряжением $U_{\phi} = 220 \text{ В}$ при $R_h = 1000 \text{ Ом}$ ток $I_{h2} = 220/1000 = 0,22 \text{ А}$, что также является **очень опасным значением** (см. табл. 7.1).

При **однофазном прикосновении только к линейному проводу** (рис. 7.2, в) ток I_{h3} , протекающий через тело человека, по закону Ома определяется фазным напряжением сети, сопротивлением R_h человека, сопротивлением $R_{\text{п}}$ пола (почвы) на участке от ступней ног до заземляющего устройства, сопротивлением обуви $R_{\text{об}}$ и сопротивлением заземления нейтрали источника тока R_0 :

$$I_{h3} = \frac{U_{\phi}}{R_h + R_{\text{п}} + R_{\text{об}} + R_0}.$$

Пренебрегая сопротивлением заземления нейтрали $R_0 \approx 4 \text{ Ом}$ и сопротивлением тела человека $R_h \approx 1000 \text{ Ом}$ по сравнению с сопротивлением пола (не металлического) $R_{\text{п}} \approx 120 \text{ кОм}$ и обуви $R_{\text{об}} \approx 100 \text{ кОм}$, определим в

этом случае проходящий через тело ток: $I_{h3} = U_{\phi} / (R_{\pi} + R_{об}) = 220 / (120 + 100) = 1 \text{ мА}$. Как видно из табл. 7.1 этот ток **совершенно безопасен для человека.**

В работе сетей с **изолированной нейтралью** иногда происходит возникновение неотключаемых замыканий на землю. Такие замыкания в сетях не представляют опасности при соблюдении требований ПУЭ к защитным мерам заземления. Однако в течение времени, которое проходит от момента неотключаемого замыкания на землю до момента его устранения, может произойти второе замыкание на землю, но уже в другой фазе этой сети, которое может быть вызвано увеличением напряжения первоначально неповрежденных двух фаз относительно земли. Двойные замыкания на землю могут вызвать опасные напряжения на заземленных частях электроустановок и привести к тяжелым повреждениям.

Своевременное обнаружение неотключаемого однофазного замыкания на землю и предотвращение перехода в двухфазное замыкание требует эффективного приборного контроля исправности изоляции.

В сети с **изолированной нейтралью** не допускается использование зануления из-за возможного появления опасных напряжений на корпусах электроустановок при их эксплуатации. Поэтому **в сети с изолированной нейтралью** в целях электробезопасности **корпуса** вместе с другими **открытыми проводящими частями электроустановок заземляют.**

Зануление корпусов и других открытых проводящих частей электроустановок применяют в трехфазных сетях напряжением до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью, которая является основной защитной мерой при косвенном соприкосновении. **Глухозаземленная нейтраль** обеспечивает электробезопасность за счет быстрого отключения защитными устройствами (автоматами) неисправной электроустановки. Это достигается электрическим соединением корпусов электроустановок с **глухозаземленной нейтралью трансформатора.** Зануление создает при внутреннем повреждении изоляции

токоведущих частей установки замкнутую цепь фаза-земля с малым сопротивлением, в которой возникает большой ток короткого замыкания, отключаемый защитными устройствами. В сетях с глухозаземленной нейтралью нельзя применять защитное заземление электроустановок без соединения с нейтралью их корпусов и открытых проводящих частей.

Система защитного зануления в сетях с заземленной нейтралью является эффективной только при выполнении следующих условий:

1. Для быстрого и надежного отключения аварийного участка сети или электроустановки с помощью защитных устройств нужна достаточно большая величина тока короткого замыкания.
2. Необходимо обеспечить электробезопасность за все время от начала замыкания до момента срабатывания защитного устройства. Такая же мера требуется при аварийном обрыве нулевого провода.
3. Замена сгоревших плавких вставок предохранителей и автоматических выключателей на новые с бóльшими значениями допустимых токов, чем это требуется по условиям защиты и установленным пусковым токам **не допускается!**
4. Защита электроустановок с помощью автоматических выключателей и предохранителей должна быть обеспечена их установкой во всех трех фазах. При этом **на стороне нейтрального провода установка выключателей или предохранителей не допускается!**

Практика показывает, что случаи электротравматизма обычно вызываются не недостатками защитных мер, а грубыми нарушениями Правил техники безопасности (ПТБ). Для безопасной работы электроустановок и персонала их обслуживающего должны быть выполнены меры технического порядка, которые предохраняют от опасного поражения электрическим током и обеспечивают надежную работу электроустановок, а также меры организационного характера, которые осуществляют эффективный контроль

нормальной работы электроустановок, поддерживают соблюдение дисциплины персонала, обеспечивают периодическую проверку знаний ПТБ и ПУЭ.

Системы защитного заземления

Существуют различные схемы электроснабжения, используемые для подключения и безопасной эксплуатации электроустановок в жилых и общественных зданиях. Они различаются по способу заземления электрооборудования и источников электроэнергии.

При трехфазном и однофазном электроснабжении установок с напряжением до 1 кВ используются различные системы защитного заземления.

В системе заземления TN нейтраль источника электроэнергии глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки соединены с глухозаземленной нейтралью источника (занулены) с помощью нулевых защитных проводников PE .

В системе заземления $TN - C$ используются нулевой защитный и нулевой рабочий проводники, совмещенные в одном проводнике PEN , начиная от нейтрали, на всем протяжении PEN –проводника (рис. 7.3).

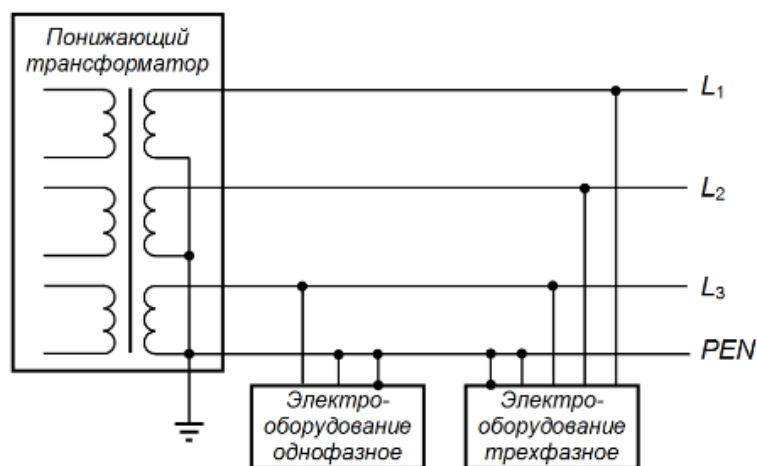


Рис. 7.3 Система электроснабжения $TN - C$

В системе заземления $TN - C$ нулевой рабочий (нейтральный) проводник N объединяют с нулевым защитным (заземляющим) проводником PE , образуя совмещенный PEN –проводник (рис. 7.3), который используется для заземления электрооборудования потребителей.

В системе заземления $TN - S$ используется разделение нулевого защитного и нулевого рабочего проводников на всем их протяжении (рис. 7.20).

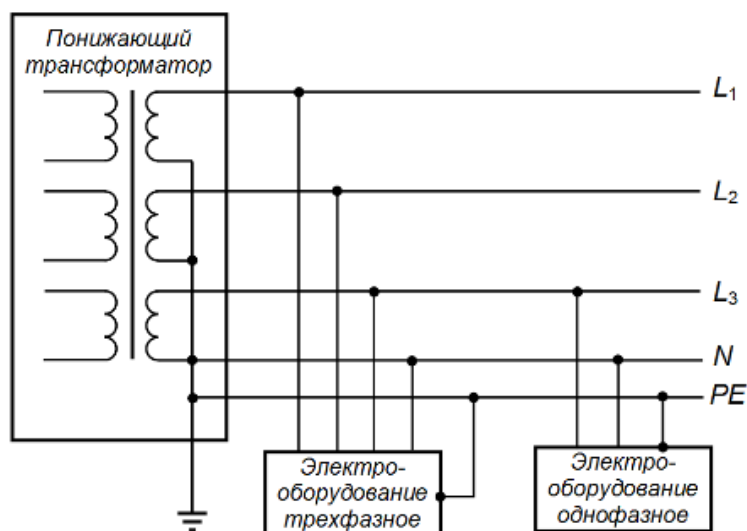


Рис. 7.4 Система электроснабжения $TN-S$

В системе $TN - S$ для заземления открытых проводящих частей электроустановки используется отдельный защитный PE –проводник (рис. 7.4), который соединен в точке заземления источника электропитания (нейтрали) с нулевым рабочим проводником N .

В системе $TN - C - S$ функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников совмещены в одном PEN –проводнике в его начальной части, начиная от источника питания (нейтрали), с последующим разделением в распределительном щите на PE –проводник и N –проводник (рис. 7.5).

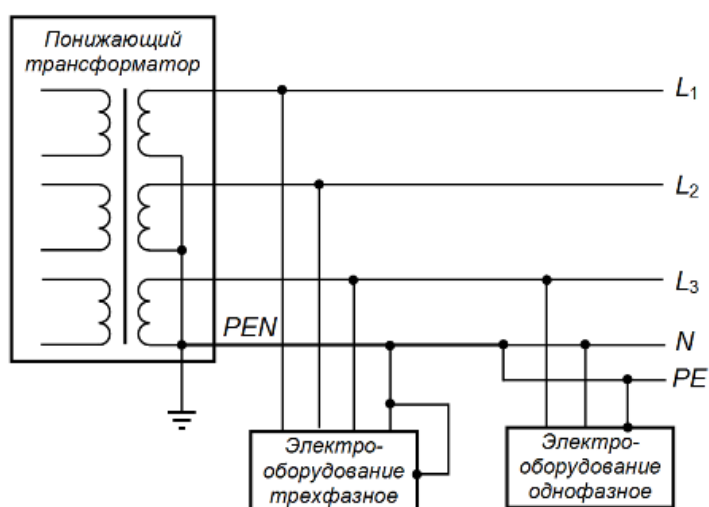


Рис. 7.5 Система электроснабжения $TN - C - S$

В системе $TN - C - S$ применяется заземление открытых проводящих частей электроустановок, как через PEN –проводник, так и через PE –проводник (см. рис. 7.5). Разделение PEN –проводника на PE –проводник и N –проводник выполняется до расположенных в цепи защитно-коммутационных устройств (автоматов и УЗО).

В системе заземления IT нейтраль источника питания не соединена с землей (изолирована от земли) или заземлена через приборы или устройства, с большим сопротивлением, а открытые проводящие части электроустановки соединены с землей (рис. 7.6).

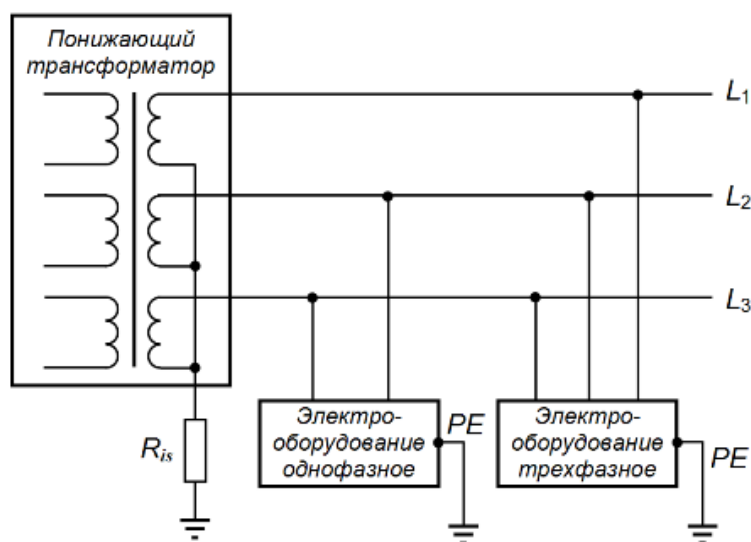


Рис. 7.6 Система электроснабжения IT

В системе IT защитный заземляющий проводник обозначается так же, как и нулевой защитный проводник, т. е. PE –проводник (рис. 7.6).

В системе заземления TT нейтраль источника питания глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки заземлены при помощи устройства заземления через PE –проводник, который электрически не связан с глухозаземленной нейтралью источника (рис. 7.7).

В системе TT заземление электрооборудования осуществляется независимо от заземления источника электроэнергии, так как их точки заземления пространственно разнесены (см. рис. 7.7).

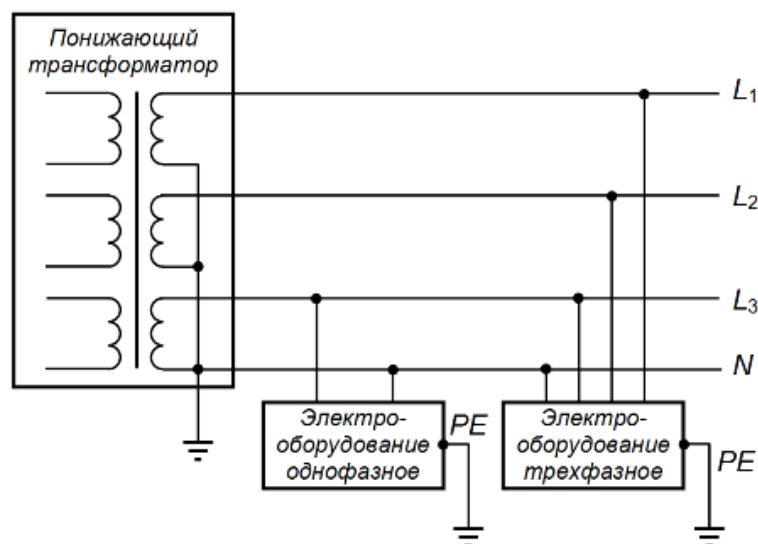


Рис. 7.7 Система электроснабжения TT

Применение систем защитного заземления

Основными мерами защиты от **прямого прикосновения**, т. е. контакта с токоведущими частями, находящимися во время работы под напряжением, являются:

- изоляция токоведущих частей электроустановки;
- использование различных ограждений, барьеров, оболочек;
- расположение потенциально опасных токоведущих частей электроустановки вне зоны доступности к ним.

Дополнительной защитной мерой от прямого прикосновения служит установка **устройства защитного отключения (УЗО)**.

Для защиты при **косвенном прикосновении**, т. е. при контакте с проводящими частями электроустановки (например, с металлическим корпусом), которые могут оказаться под напряжением при нарушении изоляции, также применяют УЗО.

Другой мерой защиты при косвенном прикосновении служит использование **нулевых защитных проводников PE** в электроснабжении электроустановок с системой заземления *TN*, совместно с защитными устройствами от сверхтоков (предохранителями и автоматическими выключателями).

В соответствии с требованиями ПУЭ электроустановки напряжением до 1 кВ, расположенные в жилых, общественных и промышленных зданиях, а также наружные установки, как правило, получают питание с применением системы TN от источника с глухозаземленной нейтралью (понижающего трансформатора). Помимо этой системы на практике широко используются системы заземления $TN - C$ (рис. 7.3), $TN - S$ (рис. 7.4) и $TN - C - S$ (рис. 7.5).

Линии групповой однофазной сети в жилых и общественных зданиях прокладывают от групповых, этажных и квартирных щитков до штепсельных розеток с подключением стационарных электроприемников и светильников общего освещения по трехпроводной схеме с фазным L , нулевым рабочим N и нулевым защитным PE проводниками.

Соединение нулевых защитных PE и нулевых рабочих N проводников, принадлежащих разным групповым линиям, **не допускается!**

Не допускается включение коммутационных аппаратов в цепи с PE —проводником и PEN —проводником кроме подключения электроприемников через устройства коммутации в виде штепсельных соединителей (вилка/розетка)!

Не допускается соединять общим контактным зажимом нулевой рабочий проводник N с нулевым защитным проводником PE !

Ранее у нас и в других странах была распространена система **зануления**, при которой нетоковедущие, но проводящие части (корпуса) электроустановок соединялись с землей и заземленной нейтралью источника (понижающего трансформатора). В настоящее время такое зануление существует в ограниченном числе систем электроснабжения электроустановок, однако его до сих пор используют в системе защиты с помощью автоматического отключения источника питания.

При электроснабжении установок с системой заземления $TN - C - S$ разделение совмещенного нулевого защитного и нулевого рабочего проводника

PEN на нулевой рабочий N и нулевой защитный PE проводники происходит в вводно-распределительном устройстве или распределительном щите.

Нулевой защитный проводник PE соединяется со всеми открытыми проводящими частями (корпусами) электроустановок и может иметь многократное заземление (рис. 7.5). При этом для нулевого рабочего проводника N , присоединенного к заземленной нейтрали источника (трансформатора), повторное соединение с землей не допускается (рис. 7.3 – рис. 7.5).

В настоящее время наиболее перспективной является однофазное электроснабжение с системой заземления $TN - C - S$ с одновременным использованием УЗО, которая обеспечивает в электроустановках высокий уровень электробезопасности без коренной реконструкции более старой системы электроснабжения, в которой использовалась только пара проводников (один фазный и один нейтральный).

Электроустановки, имеющие системы заземления $TN - S$ и $TN - C - S$ имеют достаточную электробезопасность не за счет самих систем, а совместно с УЗО и с дополнительной **системой уравнивания потенциалов**.

7.5. Устройства защитного отключения (УЗО)

УЗО – это электромеханический коммутационный аппарат, служащий для отключения нагрузки, когда величина **дифференциального тока** I_{Δ} превысит заданную величину, и при определенных условиях эксплуатации должен вызвать размыкание силовых контактов УЗО и, тем самым, обесточить поврежденный участок цепи.

УЗО, реагируя на утечку тока через нарушенную изоляцию проводов, предназначен для защиты от поражения человека током в случае прикосновения к токоведущим и проводящим частям электроустановки, а также при возникновении пожара.

Широкое применение имеет комбинированный коммутационный аппарат, так называемый **дифференциальный автомат**, который совмещает в одном

корпусе УЗО, управляемый дифференциальным током, и автоматический выключатель с устройством защиты от сверхтоков.

Защита от поражения током, связанная с косвенным прикосновением к поврежденной установке, обычно осуществляется отключением ее от питания с помощью предохранителей или автоматических выключателей. Но такая защита не среагирует при малых токах утечки, иногда возникающих при однофазном прямом прикосновении к токоведущим частям или при однофазном косвенном прикосновении к частям электроустановки и связанных с аварийным нарушением ее изоляции, а также с обрывом нулевого провода. В этих случаях единственное надежное средство защиты человека при однофазном прикосновении связано с использованием УЗО, которое обеспечивает быстрое (за доли секунды) отключение поврежденной установки от питающей сети.

Кроме этого, УЗО может обеспечить защиту при начальном возгорании или пожаре, возникающих из-за неисправных электроприборов или электропроводки с нарушенной изоляцией и приводящих к КЗ.

Как правило, сеть, предназначенная для питания **стационарного осветительного оборудования**, не требует установки отдельного УЗО.

В состав **квартирных электрощитков** обычно входят электросчетчики, автоматические выключатели и УЗО в виде дифференциальных автоматов. Автоматические выключатели сгруппированы по каждой цепи электропитания (освещение, розетки, электроплита, стиральная машина и т. д.). Возможная схема квартирного электрощитка показана на рис. 7.8.



Рис. 7.8 Схема однофазного электроснабжения квартиры с системой защитного заземления TN – S

7.6. Категории потребителей по надежности их электроснабжения

По обеспечению надежности электроснабжения все электроприемники, согласно ПУЭ, делятся на три категории.

Электроприемниками первой категории называются потребители электроэнергии, для которых прекращение электроснабжения связано с опасностью для жизни людей, с угрозой безопасности государства, со значительным материальным ущербом, с прекращением непрерывного технологического процесса, с нарушением нормального функционирования связи и телевидения, а также особо важных объектов коммунального хозяйства.

Потребители электроэнергии, относящиеся к 1-й категории, должны иметь электроснабжение **от двух независимых источников питания**, которые могут взаимно резервировать друг друга.

Перерыв электроснабжения потребителей 1-й категории допускается лишь на кратковременное время автоматического восстановления питания, то есть **в**

течение времени при автоматическом подключении потребителей к другому резервному источнику питания.

Допустимое время перерыва при электроснабжении потребителей 1-й категории не более 1 мин.

Примером потребителей 1-й категории могут быть электрооборудование насосных станций, систем вентиляции в жилых и производственных помещениях, электроприводы лифтов высотных зданий и др. Потребителями 1-й категории надежности являются водопроводные и канализационные станции, автоматические телефонные станции (АТС), мобильная связь, телевидение и радио и др.

В состав потребителей 1-й категории входит **особая группа потребителей**, для которых совершенно необходима бесперебойная работа и недопустим останов производства, чтобы **предотвратить угрозу жизни людей, а также не допустить возможные взрывы и пожары**, которые могут возникнуть при нарушении бесперебойного электроснабжения. К потребителям особой группы 1-й категории относят операционные больницы, родильные дома, аварийное освещение, аварийная сигнализация и др.

Электроснабжение **особой группы потребителей 1-й категории** обязательно предусматривает возможность дополнительного электроснабжения **от 3-го независимого источника**, который может резервировать основные источники питания.

Допустимый промежуток времени нарушения электроснабжения потребителей особой группы 1-й категории составляет доли секунды.

Примером третьего независимого резервного источника питания для электроснабжения потребителей особой группы 1-й категории, а также второго резервного источника электроснабжения для остальных потребителей 1-й категории является использование местных электростанций, электростанций энергосистем (в частности, использование шин генераторного напряжения), а

также предназначенных для этих целей агрегатов бесперебойного питания (АБП), аккумуляторных батарей и т. п.

Электроприемниками второй категории называются потребители электроэнергии, для которых прекращение электроснабжения связано с массовым недовыпуском продукции, с массовыми простоями рабочих, с остановкой работы механизмов и промышленного транспорта, с нарушением нормальной жизнедеятельности большого количества людей.

Потребители 2-й категории **в обычных условиях обеспечиваются электроэнергией от 2-х независимых источников электроснабжения**, которые могут в аварийных ситуациях в течение определенного времени резервировать друг друга.

В случае нарушения электроснабжения от одного из двух источников питания для потребителей 2-й категории, допустим перерыв в электроснабжении не более 2-х часов, который требуется для подключения резервного источника питания дежурным персоналом или с помощью аварийной выездной бригады. Потребители 2-й категории допускают электроснабжение в нормальном режиме от одного трансформатора.

Примером электропотребителей 2-й категории в промышленном производстве являются электропривод прокатных цехов, промышленных предприятий в машиностроении, в текстильной и в целлюлознобумажной промышленности. Детские учреждения, школы и жилые дома до пяти этажей также относятся к потребителям второй категории.

К **электроприемникам третьей категории** относят всех остальных потребителей, не подпадающих под определения потребителей 1-й и 2-й категорий.

Потребители 3-й категории получают электроснабжение от одного источника при допустимых перерывах электроснабжения не больше одних суток, связанных с ремонтными работам или с заменой неисправного устройства системы электроснабжения.

Потребители 3-й категории связаны с электроснабжением при несерийном производстве промышленной продукции, с электроснабжением вспомогательных цехов, небольших коммунально-хозяйственных объектов, сельскохозяйственных предприятий и др.

7.7. Электрические сети зданий

Электроснабжение жилых зданий

Схемы электрических сетей при распределении электроэнергии внутри жилых зданий и помещений связаны с надежностью электроснабжения, числом этажей и секций здания, планировочного решения жилых помещений и мест общего пользования, обустройства подвальных помещений и технических подполий, встроенных и пристроенных к жилому зданию учреждений и предприятий (магазинов, ателье, парикмахерских, салонов, мастерских, и др.). В то же время эти схемы имеют единые установленные технические правила и нормы с общими принципами их построения.

Каждое многоэтажное здание имеет главный распределительный щит (ГРЩ) или вводно-распределительные устройства (ВРУ), которые связывают внешние питающие линии, отходящие от ближайшей трансформаторной подстанции (ТП) и внутренние групповые электрические сети здания напряжением 220/380 В. ВРУ и ГРЩ помимо распределительных устройств имеют устройства защиты (трехфазные автоматические выключатели, предохранители с плавкими вставками и др.) для защиты от коротких замыканий, перегрузок, скачков напряжений и др.

Электроснабжение квартир от ВРУ происходит с помощью линий, проходящих по горизонтальным участкам (каналам) и вертикальным участкам (стоякам). Горизонтальный участок групповой линии может быть связан с одним или несколькими стояками. С целью независимого электроснабжения разных квартир, а также для удобства производства ремонтных работ на каждом разветвлении групповой линии устанавливается устройство защиты и управления в виде автоматического выключателя.

Помимо электроснабжения квартир ВРУ обеспечивает электроснабжение приемников общедомового пользования (электроприводов лифтовых установок, насосов, вентиляторов и др.), а также освещение нежилых помещений и пространств (лестниц, холлов, чердачных и подвальных помещений и др.).

В жилых домах нагрузка одной питающей линии, отходящей от **вводно-распределительного устройства**, не должна превышать 250 А. При этом число горизонтальных питающих линий квартир в сети электроснабжения должно быть минимальным.

Здания, имеющие 4 этажа и выше, обычно содержат не больше двух питающих линий. Однако при повышенной мощности электроприемников общую нагрузку квартир две линии могут не обеспечить (при общем токе выше 500 А). В этом случае разрешается увеличить число питающих линий больше двух.

В жилых домах до 10-и этажей с газовыми плитами и до 5-и этажей с электрическими плитами предусмотрено электроснабжение квартир с одним стояком на секцию (подъезд). Число стояков увеличивают при большой величине установленной квартирной нагрузки.

Дома с электрическими плитами с числом этажей от 5-и до 17-и оборудуют одним стояком на секцию при подключении до 4-х квартир на каждом этаже или 2 стояка в секции при подключении к одному стояку 40% квартир на верхних этажах и 60% квартир на нижних этажах. Дома с числом этажей более 17-и снабжают двумя стояками на секцию при подключении до четырех квартир на каждом этаже.

Электроснабжение квартир и силовых электроприемников общего пользования, в том числе лифтов, как правило, осуществляется от общих секций ВРУ.

Вентиляторы дымоудаления и подпора воздуха питаются от отдельных линий, проложенных в одной секции. Одна магистральная питающая линия электрической сети жилого здания может принадлежать нескольким стоякам.

Освещение входов в здание, вестибюлей, лестниц, поэтажных коридоров, номерных знаков домов и указателей, пожарных гидрантов, а также ограждающие светильники на крышах и домофоны получают электроснабжение по линиям от ВРУ или ГРЩ. При этом линии огней светового ограждения и питания домофонов выполняются отдельно от других линий.

Питание общедомовых усилителей телевизионных сигналов происходит от линий освещения чердаков и самостоятельными линиями от ВРУ в бесчердачных зданиях. Питание силовых электроприемников в жилых зданиях (лифтов, насосов, вентиляторов и др.), как правило, выполняется от ВРУ по отдельной силовой сети.

Ниже показаны примерные схемы электроснабжения жилых домов различной этажности, обеспечивающие надежность электроснабжения.

На рис. 7.9 показана схема электроснабжения по магистральной кабельной сети с резервной перемычкой, которая питает жилые дома до 5-и этажей без электрических плит. Резервная перемычка 7 включается в магистраль при аварии (обрыве или КЗ) любой из питающих линий 6. Недостаток схемы заключается в том, что в нормальном режиме работы резервная перемычка не используется (холодный резерв).

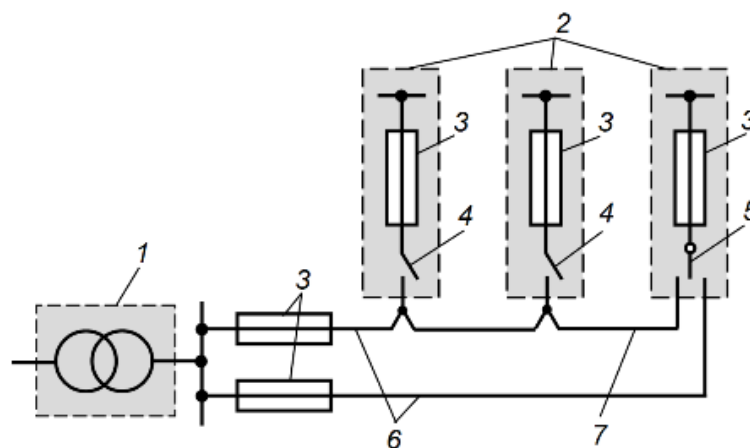


Рис. 7.9 Схема электроснабжения зданий высотой до 5 этажей с резервной перемычкой: 1 – трансформаторная подстанция; 2 – жилые дома; 3 – предохранители; 4 – выключатели; 5 – переключатель; 6 – питающие линии; 7 – резервная перемычка

На рис. 7.10 приведена модификация схемы рис. 7.9. Для этой схемы на вводах в здание вместо выключателей установлены переключатели. Недостаток такой схемы заключается в том, что в каждый дом (кроме крайнего) необходимо провести 4 кабеля (вместо 2-х, как в предыдущей схеме на рис. 7.9).

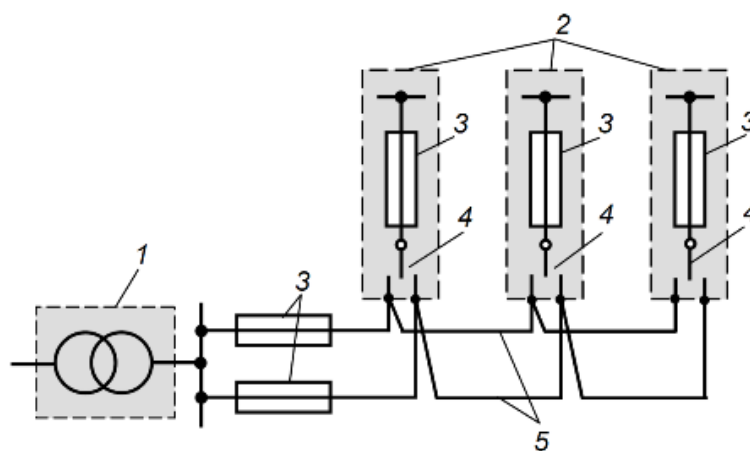


Рис. 7.10 Схема электроснабжения домов высотой до 5 этажей с переключателями на вводах: 1 – трансформаторная подстанция; 2 – жилые дома; 3 – предохранители; 4 – переключатели; 5 – питающие линии

Электроснабжение приемников в жилых домах высотой 9 - 16 этажей происходит как по **радиальным**, так и по **магистральным** схемам. На рис. 7.11 представлена магистральная схема, использующая два переключателя на вводах. Одна из линий в этой схеме используется для электроснабжения квартирных электроприемников и общедомовых приборов общего освещения помещений, а другая служит для питания электроприводов лифтов, аварийного

и эвакуационного освещения, противопожарных устройств, и др. Каждая из линий спроектирована с учетом допустимых величин перегрузок в аварийном режиме. Допустимый перерыв в электроснабжении по этой схеме не должен превышать 1-го часа, что является достаточным временем для проведения дежурным электриком нужного переключения на ВРУ.

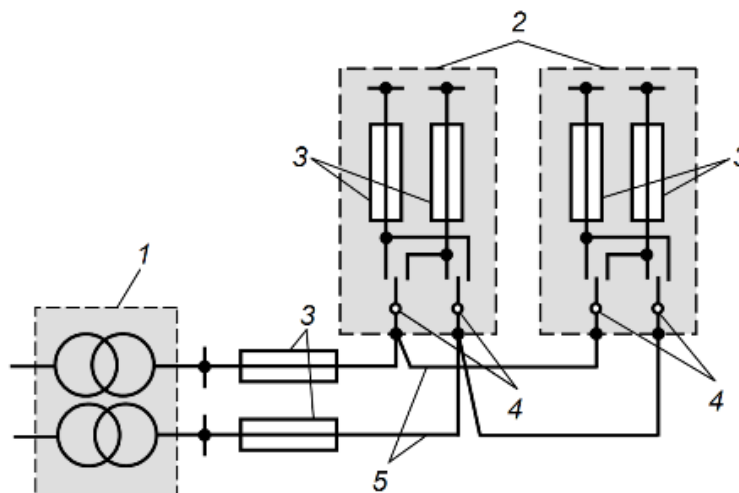


Рис. 7.11 Схема электроснабжения зданий высотой от 9 до 16 этажей с двумя переключателями на вводах: 1 – трансформаторная подстанция; 2 – жилые дома с ВРУ; 3 – предохранители; 4 – переключатели; 5 – питающие линии

На рис. 7.12 показано электроснабжение жилых домов высотой 9 - 16 этажей с 3-мя вводами питающих линий, которые взаимно **резервируют** друг друга. Потребность большого числа вводов возникает при электроснабжении зданий с электроплитами, а также многосекционных жилых домов данной этажности при большом числе квартир с газовыми плитами.

Электроснабжение домов выше 16-ти этажей происходит с использованием **радиальных схем с автоматическим вводом (включением) резерва (АВР) на вводах**. В этом случае силовые вводы служат для питания и других электроприемников **первой категории надежности**: аварийного и эвакуационного освещения, огней светового ограждения, противопожарных устройств и др. На рис. 7.13 приведена схема электроснабжения жилого дома высотой 17 этажей и более.

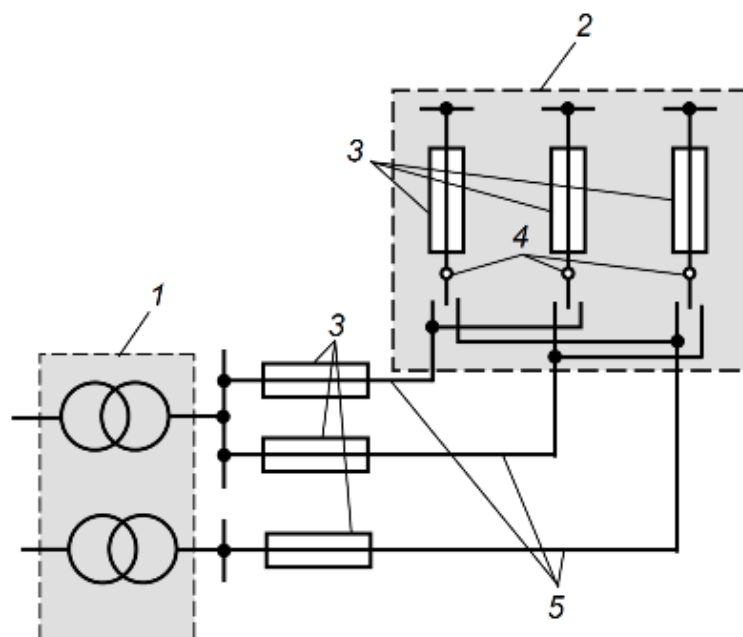


Рис. 7.12 Схема электроснабжения зданий высотой 9–16 этажей с тремя вводами: 1 – трансформаторная подстанция; 2 – жилой дом с ВРУ; 3 – предохранители; 4 – переключатели; 5 – питающие линии

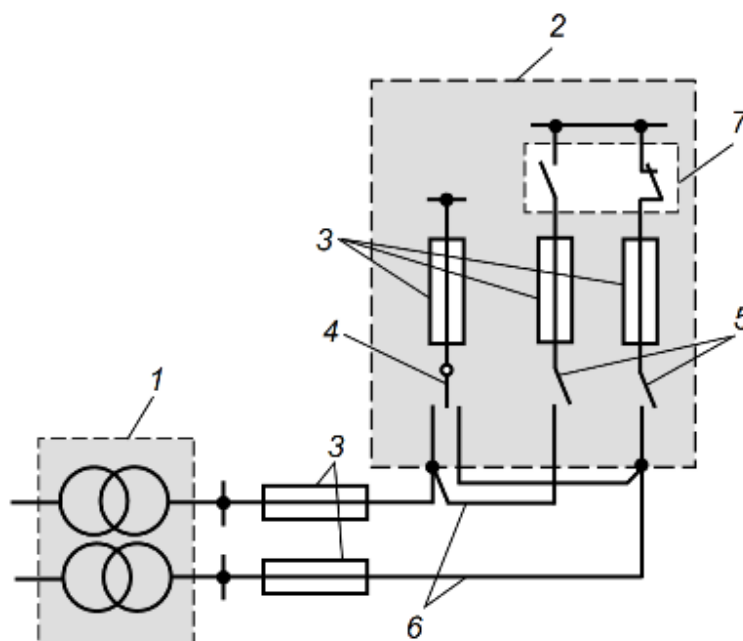


Рис. 7.13 Схема электроснабжения домов высотой 17 этажей и более с АВР: 1 – трансформаторная подстанция; 2 – жилой дом с АВР; 3 – предохранители; 4 – переключатель; 5 – выключатели; 6 – питающие линии

В электроснабжении используются комплектные ТП с сухими трансформаторами, расположенные вблизи жилых зданий или в подвальных помещениях зданий.

В современных зданиях **главный распределительный щит** объединяет в виде единого комплексного вводно-распределительного устройства **вводы**

внешних электрических сетей и коммутационно-защитную аппаратуру внутренних распределительных сетей. ВРУ обычно размещают в секциях дома, ближе расположенных к ТП. К распределительной части ГРЩ присоединяют распределительные линии квартир, линии силовых потребителей, групповые линии рабочего, аварийного и эвакуационного освещения помещений, линии электроснабжения противопожарных устройств, огни светового ограждения, а также линии электроснабжения потребителей пристроенных и встроенных общественных помещений.

На линиях, отходящих от ВРУ, устанавливаются предохранители и автоматические выключатели. ГРЩ обычно объединяют несколько линий общего назначения.

Общий учет электроэнергии, потребляемой общедомовыми потребителями, производится **трехфазными электросчетчиками,** которые устанавливаются на ответвлениях к линиям и подсоединяют к соответствующим секциям шин.

В жилых зданиях на каждую квартиру устанавливается один **однофазный счетчик электроэнергии.** При большой заявленной мощности на квартиру (свыше 7 кВт) производится установка **трехфазного счетчика.** На **квартирных щитках** размещают квартирные счетчики вместе с аппаратами управления и защиты (автоматическими выключателями, предохранителями, УЗО). На квартирном щитке также размещают двухполюсный выключатель или рубильник, которые подсоединены к линии перед счетчиком, для его безопасной замены.

К внутридомовым линиям электроснабжения также относятся линии, питания электродвигателей лифтов, насосов, вентиляторов и др.

Кроме линий электроснабжения квартир от ВРУ/ГРЩ прокладывают:

- питающие линии лифтовых установок, причем к одной линии подсоединяют не больше четырех лифтовых установок из разных секций, а число лифтов, питаемых от ВРУ не ограничивается;

- групповые распределительные линии рабочего, аварийного и эвакуационного освещения;
- линии штепсельных розеток, которые используются при подключении уборочных механизмов и ручного электроинструмента для ремонтных работ в нежилых помещениях;
- линии, питающие пристроенные или встроенные в жилые дома общественные предприятия и учреждения (хотя иногда они получают питание не от ВРУ, а от ближайшей ТП).

Количество групповых линий предназначенных для электроснабжения **бытовых и осветительных электроприемников**, а также их пропускная способность должны соответствовать установленным нормам.

Групповые линии квартирной сети как правило выполняются однофазными, или трехфазными четырехпроводными при значительных нагрузках. При этом должна быть предусмотрена прокладка проводов или кабелей с надежной изоляцией, а также установка УЗО.

При прокладке трехфазных четырехпроводных линий в жилых домах сечение **нулевых проводников**, должно быть таким же, как и сечение **фазных проводников** при площади сечения фазных проводников до 25 мм^2 , а при больших сечениях – не менее половины площади сечения фазных проводников.

Светильники общего освещения рекомендуется питать от отдельной групповой линии.

Нормы регламентируют число штепсельных розеток для установки в квартирах. Предусмотрена установка одной розетки на каждые 6 м^2 жилой площади и одна розетка с заземляющим контактом на ток 10 А для подключения бытового электроприбора мощностью до 2,2 кВт.

Электроснабжение общественных зданий

Электрооборудование и электроснабжение общественных зданий имеют ряд отличительных особенностей:

- в электрооборудовании общественных зданий имеется большая доля силовых приемников;
- режимы работы силовых электроприемников имеют свои особенности;
- существуют другие нормы освещения ряда помещений в общественных зданиях;
- имеется возможность встраивания комплектных ТП в ряд общественных зданий.

Электроснабжение общественных зданий с общей потребляемой мощностью более 400 кВА часто обеспечивается установкой комплектных трансформаторных подстанций (КТП). Такая установка имеет следующие преимущества:

- экономию цветных металлов;
- исключается прокладка внешних кабельных линий напряжением до 1 кВ;
- отсутствует необходимость устройства отдельных ВРУ в здании, поскольку ВРУ может быть совмещено с РУ 0,4 кВ на КТП.

Однако существующими нормами и правилами запрещается встраивание КТП в здания детских дошкольных учреждений и учебных заведений, в здания больниц, поликлиник, родильных домов, в здания гостиниц и т. п.

Обычно подстанции расположены на технических или первых этажах зданий. Допускается размещение в подвалах ТП, имеющие сухие трансформаторы и трансформаторы с негорючим заполнением охлаждающей жидкости, а также их установка на средних и верхних этажах, если для их транспортировки имеются грузовые лифты.

В пристроенных к жилым зданиям ТП допустима установка, не только сухих трансформаторов, но и масляных трансформаторов. Число масляных трансформаторов при мощности каждого до 1000 кВА должно быть не более двух, а мощность и количество трансформаторов с негорючим заполнением и

сухих трансформаторов не имеет ограничения. В места возможной установки ТП не должна проникать вода.

Электроснабжение потребителей 1-й категории надежности, как правило, осуществляют с помощью двухтрансформаторных ТП, хотя имеется возможность использования и однострансформаторных ТП, но при условии резервирования за счет переемычки и подключения по низкому напряжению АВР.

Электроснабжение потребителей 2-й и 3-й категорий надежности обычно происходит с помощью однострансформаторных ТП по радиальным или магистральным схемам.

Радиальные схемы в основном используют при электроснабжении установок большой мощности: крупных холодильных машин, электродвигателей насосных станций, больших вентиляционных камер и т. п. Магистральные схемы применяют в случае равномерного размещения по зданию электроприемников сравнительно небольшой мощности.

Линии силовой и осветительной распределительной сети выполняют обычно раздельными. На вводах сетей электроснабжения общественных зданий, также, как и в жилых домах, устанавливают ВРУ/ГРЩ, куда входят аппараты управления, защиты, и учета электроэнергии, а в современных крупных зданиях – и измерительные приборы учета, входящие в состав АСКУЭ.

Вводы обособленных потребителей (торговые предприятия, отделения связи и т. п.) имеют ВРУ, в который установлены дополнительные аппараты управления. Вводы распределительных пунктов и групповых щитков обычно имеют автоматические выключатели, которые одновременно служат для защиты и управления.

Каждая отходящая от ВРУ питающая линия имеет аппарат защиты и управления, в то же время один аппарат управления может быть подсоединен к нескольким линиям, которые имеют одинаковое назначение и сходны по режиму работы.

Электроснабжение аварийного и эвакуационного освещения происходит от сети, начиная от щита на ТП или от ВРУ здания, причем эта сеть не зависит от сети общего рабочего освещения. Так, например, при наличии двух трансформаторов на ТП электроснабжение рабочего освещения и эвакуационное освещение вместе аварийным обеспечивается разными трансформаторами. Распределительные пункты для силовых электроприемников, а также щиты и щитки, как правило, расположены на тех же этажах, где установлены сами электроприемники. Силовые электроприемники одинакового назначения и характера работы группируют и связывают общими линиями с распределительными пунктами, щитами и щитками.

Электроснабжение электроприемников небольшой одинаковой установленной мощности обычно соединяют по магистральной схеме в «цепочку» для экономии прокладываемых проводов и кабелей, а также для уменьшения числа аппаратов защиты на распределительных пунктах.

Осветительные сети имеют групповые распределительные щитки, которые обычно расположены в коридорах, на лестничных клетках и др. Групповые линии, отходящие от щитков, могут иметь разное исполнение:

- однофазное (фаза + ноль);
- двухфазное (две фазы + ноль);
- трехфазное (три фазы + ноль).

Предпочтение отдают электроснабжению с помощью трехфазных четырехпроводных групповых линий, которые могут иметь в три раза бóльшую нагрузку, а потери напряжения в 6 раз меньше по сравнению с однофазными линиями.

Существующие нормы установки групповой осветительной сети в жилых зданиях, допускают присоединение на одну фазу до 60 ламп накаливания мощностью до 65 ватт или люминесцентных ламп. Эти нормы относятся к групповым линиям освещения этажных коридоров, лестниц, холлов,

технических подполий, чердаков и подвалов. Должно быть по возможности равномерным распределение нагрузок между фазами для осветительной сети. Для экономии электроэнергии в помещениях, имеющих через окна боковое естественное освещение, предусмотрено расположение светильников рядами параллельно окнам, с возможностью их автоматического отключения в зависимости от требуемой освещенности также рядами.

Ниже представлены упрощенные схемы электроснабжения общественных зданий. На рис. 7.14 показана схема питания здания с электроприемниками, которые относятся к 3-й категории надежности.

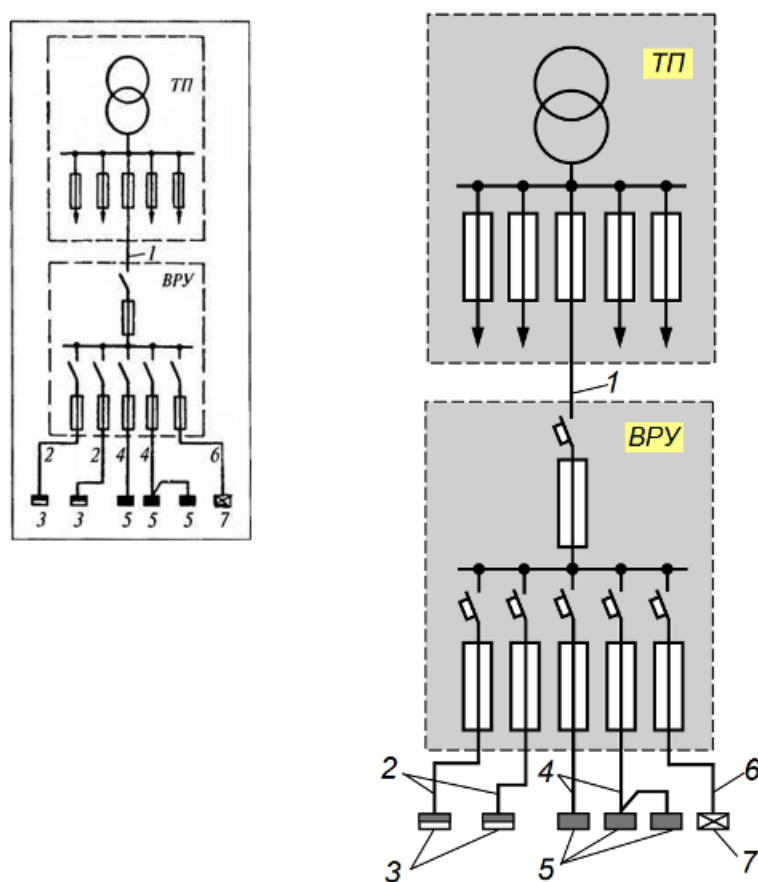


Рис. 7.14 Электроснабжение общественного здания от однотрансформаторной подстанции: 1 – питающая линия от ТП к ВРУ; 2 – питающие линии от ВРУ к РП; 3 – РП силовых электроприемников; 4, 6 – линии от ВРУ к щиткам; 5 – групповые щитки рабочего освещения; 7 – щиток эвакуационного освещения

Общественное здание получает электроснабжение от ТП с одним трансформатором. Питающая линия 1 соединяет щит на ТП напряжением 0,4 кВ с ВРУ здания. ВРУ связывают питающие линии 2 с распределительными

пунктами силовых электроприемников 3, линии 4 – с групповыми щитками рабочего освещения 5 и линию 6 - с щитком эвакуационного освещения 7.

Электроснабжение ответственных потребителей 1-й категории в крупных городах происходит с помощью двухтрансформаторных ТП с одновременным устройством АВР, которое устанавливается на стороне низкого напряжения. Схемы такого электроснабжения приведены на рис. 7.15 (с АВР на контакторах) и на рис. 7.16 (с АВР на автоматических выключателях).

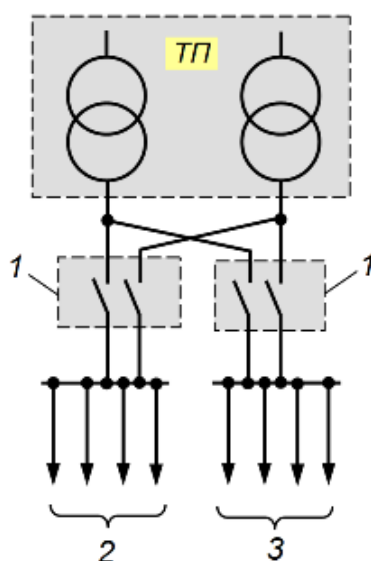


Рис. 7.15 Электроснабжение общественного здания от двухтрансформаторной подстанции с АВР на контакторах: 1 – контакторные станции; 2,3 – отходящие линии к вводам в здание

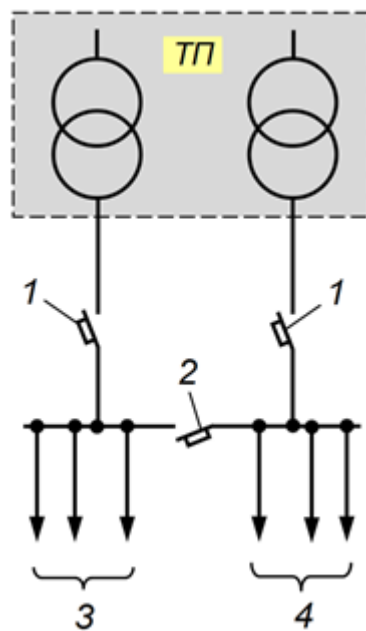


Рис. 7.16 Электроснабжение общественного здания от двухтрансформаторной подстанции с АВР на автоматических выключателях: 1 – автоматические выключатели; 2 – секционный автоматический выключатель; 3 – линии к РП силовой сети, щиткам аварийного и эвакуационного освещения; 4 – линии к групповым щиткам