

4. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

4.1. Понятие об электрическом токе.

Происхождение электричества

История электричества рассматривалась в тематике Переменного тока, но всегда остаются подробности, которыми можно дополнить повествование. Мы уже знаем, что дочери Фалеса Милетского мир обязан знанию об электричестве. Опыты затем многими повторялись, но учение о душах никто развить в что-либо иное не смог. Само слово происходит от древнегреческого названия янтаря, а первым всерьёз занялся исследованиями некто Уильям Гилберт. К тому времени были известны работы Перегринна о магнетизме – если так можно назвать один короткий манускрипт, а о Фалесе Милетском физик знал по трактатам Аристотеля.

Выход книги *De magnetibus, magneticisque corporibus etc* пришёлся на 1600 год. Чтобы лучше понять обстановку, вспомним, что после 9 лет следствия именно тогда сожгли Джордано Бруно. Без пролития крови, как того требовали правила инквизиции. Бывший священник по доносу собственного друга отправился на костёр. А ещё через 5 лет при короле Якове I произошёл Пороховой заговор, и некоторые до сих пор думают, что это все было умелой инсценировкой. Суд обвинил группу католиков в попытке взорвать парламент и даже поймал одного – Гая Фокса, маски которого поныне носят многие неучи, выкладывая снимки в интернет, не ведая о том, что изобразили на своём лице.



Рис.1.

Электричество

Той, для многих печальной, осенью дворяне вразрез со сложившимися традициями подверглись пыткам. В частности, на дыбе. Гай не сдавался, но когда начали подписывать свои показания другие, он сделал то же самое. Почерк сильно отличался от обычного – да и как можно писать с изувеченными руками. А теперь представим, что это была инсценировка протестантов с целью устранить со своего пути неудобное направление родственной религии... На казни Гаю помогли на виселицу взобраться его же палачи, но он сумел ловко прыгнуть и сломать себе шею, избежав тем самым дальнейших мучительных процедур.

И вот, во всей этой кутерьме, Уильям Гилберт, пару лет не доживший до Порохового заговора, и ушедший из жизни с водворением на престол все того же Якова I выпускает трактат, связанный с такими загадочными явлениями, как электричество и магнетизм. Описывает, что потёртый янтарь отклоняет в сторону стрелку компаса, конструирует прибор, именуемый версором, для наблюдения и опытов. Учёного легко могли обвинить в колдовстве – инквизиция и аналогичного рода структуры как раз жгли ведьм. Можно долго говорить о том, что сие затронуло преимущественно материковую часть Европы, но и в

Англии было жарко. Закон о прекращении уголовного преследования за колдовство вышел в Великобритании только в 1735 году.

А до того постоянное электричество вполне могло стать причиной если не казни, то во всяком случае неприятных процедур различного толка. Итак, Гилберт, набравшись смелости говорит, что электричество является слабой силой, которую легко разрушить. Стоит лишь поместить между телами какой-нибудь диэлектрик, как эффект притяжения нарушается. В то же время магнетизм является сильной чертой и не зависит от попадания влаги, влияния других предметов и многого другого. Некоторые тела могут электризоваться, а другие нет. В то же время магнетизм затрагивает лишь очень немного материалы, тогда как «слабое» явление влияет буквально на все сущее (со слов Гилберта). Были подмечены и другие характерные черты. Например, магниту свойственно постоянство, тогда как для электризации тело следует натереть до «блеска, нагрева или истечения».

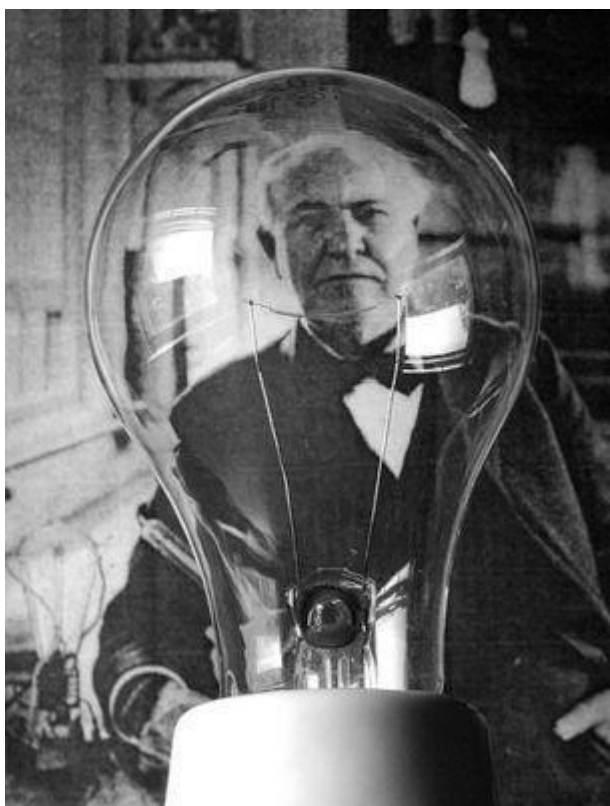
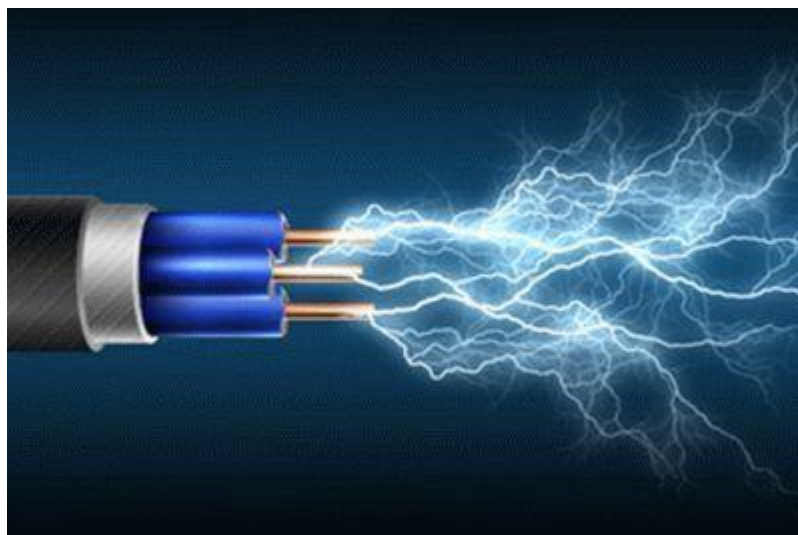


Рис.2.

В то же время книга полна технических ошибок из-за несовершенства методик исследования. Но это дало учёным исход, и через каких-нибудь двести лет уже существовал Вольтов столб. Это источник постоянного напряжения, немного напоминающий современный аккумулятор. Неплохо, если учесть, что после Фалеса Милетского прошло более 20 веков (2000 лет), пока кто-то решился изложить научно столь простое явление, как электризация янтаря. Эстафету перенял Никола Кабео, в Философии магнетизма (1629 год) попытавшийся, избегая душ у материальных тел, объяснить загадочные явления. По соображениям учёного вещь, наделённая необычными качествами, раздвигала и сжимала воздух, отчего и происходили наблюдаемые феномены. Натолкнуло на такую мысль отсутствие разницы меж обычными и заряженными телами в тысячекратных опытах над одними и теми же объектами.

Отцом постоянного тока следовала бы назвать Отто фон Герике, внимавшего со всей прилежностью трудам Гилберта. Учёный захотел создать машину, которая автоматизировала бы процесс трения, и пришёл постепенно к конструкции первого статического генератора. Для этих целей Герике рекомендует использовать шар из серы величиной с детскую голову. Накопленный электрический потенциал оказался потрясающим, и учёный немедленно делает несколько открытий:

1. Заряды могут не только притягиваться, но и отталкиваться.
2. Электричество может течь по проводникам.



Течение тока по проводам

Никто не заметил выдающихся открытий на фоне работ Герики по теме разреженных газов. Систематизировал сведения по электричеству Шарль Дюфе в декабре 1733 года, через много лет после смерти выдающегося учёного. Экспериментатор установил, что заряды бывают двух знаков, один из которых немедленно окрестили стеклянным, а другой – смоляным. Через пару лет европейские государства начинают расставаться с практикой преследования граждан за колдовство, и открытия следуют одно за другим.

Электрический ток в металлах. Опытное доказательство природы носителей электрических зарядов в металлах. Основы классической электронной теории проводимости в металлах.

Представление об электронной природе носителей зарядов в металлах, заложенная в теории Друде и Лоренца, в основе имеет ряд классических опытных доказательств.

Первым из таких опытов является опыт Рикке (1901), в котором в течение года эл. ток пропусклся через три последовательно соединенных с тщательно отшлифованными торцами металлических цилиндров (Cu,Al,Cu) одинакового радиуса. Несмотря на то, что общий заряд, прошедший через цилиндры, достигал огромной величины (около $3,5 \cdot 10^6$ Кл) никаких изменений в массе крайних металлов обнаружено не было. Это явилось доказательством предположения, что в переносе заряда участвуют частицы чрезвычайно малой массы.

Несмотря на малость массы носителей заряда, они обладают свойством инерции, что и было использовано в опытах Мандельштама и Папалекси, а затем в опытах Стюарта и Толмена, которые раскручивали катушку с очень большим числом витков до огромной скорости (порядка 300 м/с), а затем резко тормозили ее. В результате смещения зарядов вследствие инерции создавало импульс тока, а зная размеры и сопротивление проводника и величину тока, регистрировавшегося в опыте, можно было вычислить отношение заряда к массе

частицы, которая оказалась очень близка к величине, которая получается для электрона ($1,7 \cdot 10^{11}$ Кл/кг).

4.2. Основные законы электрического тока.

Основы классической электронной теории проводимости в металлах

Существование свободных электронов в металлах объясняется тем, что при образовании кристаллической решетки металла (в результате сближения изолированных атомов) валентные электроны, сравнительно слабо связанные с атомными ядрами, отрываются от атомов металла, становятся „свободными" и могут перемещаться по объему. Т.е. в узлах кристаллической решетки располагаются положительные ионы металла, а между ними хаотически движутся свободные электроны, образуя своеобразный электронный газ, средняя длина свободного пробега электронов при этом порядка 10^{-10} м (расстояние между узлами решетки). Электроны проводимости сталкиваются с ионами решетки, передавая им энергию, в результате чего устанавливается термодинамическое равновесие между электронным газом и решеткой. По теории Друде-Лоренца электроны обладают такой же энергией теплового движения, как и молекулы идеального одноатомного газа и при комнатных температурах тепловая скорость электронов будет порядка 10^5 м/с, все электроны рассматриваются как независимые и для объяснения макроскопических явлений (например, ток) достаточно знать поведение одного электрона, чтобы определить поведение всех электронов. Поэтому такую теорию называют „одноэлектронным приближением" и не смотря на свою упрощенность она дает некоторые удовлетворительные результаты.

Тепловое хаотическое движение электронов не может привести к появлению тока. При наложении на металлический проводник электрического поля все электроны приобретают направленное движение, величину скорости которого можно оценить по плотности тока- даже при очень больших плотностях (порядка 10^{-10} А/м) скорость упорядоченного движения получается около 10^{-3} м/с. Следовательно, при вычислениях результирующую скорость движения электрона (тепловая + упорядоченная) можно заменять на скорость

теплового движения.

Встает вопрос, а как же объяснить факт мгновенной передаче электрических сигналов на большие расстояния? Дело в том, что электрический сигнал переносят не те электроны, которые находятся на начале линии передачи, а электрическое поле, имеющее скорость около $3 \cdot 10^8$ м/с, вовлекающее в движение практически мгновенно все электроны вдоль цепи. Поэтому электрический ток и возникает практически мгновенно с замыканием цепи.

Закон Ома для однородного участка цепи (интегральный закон Ома).

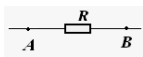
Сопротивление, удельное сопротивление. Зависимость сопротивления от температуры. Соединение проводников.

Закон Ома для однородного участка цепи.

Сила тока в однородном участке цепи прямо пропорциональна напряжению при постоянном сопротивлении участка и обратно пропорциональна сопротивлению участка при постоянном напряжении.

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

где U - напряжение на участке, R - сопротивление участка.



Величину обратную удельной электропроводности называют удельным сопротивлением проводника $\rho = \frac{1}{\gamma}$. Тогда получаем формулу $R = \rho \frac{l}{S}$, которая характеризует сопротивление проводника (току) или омические сопротивление.

В электрических цепях осуществляется соединение проводников последовательное, параллельное и смешанное.

При последовательном соединении выполняются условия:

$$U = U_1 + U_2 + U_3; I = I_1 = I_2 = I_3; R = R_1 + R_2 + R_3$$

При параллельном соединении:

$$U = U_1 = U_2 = U_3; I = I_1 + I_2 + I_3; \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

При смешанном соединении сначала выделяются участки последовательно соединенных сопротивлений в параллельных участках и определяются

общее сопротивление этих участков; затем вычисляются сопротивления параллельных участков и только после этого общее сопротивление всей цепи.

Сопротивление проводников зависит от температуры: для нормального металла с примесями и металла с идеальной кристаллической решеткой в области комнатных температур удельное сопротивление изменяется пропорционально абсолютной температуре по закону: $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$

где ρ_0 — удельное сопротивление при 0°C ; $\alpha \approx 1 / 273\text{K}$ — температурный коэффициент; t -

температура по шкале Цельсия.

Если пренебречь изменениями объема проводника при его нагревании, то сопротивление проводников изменяется по аналогичному закону: $R = R_0(1 + \alpha t)$

где R_0 — удельное сопротивление при 0°C ; $\alpha \approx 1 / 273\text{K}$ — температурный коэффициент; t -

температура по шкале Цельсия.

Температурная зависимость сопротивления металлических проводников широко используется для создания термометров сопротивления. Измеряя сопротивление проводника, сопротивление которого при 0°C известно, можно определить температуру окружающей среды (точность достигает до $0,003 \text{ K}$).

Закон Ома и Джоуля-Ленца в дифференциальной форме.

Рассмотрим вопрос о том, как будет выглядеть зависимость электрических характеристик тока от напряженности электрического поля и характера движения электронов в металле.

Так как масса электрона в тысячи раз меньше массы ионов металла, то потери энергии электронами при их движении происходят только при столкновении электронов с ионами - неупругое столкновение, при котором электрон полностью теряет энергию, приобретенную в результате действия электрического поля, и начинает новое движение с нулевой скоростью направленного движения.

Плотность тока по формуле $j = n * e * v_{\text{др}}$ можно вычислить, рассматривая ускоренное движение электрона под действием постоянной электрической

силы $F = E \cdot e$ в на пути равном расстоянию между двумя ионами (длина пробега l), и скорость теплового движения ($\langle u \rangle$).

В результате получаем следующую зависимость: $j = \gamma \cdot E$ плотность тока проводимости прямо пропорциональна напряженности электрического поля в проводнике.

Соединение источников тока. КПД источника тока.

Соединение источников тока:

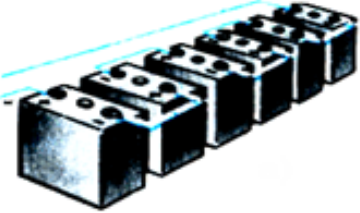
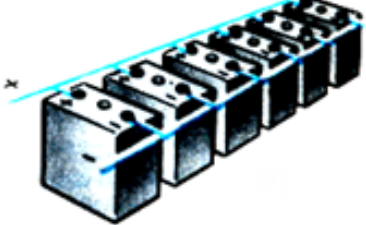
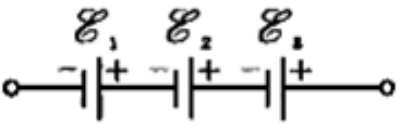
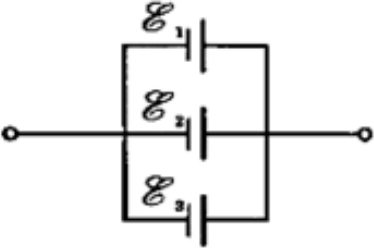
Последовательное соединение	Параллельное соединение
	
	
$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \dots + \mathcal{E}_n = \mathcal{E}_1 \cdot n$	$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_3 = \dots = \mathcal{E}_n$
$r = r_1 + r_2 + \dots + r_n = r_1 \cdot n$	$r = \frac{r_1}{n}$
$I = \frac{\mathcal{E}_1 \cdot n}{R + r_1 \cdot n}$	$I = \frac{\mathcal{E}}{R + \frac{r_1}{n}}$

Рис.4.

r - внутреннее сопротивление батареи

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \quad r = \frac{r_0}{n}$$

Наибольшей величины ток достигает при $r=0$

I - ток короткого замыкания

Ток короткого замыкания — не предусмотренное нормальными условиями работы замыкание через малое сопротивление токопроводящих частей, имеющих различную полярность, подключенных к различным фазам или имеющих различные потенциалы.

Полная мощность, выделяющаяся во всей цепи, будет: $P = I * \varepsilon = \frac{\varepsilon^2}{R + r}$

наибольшая мощность при коротком замыкании: $P_{\max} = \frac{\varepsilon^2}{r}$

При увеличении внешнего сопротивления мощность выделяющаяся во

внешней цепи падает: $P = I^2 * R = \frac{\varepsilon^2}{(R + r)^2} R$

Максимальная полезная мощность во внешнем участке цепи получается при $R = r$: $P = \frac{\varepsilon^2}{4R}$

Коэффициент полезного действия можно определить: $\eta = \frac{A}{W} = \frac{U}{\varepsilon} = \frac{R}{R + r}$

Электрическая цепь. Замкнутая электрическая цепь с источником тока. Электродвижущая сила (ЭДС), падение напряжения на участке цепи. Закон Ома для замкнутой цепи. Закон Ома для неоднородного участка цепи.

Разделение зарядов происходит под действием сторонних сил. Сторонние силы действуют лишь внутри источника тока и могут быть обусловлены химическими процессами (аккумуляторы, гальванические элементы), действием света (фотоэлементы), изменяющимися магнитными полями (генераторы) и т.д.

Электрическая цепь — соединение источников постоянного тока с проводниками и другими электрическими элементами.

Замкнутая цепь состоит из двух частей — внутренней и внешней. Внутренняя часть цепи представляет собой источник тока, обладающий внутренним сопротивлением r ; внешняя — различные потребители, соединительные провода, приборы и т.д. Общее сопротивление внешней части обозначается R . Тогда полное сопротивление цепи равно $r + R$.

Электродвижущая сила источника тока — физическая величина, равная

отношению работы, совершаемой сторонними силами внутри источника тока при перемещении через него зарядов, к величине этого заряда.

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{см}}}{Q} = \frac{Q * (\varphi_1 - \varphi_2) + Q * I * r}{Q} = (\varphi_1 - \varphi_2) + Ir \quad \text{или} \quad \varepsilon = IR + Ir = U_R + U_r$$

где U - падение напряжения на внешнем участке цепи;

U_r - падение напряжения на внутреннем участке цепи (источника тока)

Единицей электродвижущей силы в СИ является вольт (В).

Напряжение – разность потенциалов между крайними точками этого участка

Закон Ом для замкнутой цепи: сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна ЭДС в цепи и обратно пропорциональна общему

сопротивлению цепи.

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

Закон Ома для неоднородного участка цепи:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon}{R}$$

где R — общее сопротивление неоднородного участка.

Работа тока на участке цепи и в замкнутой цепи. Интегральный закон Джоуля-Ленца. Мощность тока. Единицы измерения. Удельная мощность тока.

Работа тока - работа электрического поля по переносу электрических зарядов вдоль проводника;

Работа тока на участке цепи равна произведению силы тока, напряжения и времени, в течение которого работа совершалась.

$$A = UIt = I^2 Rt = \frac{U^2}{R} t$$

$$[В * А * с] = [Вт * с] = [Дж]$$

Мощность тока - отношение работы тока за время t к этому интервалу времени.

$$P = \frac{A}{t} = \frac{Uq}{t} = \frac{UIt}{t} = UI$$

$$[В * А] = [Вт]$$

Закон Джоуля-Ленца:

Если сила тока изменяется со временем, то количество тепла,

выделяющееся за время t , вычисляется по формуле:

$$Q = \int_0^t I^2 * R dt$$

Удельная мощность тока (w) - количество тепла, выделившееся в единице объёма проводника за единицу времени:

$$w = \frac{d^2 Q}{dV dt}$$

Разветвленные цепи. Законы Кирхгофа. Правила знаков для токов, падений напряжений и ЭДС.

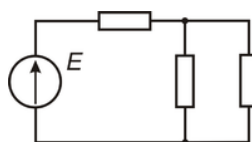


Рис.5.

Разветвлённая цепь

Узлом электрической цепи называют соединение не менее трех проводников, по которым идут токи. Ток, входящий в узел считают положительным, выходящим из узла - отрицательным.

Первый закон Кирхгофа

В любом узле электрической цепи алгебраическая сумма токов равна нулю

$$\sum_{k=1}^m I_k = 0$$

где m – число ветвей подключенных к узлу.

При записи уравнений по первому закону Кирхгофа токи, направленные к узлу, берут со знаком «плюс», а токи, направленные от узла – со знаком «минус».

Второй закон Кирхгофа

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

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m R_k I_k = \sum_{k=1}^m U_k$$

где n – число источников ЭДС в контуре;

m – число элементов с сопротивлением в контуре;

$U_k = R_k I_k$ – напряжение или падение напряжения на k -м элементе контура.

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

$$\sum_{k=1}^m U_k = 0$$

При записи уравнений по второму закону Кирхгофа необходимо:

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

4.3. Электрическая ёмкость, электродвижущая сила, потенциал, электрическое напряжение.

Электрическая ёмкость

Электрическая ёмкость — характеристика проводника, мера его способности накапливать электрический заряд. В теории электрических цепей ёмкостью называют взаимную ёмкость между двумя проводниками; параметр ёмкостного элемента электрической схемы, представленного в виде двухполюсника. Такая ёмкость определяется как отношение величины электрического заряда к разности потенциалов между этими проводниками.

В Международной системе единиц (СИ) ёмкость измеряется в фарадах, в

системе СГС — в сантиметрах.

Для одиночного проводника ёмкость равна отношению заряда проводника к его потенциалу в предположении, что все другие проводники бесконечно удалены и что потенциал бесконечно удалённой точки принят равным нулю. В математической форме данное определение имеет вид

где Q — заряд, φ — потенциал проводника.

Ёмкость определяется геометрическими размерами и формой проводника и электрическими свойствами окружающей среды (её диэлектрической проницаемостью) и не зависит от материала проводника. К примеру, ёмкость проводящего шара (или сферы) радиуса R равна (в системе СИ):

где ϵ_0 — электрическая постоянная, равная $8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость.

Понятие ёмкости также относится к системе проводников, в частности, к системе двух проводников, разделённых диэлектриком или вакуумом, — к конденсатору. В этом случае ёмкость (взаимная ёмкость) этих проводников (обкладок конденсатора) будет равна отношению заряда, накопленного конденсатором, к разности потенциалов между обкладками. Для плоского конденсатора ёмкость равна:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d},$$

где S — площадь одной обкладки (подразумевается, что обкладки одинаковы), d — расстояние между обкладками, ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками.

Электрическая ёмкость некоторых систем

Вычисление электрической ёмкости системы требует решение Уравнения Лапласа $\nabla^2 \varphi = 0$ с постоянным потенциалом φ на поверхности проводников. Это тривиально в случаях с высокой симметрией. Нет никакого решения в терминах элементарных функций в более сложных случаях.

В квазидвумерных случаях аналитические функции отображают одну

ситуацию на другую, электрическая ёмкость не изменяется при таких отображениях. См. также Отображение Шварца — Кристоффеля.

Вид	Ёмкость	Комментарий
Плоский конденсатор	$\frac{\epsilon S}{4\pi d}$	S: Площадь d: Расстояние
Коаксиальный кабель	$\frac{\epsilon l}{2 \ln(R_2/R_1)}$	l: Длина R ₁ : Радиус R ₂ : Радиус
Две параллельные проволоки ^[2]	$\frac{\epsilon l}{4 \operatorname{arccosh}\left(\frac{d}{2a}\right)} = \frac{\epsilon l}{4 \ln\left(\frac{d}{2a} + \sqrt{\frac{d^2}{4a^2} - 1}\right)}$	a: Радиус d: Расстояние, d > 2a
Проволока параллельна стене ^[2]	$\frac{\epsilon l}{2 \operatorname{arccosh}\left(\frac{d}{a}\right)} = \frac{\epsilon l}{2 \ln\left(\frac{d}{a} + \sqrt{\frac{d^2}{a^2} - 1}\right)}$	a: Радиус d: Расстояние, d > a l: Длина
Две параллельные компланарные полосы ^[3]	$\epsilon l \frac{K\left(\sqrt{1-k^2}\right)}{4\pi K(k)}$	d: Расстояние w ₁ , w ₂ : Ширина полос k _m : d/(2w _m +d) k ² : k ₁ , k ₂ K: Эллиптический интеграл l: Длина
Два концентрических шара	$\frac{\epsilon}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}}$	R ₁ : Радиус R ₂ : Радиус
Два шара, тот же самый радиус ^{[4][5]}	$\frac{\epsilon a}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sinh\left(\ln\left(D + \sqrt{D^2 - 1}\right)\right)}{\sinh\left(n \ln\left(D + \sqrt{D^2 - 1}\right)\right)}$ $\frac{\epsilon a}{2} \left\{ 1 + \frac{1}{2D} + \frac{1}{4D^2} + \frac{1}{8D^3} + \frac{1}{8D^4} + \frac{3}{32D^5} + O\left(\frac{1}{D^6}\right) \right\}$ $= \frac{\epsilon a}{2} \left\{ \ln 2 + \gamma - \frac{1}{2} \ln\left(\frac{d}{a} - 2\right) + O\left(\frac{d}{a} - 2\right) \right\}$	a: Радиус d: Расстояние, d > 2a D = d/2a γ: Постоянная Эйлера
Шар вблизи стены ^[4]	$\epsilon a \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sinh\left(\ln\left(D + \sqrt{D^2 - 1}\right)\right)}{\sinh\left(n \ln\left(D + \sqrt{D^2 - 1}\right)\right)}$	a: Радиус d: Расстояние, d > a D = d/a
Шар	ϵa	a: Радиус
Круглый диск ^[5]	$\frac{2\epsilon a}{\pi}$	a: Радиус
Тонкая прямая проволока, ограниченная длина ^{[7][8][9]}	$\frac{\epsilon l}{2\Lambda} \left\{ 1 + \frac{1}{\Lambda} (1 - \ln 2) + \frac{1}{\Lambda^2} \left[1 + (1 - \ln 2)^2 - \frac{\pi^2}{12} \right] + O\left(\frac{1}{\Lambda^3}\right) \right\}$	a: Радиус проволоки l: Длина Λ: ln(l/a)

Рис.6. Электрическая ёмкость простых систем (СГС)

Электродвижущая сила

Электродвижущая сила (ЭДС) — скалярная физическая величина, характеризующая работу сторонних сил (то есть любых сил, кроме электростатических и диссипативных) действующих в квазистационарных цепях постоянного или переменного тока. В замкнутом проводящем контуре ЭДС равна работе этих сил по перемещению единичного положительного заряда

вдоль всего контура.

По аналогии с напряжённостью электрического поля вводят понятие *напряжённость сторонних сил*, под которой понимают векторную физическую величину, равную отношению сторонней силы, действующей на пробный электрический заряд к величине этого заряда. Тогда в замкнутом контуре ЭДС будет равна:

$$\mathcal{E} = \oint_L \vec{E}_{ex} \cdot d\vec{l},$$

где $d\vec{l}$ — элемент контура.

Несмотря на наличие слова «сила» в наименовании понятия, электродвижущая сила не является одной из сил в физике и не имеет размерности силы.

ЭДС так же, как и напряжение, в Международной системе единиц (СИ) измеряется в вольтах. Можно говорить об электродвижущей силе на любом участке цепи. Это удельная работа сторонних сил не во всем контуре, а только на данном участке. ЭДС гальванического элемента есть работа сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда внутри элемента от одного полюса к другому. Работа сторонних сил не может быть выражена через разность потенциалов, так как сторонние силы непотенциальны и их работа зависит от формы траектории. Так, например, работа сторонних сил при перемещении заряда между клеммами источника тока вне самого источника равна нулю.

Потенциал

Электрический потенциал — временная компонента четырёхмерного электромагнитного потенциала, называемый также иногда *скалярным потенциалом* (скалярным — в трёхмерном смысле; скаляром в релятивистском смысле — инвариантом группы Лоренца — он не является, то есть не является неизменным при смене системы отсчёта).

Через электрический потенциал выражается напряжённость электрического поля:

где $\vec{\nabla}$ — оператор градиента (набла), а \vec{a} — векторный потенциал, через который выражается (также) магнитное поле.

В частном случае постоянных или пренебрежимо медленно меняющихся со временем электрического и магнитного полей (случай электростатики), электрический потенциал носит название *электростатического потенциала*, а формула для напряжённости электрического поля (называемого в этом случае электростатическим) упрощается, так как второй член (производная по времени) равен нулю (или достаточно мал по сравнению с первым — и его можно приравнять нулю в рамках принятого приближения):

В этом случае, как нетрудно увидеть, пропадает (отсутствует) вихревое электрическое поле, поле — потенциально, а отсюда следует возможность определить электростатический потенциал через работу, совершаемую электрическим полем, так как она в этом случае полностью определяется разностью потенциалов в начальной и конечной точке.

Электрическое напряжение.

Для характеристики действия электрического поля используют понятие «напряжение». Электрическое напряжение является физической величиной, обозначающей величину работы, которую совершает электрическое поле для изменения координаты (из точки А в точку В) заряда напряжённостью в 1 кулон. Единицу измерения напряжения принято называть Вольт, в честь известного физика итальянского происхождения Алессандро Вольта.

$$1V = 1 \frac{Дж}{Кл}$$

Процесс возникновения напряжения в электрической цепи состоит из следующих этапов:

1. Цепь, состоящую из проводников и потребителей, подключают к двум полюсам источника тока (батареи или генератора);
2. На одном из полюсов источника (клемм батареи или контактных выводов генератора) содержится избыток электронов, на другом — недостаток. Тот полюс, на котором сконцентрировались носители

заряда (электроны), принято называть положительным, в то время как второй – отрицательным.

3. При подключении к цепи источника питания находящиеся на положительном полюсе и в проводнике свободные электроны под действием возникшего электрополя начнут притягиваться к отрицательно полюсу батареи, имеющему положительный заряд вследствие отсутствия электронов.

4. Вследствие разности потенциалов между клеммами источника питания в проводниках и нагрузке возникнет упорядоченное движение электронов, и появится разность потенциалов определенной величины. При этом потенциал полюса с избытком электронов в случае с источниками постоянного тока постепенно уменьшается.

Разница между переменным и постоянным напряжением

Чтобы разобраться с напряжениями, возьмем для примера – постоянный и переменный электрический ток. Постоянный ток, представляет движение заряженных частиц только в одном направлении. Представьте шоссе, по которому едут много машин в одном направлении. При переменном токе, направление движения частиц меняется очень часто, но остается упорядоченным. Это же самое шоссе, только поток машин постоянно меняет направление движения на противоположное, но движется все вместе.

Если говорить, о постоянном напряжении, то один конец провода всегда « + + +», а другой « - — -». Обычная батарейка, является источником постоянного напряжения. На ней всегда показано, где плюс и минус. При переменном напряжении полярности конца проводника постоянно меняются местами. Физическая величина частота отвечает сколько раз меняется полярность за единицу времени. В обычной сети частота, с которой меняется напряжение и, соответственно, направление тока равно 50 герц, т.е. 50 раз в секунду.

Переменный ток широко используется, если необходимо передать энергию на большие расстояния при минимальных потерях.

Напряжение в цепях постоянного тока

В таких цепях значение описываемой характеристики в течение длительного времени остается постоянным. Постепенное изменение значения данной характеристики при подключении потребителей (нагрузки) к батарее связано с ее разрядкой – уменьшением разности потенциалов между клеммами источника питания вследствие перемещения большего количества носителей зарядов с положительной клеммы на отрицательную.

Ток и напряжение в данном случае связаны законом Ома, формула которого:

$$I = U/R,$$

где:

- I – сила тока, А;
- U – разность потенциалов, В;
- R – сопротивление, Ом.

Закон Ома для участка цепи

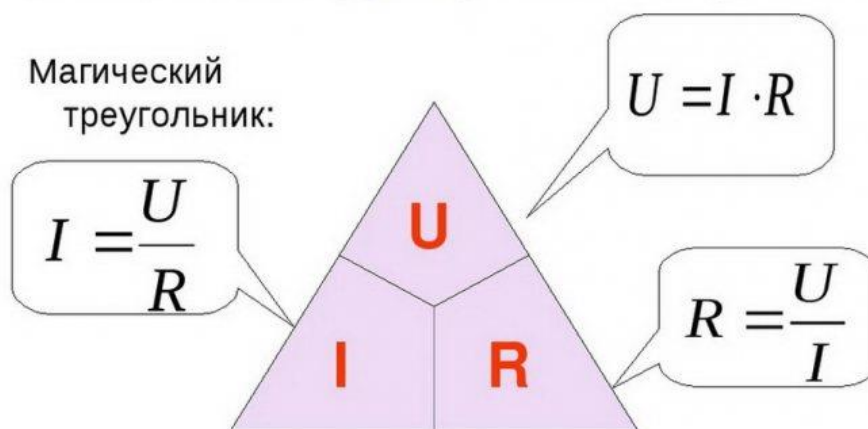


Рис.7.

Треугольник Ома – удобная форма формулы одноименного закона



Рис.8.

Единицы измерения

В международной системе единиц (системе СИ) единица измерения напряжения (В) названа в честь итальянского исследователя Алессандро Вольта (1745-1827г.). Работа измеряется в джоулях (Дж), а заряд в кулонах (К.).

Единица измерения тока — ампер. Это одна из семи базовых единиц в системе СИ. Ток может изменяться (и измеряться) в широчайших пределах, поэтому часто используются такие внесистемные единицы, как:

- 1 наноампер (нА) = 10^{-9} А;
- 1 микроампер (мкА) = 0,000001 А;
- 1 миллиампер (мА) = 0,001 А;
- 1 килоампер (кА) = 1000 А.

Напряжение в цепях переменного тока

В цепях переменного тока значение разности потенциалов на их концах непостоянно и изменяется во времени. При этом в определенный момент на одном конце цепи наблюдается максимальное значение данной характеристики, а на другом – минимальное. Графически такое изменение имеет вид синусоиды с двумя вершинами, соответствующими максимальным и минимальным значениями.

Синусоидальную сущность разности потенциалов в данном случае можно наблюдать при помощи такого измерительного прибора, как осциллограф.

Напряжение в цепях трёхфазного тока

В в цепях трёхфазного тока, используемых чаще всего на производствах, цепях, состоящих из трех фазных проводов и общей нейтрали (нуля), различают два вида разности потенциалов:

- Линейная – между всеми фазными проводами и нейтралью;
- Фазная – между отдельным фазным проводом и нейтралью.

Величина ее в 1,732 раза (квадратный корень из 3) меньше, чем линейного.



Рис.9.

Величина напряжения зависит от следующих факторов:

- Материала проводников, которыми соединены потребители в той или иной сети;
- Количества подключённых к сети потребителей: приборов, инструментов, станков;
- Температуры окружающей среды.

Также на величину разности потенциалов влияет качество монтажа той или иной электропроводки – при неаккуратной сборке и соединении проводов, использовании некачественных предохранителей она может существенно изменяться, создавая тем самым опасность для окружающих.

Действующее значение напряжения

Тестер напряжения

Значение электрического потенциала, имеющегося между двумя точками электросети, может быть определено по тому, какая работа была выполнена за

некоторый временной отрезок, либо по выделенному количеству теплоты. В случае переменного напряжения поступают по-другому. Поскольку его характер колебаний имеет форму синусоидальной кривой, и максимальное значение показатель принимает на пике амплитуды (а при перемещении из плюсовой зоны кривой в минусовую напряжение нулевое), для вычислений применяют усредненный показатель. Именно его называют действующим, и он может быть приравнен к такому же значению постоянного напряжения.

Он меньше максимального допустимого показателя на величину, равную корню из двух от последнего (то есть примерно в 1,4 раза). У сети, имеющей номинальное напряжение 220 В, максимум, таким образом, будет равен 311 В. Эти показатели нужно учитывать, подбирая конденсаторы, диодные компоненты и другие подобные элементы для монтажа в ту или иную систему.

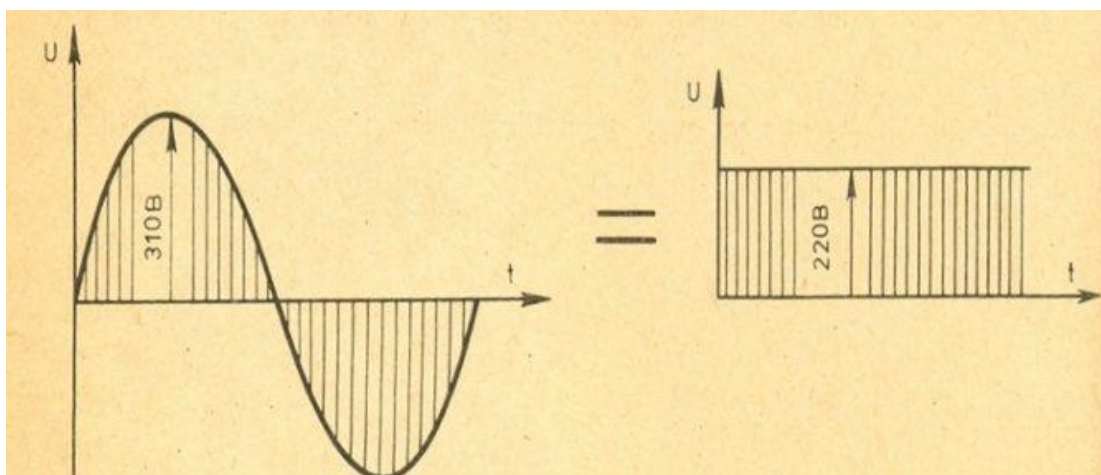


Рис.10. Синусоидальное напряжение с амплитудой 310 В эквивалентно постоянному, значение которого – 220 В

Меры предосторожности при измерении напряжений электотоков

Измерение напряжения электрического тока – это очень необходимая, но при этом опасная операция, требующая соблюдения следующих мер предосторожности:

- Все работы должны производиться с использованием исправных вольтметров и мультиметров – приборы должны показывать точное в пределах допустимой для них погрешности значение измеряемых

характеристик. Не допускается применение неисправных и не прошедших своевременную поверку измерительных приборов.

- Независимо от того, будет измеряться данная характеристика для постоянного или переменного тока, вольтметр (мультиметр) подключается к участку цепи параллельно;
- При измерении вольт-амперных характеристик высокочастотных электросетей необходим специальный наряд-допуск. Нужен он потому, что работа с таким высоким напряжением требует наличия специальных навыков и опыта. При отсутствии такого документа самовольное выполнение работ на электроустановках может привести к административной ответственности;
- Для измерительных работ необходимо также использование средств защиты: специальных перчаток, диэлектрических бот, электро-, и ручных инструментов с прорезиненными ручками, резиновых ковриков.

Определение величины напряжения

Выполняя электромонтажные работы, специалист сталкивается с разными типами напряжения. Например, розетки в квартирах и частных домах являются источниками переменного напряжения. Оно может быть понижено или повышено трансформатором, выпрямлено специальным устройством. Измерение напряжения трения производят в лабораторных условиях электрохимическим методом. Мастеру нужно знать об особенностях измерения разных видов напряжения.

Постоянное напряжение

Его можно измерить, используя магнитоэлектрические устройства. Сейчас в продаже можно найти высокоточные приборы, оснащенные цифровым дисплеем. Проще всего непосредственно подключить устройство к участку, на котором нужно провести измерения. **При этом необходимо соблюдать следующие правила:**

1. Предельное значение должно превышать предполагаемый максимум. В случае, когда измерительные работы выполняются без знания этого параметра, полагается установить максимальный предел и

постепенно снижать его.

2. Учитывать полярность подсоединения. В противном случае у стрелочного прибора указатель наклонится в противоположную сторону, у цифрового – на экране высветится отрицательное число.



Рис.11. Вольтметр

Переменное напряжение

В этом случае в ход идут измерительные приборы разных видов, за исключением магнитоэлектрических. Работают с такими аппаратами только посредством подключения к выходу выпрямителя.

Напряжение измеряют с помощью прибора, который называется вольтметром. Вольтметр подключается параллельно элементу электрической цепи, где хотят измерить падение напряжения. Обозначается на схемах вольтметр в виде кружка, с расположенной внутри него буквой V.

Классификация

По принципу действия:

- Электромеханические.
- Электронные.

По назначению:

- Для постоянного тока.
- Для переменного тока.
- Импульсные.
- Фазочувствительные.
- Селективные.
- Универсальные.

По способу исполнения:

- Переносные.
- Стационарные.
- Щитовые.

Обозначение на схеме:



Рис.12. Различные вольтметры и их обозначение на схемах.

Раньше все вольтметры были стрелочные, и значение напряжения показывала стрелка на шкале прибора с нанесенными цифровыми значениями. Сейчас большинство этих приборов выпускаются с электронной индикацией (светодиодной или жидкокристаллической). Сам вольтметр не должен влиять на результат измерения, поэтому его собственное сопротивление делают очень большим, чтобы через него практически не протекали заряды (электрический ток).

4.4. Постоянный ток.

Постоянный ток

По мере роста желающих заняться проблемой электричества, появляется все больше людей, жаждущих славы. Так, например, зарегистрированы такие сообщения:

- Из куриных яиц, подвергшихся действию электризации, цыплята вылупляются быстрее.
- Аналогичные опыты, проделанные с семенами, дали ускоренное развитие сельскохозяйственных культур.

- Электричество оживляет мёртвых животных.

Можно предположить, что часть этих фактов не совсем соответствует действительности, а единственного мага, оживлявшего трупы в России, и самого сжили со свету. По крайней мере, так считал сам Юрий Лонго, что и высказал в интервью незадолго до кончины. Не нужно думать, что все пути в этом направлении отводятся исключительно магам. Ещё в 1940 году группа советских физиологов показала, что под действием искусственного кровоснабжения могут ожить не только сердце и легкие, но также и голова, и целое животное (собака). Остаётся гадать, почему технология не получила дальнейшего развития.

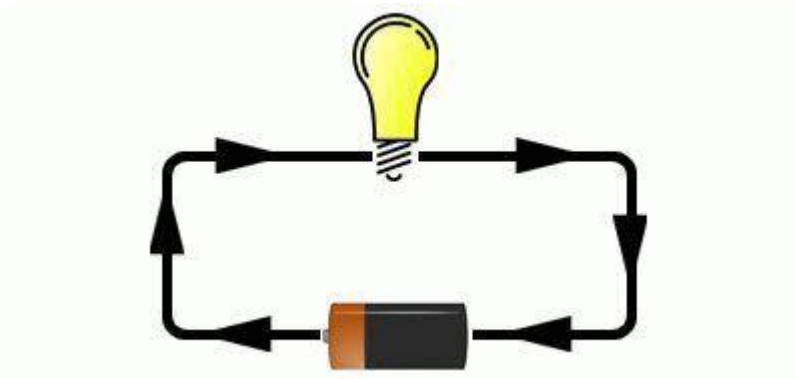


Рис.13.

Но вернёмся к электричеству: в 1745 году изобретена лейденская банка – первый в мире конденсатор, способный копить заряд. Обкладками служили листы олова, и диэлектриком – само стекло. И никак нельзя пройти мимо Джона Кантона, значительно усовершенствовавшего версор Гилберта. Новый прибор назвали электроскопом, и он позволял наблюдать как взаимодействие зарядов, так и приблизительную их количественную оценку. Устройство состояло из маленького деревянного шарика, на шёлковой нити подвешенного к крючку. При поднесении заряженного тела проявлялся эффект электростатической поляризации, за счёт чего объект притягивал к себе груз.

В дальнейшем деревянную бусину заменили на материал способный принимать заряд. Чтобы можно было определить и знак. Джон Кантон и по сей день считается первооткрывателем электростатической индукции, объяснённое

Эпинусом на основе теории дальнего действия, а эстафету перенимает Шарль Кулон. В 1784 году вооружённый знаниями всех предыдущих поколений при помощи крутильных весов физик даёт определение своему знаменитому закону. Впервые постоянный ток химической природы должен был получить в 1791 году Гальвани, но этого не произошло по сложившимся обстоятельствам. Сам учёный занимался вот чем:

1. Препарированная мёртвая лягушка начинала дёргаться под прикосновением металлических крючков. Это обычное оборудование для вивисекторов, и просто чудо, что эффект был замечен.

2. Повторяя опыты на диэлектриках, Гальвани установил, что эффект в этом случае не наблюдается никогда.

Из сделанной работы учёный вынес неправильный вывод о наличии некоего животного электричества. Но здесь за работу взялся великий Алессандро Вольта. Неизвестно, сколько именно лягушек замучил этот муж науки, но вывод был потрясающий: электричество, а именно, постоянный ток появляется при взаимодействии металлов с разными характеристиками через электролит – жидкости умершей твари. Так весной 1800 года появился первый в мире источник, называемый и по сей день Вольтовым столбом. Фактически это электрохимический прибор, где цинковая и медная пластина, погружены в электролит.

Поскольку открытие первоначально лежало в области физиологии, то проводящей жидкостью была солёная вода. Её и сегодня в экстренных ситуациях рекомендуют использовать вместо крови. А затем уже Волластон заменил солёную воду кислотой. Эти открытия подобно ядерному реактору зарядили энергией всех исследователей. Открытия стали расти как грибы, после тёплого осеннего дождя. Это и электролиз, и лампы накала, и электрический двигатель, и, конечно же, закон Ома для полной цепи, впервые открытый для постоянного тока. Можно сказать, что Георг вначале не достиг успеха, и положительному результату обязан только подсказкам Поггендорфа и термопаре, но это уже совсем другая история.

Постоянный ток в современном мире

Итак, чтобы прийти от простых опытов по электризации тел к постоянному току, человечеству потребовалось примерно 200 лет. А ещё через 200, 20 ноября на свет вышел первый процессор Пентиум IV. Неплохой рывок, верно? А при чем тут процессор? Он тоже питается постоянным током, как и весь системный блок в целом. Потребление электронного мозга составляет до 70 Вт. При питании от источника напряжением 3 В ток – более 20 А. В своё время автору обзора на предзащите диплома предъявили вопрос о невозможности такого положения дел, и нечего было ответить. Сегодня мы знаем, что контактов у процессора очень много, и результирующий ток действительно велик, но делится на множество ветвей. Недаром, к таким агрегатам выпускают кулеры на 50 и более Вт (мощность средней лампочки накала).

Итак, постоянный ток господствует в электронике. В зависимости от применяемого семейства микросхем полярность может быть как положительной, так и отрицательной. Вот почему номиналов в блоке питания достаточно много. От постоянного тока питаются и шаговые двигатели в жёстком диске или приводе для чтения оптических носителей. В общем и целом это обеспечивает лучший КПД. Да-да, любой двигатель, который может работать на постоянном токе, так и должен поступать для обеспечения максимальной производительности. И уже совсем иная история, что в промышленности повсеместно господствуют детища Николы Тесла (индукционные разновидности моторов).

Постоянный ток широко применяется в аккумуляторах, потому что может храниться в отличие от переменного. Строго говоря, запасается скорее напряжение, но в рассматриваемом контексте это можно считать словами синонимами. Потому что и заряд идёт постоянным током, и разряд также. До некоторого времени и лампочки накала питались тем же образом. Вообще, до эпохи Николы Тесла переменный ток не использовали. А это значит, что и двигатели, и прочее оборудование нуждалось в генераторах постоянного.

Постоянный ток часто используется в датчиках, иногда в виде импульсов. Это сложно понять, когда напряжение меняется. Какой же это постоянный ток?

где I - сила тока, q - величина заряда (количество электричества), t - время прохождения заряда.

Единица силы тока 1 Ампер - сила тока, когда через поперечное сечение проводника в 1 секунду проходит заряд в 1 Кулон.

Плотностью тока – сила тока, проходящая через единицу площади поверхности сечения проводника, перпендикулярной направлению скорости направленного движения электрических зарядов.

$$j = \frac{dI}{dS} \frac{A}{m^2}$$

где j - плотность тока, S - площадь сечения проводника.

Направление вектора плотности тока совпадает с направлением движения положительно заряженных частиц.

Электрическая сопротивление и проводимость проводников.

Физическая природа электрического сопротивления.

При движении свободных электронов в проводнике они сталкиваются на своем пути с положительными ионами, атомами и молекулами вещества, из которого выполнен проводник, и передают им часть своей энергии. При этом энергия движущихся электронов в результате столкновения их с атомами и молекулами частично выделяется и рассеивается в виде тепла, нагревающего проводник.

Ввиду того, что электроны, сталкиваясь с частицами проводника, преодолевают некоторое сопротивление движению, принято говорить, что проводники обладают электрическим сопротивлением. Если сопротивление проводника мало, он сравнительно слабо нагревается током; если сопротивление велико, проводник может раскалиться.

Провода, подводящие электрический ток к электрической плитке, почти не нагреваются, так как их сопротивление мало, а спираль плитки, обладающая большим сопротивлением, раскаляется докрасна. Еще сильнее нагревается нить электрической лампы.

За единицу сопротивления принят Ом. *Сопротивлением 1 Ом* обладает проводник, по которому проходит ток 1 А при разности потенциалов на его

концах (напряжении), равной 1 В. Эталоном сопротивления 1 Ом служит столбик ртути длиной 106,3 см и площадью поперечного сечения 1 мм² при температуре 0°С.

На практике часто сопротивления измеряют тысячами Ом — килоомами (кОм) или миллионами Ом — мегаомами (МОм). Сопротивление обозначают буквой R (r).

Проводимость.

Всякий проводник можно характеризовать не только его сопротивлением, но и так называемой проводимостью — способностью проводить электрический ток. Проводимость есть величина, обратная сопротивлению.

Единица проводимости называется сименсом (См). 1 См равен 1/1 Ом. Проводимость обозначают буквой G (g). Следовательно,

$$G = 1 / R \quad (4)$$

Удельное электрическое сопротивление и проводимость. Атомы разных веществ оказывают прохождению электрического тока неодинаковое сопротивление. О способности отдельных веществ проводить электрический ток можно судить по их удельному электрическому сопротивлению ρ .

За величину, характеризующую удельное сопротивление, обычно принимают сопротивление куба с ребром 1 м. Удельное электрическое сопротивление измеряют в Ом*м. Для суждения об электропроводности материалов пользуются также понятием *удельная электрическая проводимость* $\sigma = 1/\rho$.

Удельная электрическая проводимость измеряется в сименсах на метр (См/м) (проводимость куба с ребром 1м). Часто удельное электрическое сопротивление выражают в ом-сантиметрах (Ом*см), а удельную электрическую проводимость — в сименсах на сантиметр (См/см). При этом 1 Ом*см = 10⁻² Ом*м, а 1 См/см = 10² См/м.

Проводниковые материалы применяют, главным образом, в виде проволок, шин или лент, площадь поперечного сечения которых принято выражать в квадратных миллиметрах, а длину — в метрах.

Поэтому для удельного электрического сопротивления подобных

материалов и удельной электрической проводимости введены и другие единицы измерения: ρ измеряют в Ом*мм²/м (сопротивление проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 мм²), а σ — в См*м/мм² (проводимость проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 мм²).

Из металлов наиболее высокой электропроводностью обладают серебро и медь, так как структура их атомов позволяет легко передвигаться свободным электронам, затем следует золото, хром, алюминий, марганец, вольфрам и т. д. Хуже проводят ток железо и сталь.

Чистые металлы всегда проводят электрический ток лучше, чем их сплавы. Поэтому в электротехнике используют преимущественно очень чистую медь, содержащую только 0,05 % примесей. И наоборот, в тех случаях, когда необходим материал с высоким сопротивлением (для различных нагревательных приборов, реостатов и пр.), применяют специальные сплавы: константан, манганин, нихром, фехраль.

Следует отметить, что в технике, кроме металлических проводников, используют и неметаллические. К таким проводникам относится, например, уголь, из которого изготовляют щетки электрических машин, электроды для прожекторов и пр.

Проводниками электрического тока являются толща земли, живые ткани растений, животных и человека. Проводят электрический ток сырое дерево и многие другие изоляционные материалы во влажном состоянии.

Электрическое сопротивление проводника зависит не только от материала проводника, но и его длины l и площади поперечного сечения s . Электрическое сопротивление подобно сопротивлению, оказываемому движению воды в трубе, которое зависит от площади сечения трубы и ее длины.

Сопротивление прямолинейного проводника

$$R = \rho (l / s) \quad (5)$$

Если удельное сопротивление ρ выражено в Ом*мм /м, то для того чтобы получить сопротивление проводника в омах, длину его надо подставлять в формулу (5) в метрах, а площадь поперечного сечения — в квадратных миллиметрах.

Влияние температуры на электрическое сопротивление.

Электропроводность всех материалов зависит от их температуры. В металлических проводниках при нагревании размах и скорость колебаний атомов в кристаллической решетке металла увеличиваются, вследствие чего возрастает и сопротивление, которое они оказывают потоку электронов.

При охлаждении происходит обратное явление: беспорядочное колебательное движение атомов в узлах кристаллической решетки уменьшается, сопротивление их потоку электронов понижается и электропроводность проводника возрастает.

В природе, однако, имеются некоторые сплавы: фехраль, константан, манганин и др., у которых в определенном интервале температур электрическое сопротивление меняется сравнительно мало. Подобные сплавы применяют в технике для изготовления различных резисторов, используемых в электроизмерительных приборах и некоторых аппаратах для компенсации влияния температуры на их работу.

О степени изменения сопротивления проводников при изменении температуры судят по так называемому температурному коэффициенту сопротивления α . Этот коэффициент представляет собой относительное приращение сопротивления проводника при увеличении его температуры на 1 °С.

Сопротивление металлического проводника R_t при любой температуре t

$$R_t = R_0 [1 + \alpha (t - t_0)]$$

где R_0 — сопротивление проводника при некоторой начальной температуре t_0 (обычно при + 20 °С), которое может быть подсчитано по формуле (5);

$t - t_0$ — изменение температуры.

Свойство металлических проводников увеличивать свое сопротивление при нагревании часто используют в современной технике для измерения температуры. Например, при испытаниях тяговых двигателей после ремонта температуру нагрева их обмоток определяют измерением их сопротивления в холодном состоянии и после работы под нагрузкой в течение установленного

периода (обычно в течение 1 ч).

Исследуя свойства металлов при глубоком (очень сильном) охлаждении, ученые обнаружили замечательное явление: вблизи абсолютного нуля ($-273,16$ °С) некоторые металлы почти полностью утрачивают электрическое сопротивление.

Они становятся идеальными проводниками, способными длительное время пропускать ток по замкнутой цепи без всякого воздействия источника электрической энергии. Это явление названо сверхпроводимостью.

В настоящее время созданы опытные образцы линий электропередачи и электрических машин, в которых используется явление сверхпроводимости. Такие машины имеют значительно меньшую массу и габаритные размеры по сравнению с машинами общего назначения и работают с очень высоким коэффициентом полезного действия.

Линии электропередачи в этом случае можно выполнить из проводов с очень малой площадью поперечного сечения. В перспективе в электротехнике будет все больше и больше использоваться это явление.

Работа и мощность постоянного тока.

Экспериментально установлено, что количество теплоты, выделившееся при прохождении электрического тока по проводнику, прямо пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени, в течение которого шел ток. Это утверждение носит название закона Джоуля-Ленца.

Вывести данную зависимость можно и из теоретических соображений. Силы, перемещающие заряды по проводнику, совершают работу. Эту работу называют работой тока. Работа электрического тока на участке цепи, как следует из определения напряжения, U , где q — электрический заряд, проходящий по участку цепи, а напряжение на этом участке.

Учитывая, что I — сила тока в проводнике, а t — время прохождения электрического тока, для работы тока получим. Эта формула для работы справедлива в любом случае при любом действии электрического тока (тепловом, механическом, химическом и т. д.).

Если сопротивление однородного участка цепи, то, используя закон Ома

для участка цепи, можно получить формулу для расчета работы тока.

Если единственной причиной электрического сопротивления являются неупругие столкновения заряженных частиц с частицами окружающей среды, то работа электрического поля по поддержанию электрического тока равна количеству теплоты, выделяющемуся в проводнике при прохождении электрического тока:

На практике проще использовать ту формулу, в которой больше сохраняющихся величин. Если соединение параллельное, то на резисторах одинаковое напряжение, если последовательное соединение, то одинаковой оказывается сила тока.

Единица работы электрического тока в СИ — джоуль (Дж). 1 Дж представляет работу тока, эквивалентную механической работе в 1 Дж.

Скорость совершения работы тока на данном участке цепи характеризует **мощность тока**. Мощность тока определяют по формуле или . Данная формула также носит универсальный характер и может применяться не только для теплового действия тока.

Используя закон Ома для участка цепи, можно записать иначе формулу для мощности тока:

В этом случае речь идет о тепловой мощности. Единица мощности тока — Ватт: $1 \text{ Вт} = \text{Дж/с}$. Отсюда $\text{Дж} = \text{Втс}$.

Кроме того, применяют внесистемные единицы: киловатт-час или гектоватт-час: $1 \text{ кВтч} = 3,6106 \text{ Дж} = 3,6 \text{ МДж}$; $1 \text{ гВтч} = 3,6105 \text{ Дж} = 360 \text{ кДж}$.

Прямое применение закона Джоуля-Ленца невозможно, если сила тока изменяется со временем. В этом случае для поиска выделившегося тепла остается воспользоваться интегрированием (нахождением площади под графиком зависимости мощности от времени).

Если цепь содержит конденсаторы и требуется найти тепло, выделившееся на резисторах при коммутации (замыкании/размыкании ключей), то удобно применить закон сохранения энергии с учетом работы источников тока.

Для измерения мощности тока существуют специальные приборы — ваттметры.

На большинстве электрических приборов указываются значения их мощности. Но надо понимать, что на эти значения устройства выходят только при подсоединении к расчетному (номинальному) напряжению. Здесь синонимом слова номинальное выступает проектное, расчетное, то есть то, в котором устройство долго будет работать в нормальном режиме. Соответственно, такие значения мощности, силы тока тоже называют номинальными.

Например, лампочка, на которой написано 60 Вт, 220 В, будет потреблять мощность 60 Вт при включении в сеть с напряжением 220 В. Она будет гореть и при меньшем напряжении, но только более тускло, потребляя меньшую мощность. Какую именно, можно рассчитать, зная поданное напряжение и сопротивление лампы.

4.5. Тепловое действие электрического тока.

Выделение тепла при прохождении электрического тока.

При прохождении электрического тока по проводнику в результате столкновений свободных электронов с его атомами и ионами проводник нагревается.

Количество тепла, выделяемого в проводнике при прохождении электрического тока, определяется законом Ленца — Джоуля. Его формулируют следующим образом. Количество выделенного тепла Q равно произведению квадрата силы тока I^2 , сопротивления проводника R и времени t прохождения тока через проводник:

$$Q = I^2 R t \quad (34)$$

Если в этой формуле силу тока брать в амперах, сопротивление в омах, а время в секундах, то получим количество выделенного тепла в джоулях. Из сравнения формул (29) и (34) следует, что количество выделенного тепла равно количеству электрической энергии, полученной данным проводником при

прохождении по нему тока.

Допустимая сила и плотность тока.

Превращение электрической энергии в тепловую нашло широкое применение в технике. Оно происходит, например, в различных производственных и бытовых электронагревательных приборах (электрических печах, электроплитах, электрических паяльниках и пр.), в электрических лампах накаливания, аппаратах для электрической сварки и пр.

Однако во многих электрических устройствах, например, в электрических машинах и аппаратах, электрических проводах и т. д., превращение электрической энергии в тепло вредно, так как это тепло не только не используется, а наоборот, ухудшает работу этих машин и аппаратов, а в некоторых случаях может вызвать повреждения и аварии.

Каждый проводник в зависимости от условий, в которых он находится, может пропускать, не перегреваясь, ток силой, не превышающей некоторое допустимое значение. Для определения токовой нагрузки проводов часто пользуются понятием допустимой плотности тока J (сила тока I , приходящаяся на 1 мм^2 площади s поперечного сечения проводника):

$$J = I/s \quad (35)$$

Допустимая плотность тока зависит от материала провода (медь или алюминий), вида применяемой изоляции, условий охлаждения, площади поперечного сечения и пр. Например, допустимая плотность тока в проводах обмоток электрических машин не должна превышать $3\text{—}6 \text{ А/мм}^2$, в нити осветительной электрической лампы — 15 А/мм^2 .

В проводах силовых и осветительных сетей плотность тока может быть различной в зависимости от площади поперечного сечения провода и его изоляции. Например, для медных проводов с резиновой изоляцией и площадью поперечного сечения 4 мм^2 допускается плотность тока $10,2 \text{ А/мм}^2$, а 50 мм^2 — только $4,3 \text{ А/мм}^2$; для неизолированных проводов тех же площадей сечения — $12,5$ и $5,6 \text{ А/мм}^2$.

Уменьшение допустимой плотности тока при увеличении площади поперечного сечения провода объясняется тем, что в проводах с большей

площадью сечения отвод тепла от внутренних слоев затруднен, так как сами они окружены нагретыми слоями. Для неизолированных проводов допустается большая температура нагрева, чем для изолированных.

Превышение допустимого значения силы тока в проводнике может вызвать чрезмерное повышение температуры, в результате этого изоляция проводов электродвигателей, генераторов и электрических сетей обугливается и даже горит, что может привести к короткому замыканию и пожару. Неизолированные же провода могут при высокой температуре расплавиться и оборваться.

Для того чтобы предотвратить недопустимое увеличение силы тока, во всех электрических установках должны приниматься меры для автоматического отключения от источников электрической энергии тех приемников или участков цепи, в которых имеет место перегрузка или короткое замыкание.

Для этой цели в технике широко используют плавкие предохранители, автоматические выключатели и другие устройства.

Нагрев в переходном сопротивлении.

Повышенный нагрев проводника, как следует из закона Ленца — Джоуля, может происходить не только вследствие прохождения по нему тока большой силы, но и вследствие повышения сопротивления проводника. Поэтому для надежной работы электрических установок большое значение имеет значение сопротивления в месте соединения отдельных проводников.

При неплотном электрическом контакте и плохом соединении проводников электрическое сопротивление в этих местах (так называемое переходное сопротивление электрического контакта) сильно возрастает, и здесь происходит усиленное выделение тепла.

В результате место неплотного соединения проводников будет представлять собой опасность в пожарном отношении, а значительный нагрев может привести к полному выгоранию плохо соединенных проводников. Во избежание этого при соединении проводов на э. п. с. и тепловозах концы их тщательно зачищают, облуживают и впаивают в кабельные наконечники, которые надежно прикрепляют болтами к зажимам электрических машин и

аппаратов. Специальные меры принимают и для уменьшения переходного сопротивления между контактами электрических аппаратов, осуществляющих включение и выключение тока.

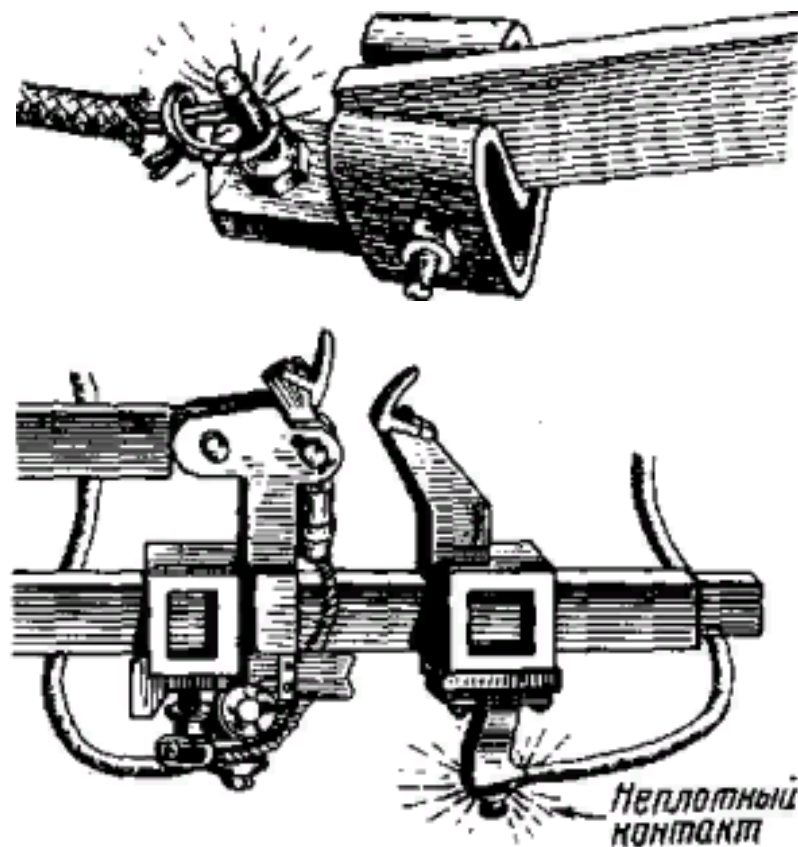


Рис. 14. Схемы выделения тепла и возникновения искрения при неплотном электрическом контакте

Понятие о потерях электроэнергии.

Потери электроэнергии в электрических сетях неминуемы, поэтому важно чтобы они не превышали экономически обоснованного уровня. Превышение норм технологического расхода говорит о возникших проблемах. Чтобы исправить ситуацию необходимо установить причины возникновения нецелевых затрат и выбрать способы их снижения. Собранная в статье информация описывает многие аспекты этой непростой задачи.

Виды и структура потерь

Под потерями подразумевается разница между отпущенной потребителям электроэнергией и фактически поступившей к ним. Для нормирования потерь и

расчетов их фактической величины, была принята следующая классификация:

- Технологический фактор. Он напрямую зависит от характерных физических процессов, и может меняться под воздействием нагрузочной составляющей, условно-постоянных затрат, а также климатических условий.
- Расходы, затрачиваемые на эксплуатацию вспомогательного оборудования и обеспечение необходимых условий для работы техперсонала.
- Коммерческая составляющая. К данной категории относятся погрешности приборов учета, а также другие факторы, вызывающие недоучет электроэнергии.

Ниже представлен среднестатистический график потерь типовой электрокомпании.

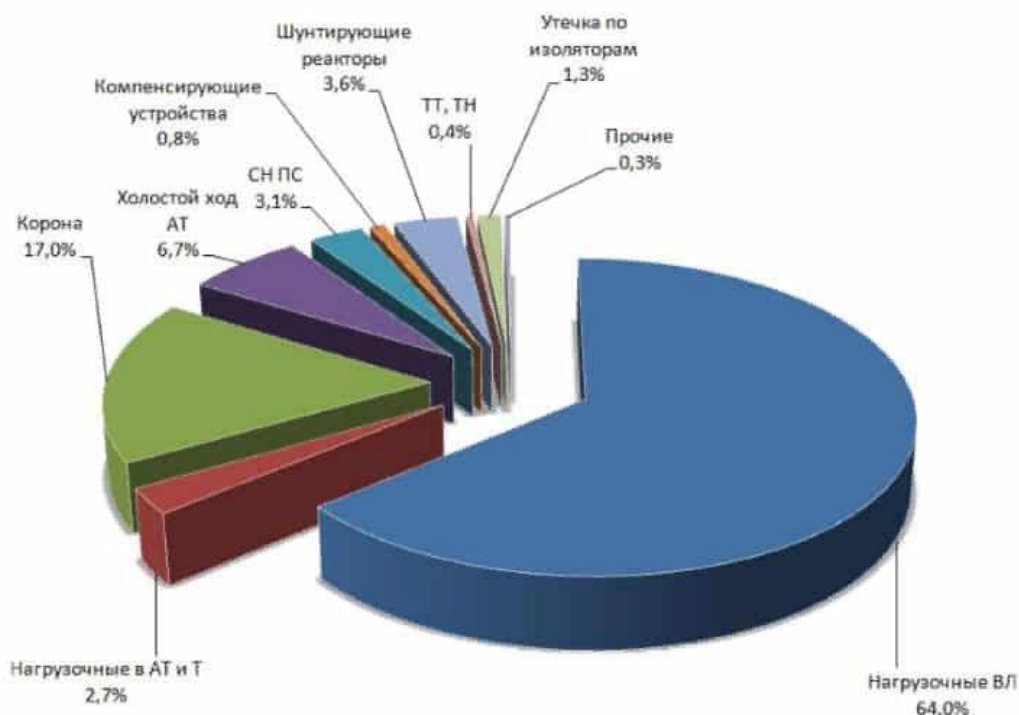


Рис.15. Примерная структура потерь

Как видно из графика наибольшие расходы связаны с передачей по воздушным линиям (ЛЭП), это составляет около 64% от общего числа потерь.

На втором месте эффект коронирования (ионизация воздуха рядом с проводами ВЛ и, как следствие, возникновение разрядных токов между ними) – 17%.

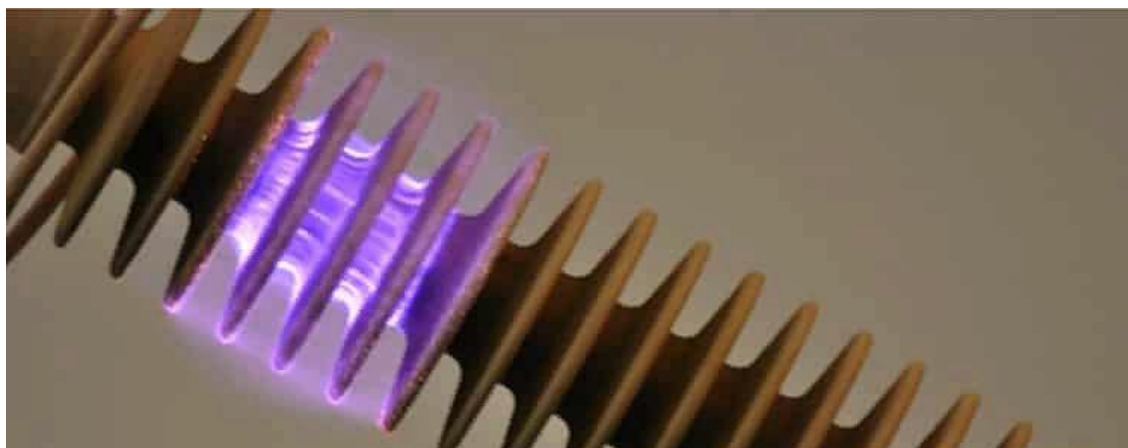


Рис.16. Коронный разряд на изоляторе ЛЭП

Исходя из представленного графика, можно констатировать, что наибольший процент нецелевых расходов приходится на технологический фактор.

Основные причины потерь электроэнергии

Разобравшись со структурой, перейдем к причинам, вызывающим нецелевой расход в каждой из перечисленных выше категорий. Начнем с составляющих технологического фактора:

1. Нагрузочные потери, они возникают в ЛЭП, оборудовании и различных элементах электросетей. Такие расходы напрямую зависят от суммарной нагрузки. В данную составляющую входят:

- Потери в ЛЭП, они напрямую связаны с силой тока. Именно поэтому при передаче электроэнергии на большие расстояния используется принцип повышения в несколько раз, что способствует пропорциональному уменьшению тока, соответственно, и затрат.

- Расход в трансформаторах, имеющий магнитную и электрическую природу. В качестве примера ниже представлена таблица, в которой приводятся данные затрат на трансформаторах напряжения подстанций в сетях 10 кВ.

Таблица №1. Потери в силовых трансформаторах подстанций

Номинальная мощность, кВА	Номинальное напряжение ВН/НН, кВ	Напряжение КЗ, %	Потери ХХ, Вт	Потери КЗ, 75°С, Вт	Уровень шума, дВ
250	10/0,4	6	730	3400	53
315	10/0,4	6	360	5000	55
400	10/0,4	6	1000	5700	55
500	10/0,4	6	1150	6100	56
630	10/0,4	6	1400	6600	56
800	10/0,4	6	1800	7700	58
1000	10/0,4	6	1950	8800	59
1250	10/0,4	6	2300	10500	60
1600	10/0,4	6	2750	12700	61
2000	10/0,4	6	3200	15500	62
2500	10/0,4	6	4200	19000	64

Нецелевой расход в других элементах не входит в данную категорию, ввиду сложностей таких расчетов и незначительного объема затрат. Для этого предусмотрена следующая составляющая.

2. Категория условно-постоянных расходов. В нее входят затраты, связанные со штатной эксплуатацией электрооборудования, к таковым относятся:

- Холостная работа силовых установок.
- Затраты в оборудовании, обеспечивающем компенсацию реактивной нагрузки.
- Другие виды затрат в различных устройствах, характеристики которых не зависят от нагрузки. В качестве примера можно привести силовую изоляцию, приборы учета в сетях 0,38 кВ, змерительные трансформаторы тока, ограничители перенапряжения и т.д.

3. Климатическая составляющая. Нецелевой расход электроэнергии может быть связан с климатическими условиями характерными для той местности, где проходят ЛЭП. В сетях 6 кВ и выше от этого зависит величина тока утечки в изоляторах. В магистралях от 110 кВ большая доля затрат приходится на коронные разряды, возникновению которых способствует влажность воздуха. Помимо этого в холодное время года для нашего климата характерно такое явление, как обледенение на проводах высоковольтных линий, а также обычных ЛЭП.



Рис.17. Гололед на ЛЭП

Учитывая последний фактор, следует учитывать затраты электроэнергии на расплавление льда.

Расходы на поддержку работы подстанций

К данной категории отнесены затраты электрической энергии на функционирование вспомогательных устройств. Такое оборудование необходимо для нормальной эксплуатации основных узлов, отвечающих за преобразование электроэнергии и ее распределение. Фиксация затрат осуществляется приборами учета. Приведем список основных потребителей, относящихся к данной категории:

- системы вентиляции и охлаждения трансформаторного оборудования;
- отопление и вентиляция технологического помещения, а также внутренние осветительные приборы;
- освещение прилегающих к подстанциям территорий;
- зарядное оборудование АКБ;
- оперативные цепи и системы контроля и управления;
- системы обогрева наружного оборудования, например, модули

управления воздушными выключателями;

- различные виды компрессорного оборудования;
- вспомогательные механизмы;
- оборудование для ремонтных работ, аппаратура связи, а также

другие приспособления.

Коммерческая составляющая

Под данными затратами подразумевается сальдо между абсолютными (фактическими) и техническими потерями. В идеале такая разница должна стремиться к нулю, но на практике это не реально. В первую очередь это связано с особенностями приборов учета отпущенной электроэнергии и электросчетчиков, установленных у конечных потребителей. Речь идет о погрешности. Существует ряд конкретных мероприятий для уменьшения потерь такого вида.

К данной составляющей также относятся ошибки в счетах, выставленных потребителю и хищения электроэнергии. В первом случае подобная ситуация может возникнуть по следующим причинам:

- в договоре на поставку электроэнергии указана неполная или некорректная информация о потребителе;
- неправильно указанный тариф;
- отсутствие контроля за данными приборов учета;
- ошибки, связанные с ранее откорректированными счетами и

т.д.

Что касается хищений, то эта проблема имеет место во всех странах. Как правило, такими противозаконными действиями занимаются недобросовестные бытовые потребители. Заметим, что иногда возникают инциденты и с предприятиями, но такие случаи довольно редки, поэтому не являются определяющими. Характерно, что пик хищений приходится на холодное время года, причем в тех регионах, где имеются проблемы с теплоснабжением.

Различают три способа хищения (занижения показаний прибора учета):

1. Механический. Под ним подразумевается соответствующее

вмешательство в работу прибора. Это может быть притормаживание вращения диска путем прямого механического воздействия, изменение положения электросчетчика, путем его наклона на 45° (для той же цели). Иногда применяется более варварский способ, а именно, срываются пломбы, и производится разбалансирование механизма. Опытный специалист моментально обнаружит механическое вмешательство.

2. **Электрический.** Это может быть как незаконное подключение к воздушной линии путем «наброса», метод инвестирования фазы тока нагрузки, а также использование специальных приборов для его полной или частичной компенсации. Помимо этого есть варианты с шунтированием токовой цепи прибора учета или переключение фазы и нуля.

3. **Магнитный.** При данном способе к корпусу индукционного прибора учета подносится неодимовый магнит.



Рис.18.

Магнит может воздействовать только некоторые старые модели электросчетчиков

Практически все современные приборы учета «обмануть» вышеописанными способами не удастся. Мало того, подобные попытки

вмешательства могут быть зафиксированы устройством и занесены в память, что приведет к печальным последствиям.

Понятие норматива потерь

Под данным термином подразумевается установка экономически обоснованных критериев нецелевого расхода за определенный период. При нормировании учитываются все составляющие. Каждая из них тщательно анализируется отдельно. По итогу производятся вычисления с учетом фактического (абсолютного) уровня затрат за прошедший период и анализа различных возможностей, позволяющих реализовать выявленные резервы для снижения потерь. То есть, нормативы не статичны, а регулярно пересматриваются.

Под абсолютным уровнем затрат в данном случае подразумевается сальдо между переданной электроэнергией и техническими (относительными) потерями. Нормативы технологических потерь определяются путем соответствующих вычислений.

Кто платит за потери электричества?

Все зависит от определяющих критериев. Если речь идет о технологических факторах и расходах на поддержку работы сопутствующего оборудования, то оплата потерь закладывается в тарифы для потребителей.

Совсем по иному обстоит дело с коммерческой составляющей, при превышении заложенной нормы потерь, вся экономическая нагрузка считается расходами компании, осуществляющей отпуск электроэнергии потребителям.

Способы уменьшения потерь в электрических сетях

Снизить затраты можно путем оптимизации технической и коммерческой составляющей. В первом случае следует принять следующие меры:

- Оптимизация схемы и режима работы электросети.
- Исследование статической устойчивости и выделение мощных узлов нагрузки.
- Снижение суммарной мощности за счет реактивной составляющей. В результате доля активной мощности увеличится, что позитивно отразится на борьбе с потерями.

- Оптимизация нагрузки трансформаторов.
- Модернизация оборудования.
- Различные методы выравнивания нагрузки. Например, это можно сделать, введя многотарифную систему оплаты, в которой в часы максимальной нагрузки повышенная стоимость кВт/ч. Это позволит существенно потребление электроэнергии в определенные периоды суток, в результате фактическое напряжение не будет «проседать» ниже допустимых норм.

Уменьшить коммерческие затраты можно следующим образом:

- регулярный поиск несанкционированных подключений;
- создание или расширение подразделений, осуществляющих контроль;
- проверка показаний;
- автоматизация сбора и обработки данных.

Методика и пример расчета потерь электроэнергии

На практике применяют следующие методики для определения потерь:

- проведение оперативных вычислений;
- суточный критерий;
- вычисление средних нагрузок;
- анализ наибольших потерь передаваемой мощности в разрезе суток-часов;
- обращение к обобщенным данным.

Полную информацию по каждой из представленных выше методик, можно найти в нормативных документах.

В завершении приведем пример вычисления затрат в силовом трансформаторе ТМ 630-6-0,4. Формула для расчета и ее описание приведены ниже, она подходит для большинства видов подобных устройств.

$\Delta W_T = \Delta W_{xx} + (\Delta W_H^1 \times W_T / 100)$, кВт*час, где
 $\Delta W_{xx} = \Delta P_{xx} \times T_o \times (U_1 / U_{НОМ})^2$ - потери холостого хода силового трансформатора, кВт*час;
 $\Delta W_H^1 = (\Delta W_H / W_T) \times 100\%$ - относительные нагрузочные потери силового трансформатора, %;
 $\Delta W_H = K_K \times \Delta P_{cp} \times T_p \times K_\phi^2$ - нагрузочные потери силового тр-ра, кВт*час;
 $K_\phi^2 = (1 + 2K_3) / 3K_3$ — квадрат коэффициента формы графика за расчетный период, у.е.;
 $K_3 = [W_T / (S_n \times T_p \times \cos\phi)] \times 10^{-3}$ - коэффициент загрузки тр-ра (заполнения графика), у.е.;
 $\Delta P_{cp} = 3 \times I_{cp}^2 \times R \times 10^{-3}$ - потери мощности в силовом тр-ре, кВт;
 $I_{cp} = W_T / (\sqrt{3} \times U_{cp} \times T_p \times \cos\phi)$ – средняя нагрузка за расчетный период, А;
 $R = (\Delta P_{кз} \times U_{НОМ}^2 / S_{НОМ}^2) \times 10^{-3}$ - активное сопротивление силового тр-ра, Ом;
 K_K — коэффициент, учитывающий различие конфигураций графиков активной и реактивной нагрузки (справочная величина, принимается равным 0,99), у.е.

Рис.19. Расчет потерь в силовом трансформаторе

Для понимания процесса следует ознакомиться с основными характеристиками трансформатора ТМ 630-6-0,4.

Sнт	номинальная мощность трансформатора, МВА;	0,63
Uном	номинальное напряжение, кВ;	6
Wт	потребленная активная электроэнергия за месяц, кВт*час;	37108
ΔРхх	потери мощности холостого хода трансформатора, кВт;	1,31
ΔРкз	потери мощности короткого замыкания, кВт;	7,6
Тр	число часов работы трансформатора под нагрузкой за расчетный период, час;	720
То	время присоединения трансформатора за расчетный период к сети, час;	720
Кк	коэффициент различия конфигураций,	0,99
cosφ	средневзвешенный коэффициент мощности для трансформатора.	0,9

Теперь переходим к расчету.

$\Delta W_{\text{хх}} = 1001,0$ кВт/ч; $K_{\phi}^2 = 4,33$; $K_{\Sigma} = 0,09$; $R = 0,69$ Ом;

$\Delta W_{\text{н}} = 182,20$ кВт/ч; $I_{\text{ср}} = 5,34$; $\Delta P_{\text{ср}} = 0,06$;

$\Delta W_{\text{н}}^1 = 0,491$, в результате расчетное значение будет равно $1001,0$ кВт/час $+0,49\%$

4.6. Электромагнетизм и электромагнитная индукция.

Основные магнитные явления.

С древних времен было известно, что некоторые виды железной руды обладают свойством притягивать к себе железо. Такую руду называли магнитом.

Если поднести к магниту железный ключ, можно заметить, что он становится магнитом. К ключу притягиваются железные гвозди и другие железные предметы. При удалении магнита от железа оно размагничивается. Аналогичные явления наблюдаются у не закаленной стали. После удаления магнита закаленная сталь остается намагниченной, поэтому из этой стали можно делать постоянные магниты.

Если положить на слой железных опилок магнит и затем приподнять его, окажется, что железные опилки наиболее густо притянулись к концам магнита и, чем дальше от конца магнита, тем слабее притяжение. Места магнита, обладающие наиболее сильными магнитными действиями, называют полюсами. Прямую, соединяющую полюса, называют осью магнита.

Однако магнит притягивает не все металлы. Если насыпать вместе железные и медные опилки, магнит притянет к себе только железные опилки. Наиболее заметными магнитными свойствами обладают сталь, железо и некоторые сплавы, которые применяют в технике в качестве магнитных материалов.

Если намагниченную стальную стрелку закрепить на острие подставки, стрелка установится так, что один ее полюс указывает приблизительно на север, а другой — на юг. Полюс, обращенный на север, стали называть северным

магнитным полюсом, а обращенный на юг — южным. Поднося к северному полюсу магнитной стрелки поочередно полюсы магнита, заметим, что северный полюс стрелки будет отталкиваться от северного полюса магнита, а к южному притягиваться. Южный полюс стрелки отталкивается от южного полюса магнита и притягивается к северному. На основании этих опытов можно сделать вывод, что разноименные магнитные полюса притягиваются друг к другу, а одноименные — отталкиваются.

Свое влияние магнит оказывает не только на подносимые к нему предметы, но и на окружающее его пространство. Если вокруг линейного магнита расположить маленькие магнитные стрелки, увидим, что по отношению к магниту они расположились по-разному. Убрав магнит, увидим, что все стрелки устанавливаются приблизительно в направлении север— юг. Следовательно, присутствие магнита меняет свойства пространства вокруг него.

Пространство, в котором обнаруживается действие магнита на магнитную стрелку, называют магнитным полем, а линию, по которой устанавливают ось магнитной стрелки, называют магнитной силовой линией. Принято считать, что силовые линии выходят из северного полюса и входят в южный.

Магнитное поле электрического тока.

Магнитные и электрические явления имеют тесную связь между собой. В этом легко убедиться на следующем опыте. Установив над магнитной стрелкой параллельно ей провод и пропустив по нему электрический ток, заметим, что стрелка отклонится от своего прежнего положения. Но как только прекращается ток, стрелка снова возвращается в первоначальное положение.

Из этого опыта можно сделать вывод, что при прохождении тока по проводнику вокруг последнего образуется магнитное поле: магнитная стрелка отклоняется током.

Если вокруг проводника, по которому проходит электрический ток, поместить несколько магнитных стрелок, все стрелки будут поворачиваться и устанавливаться по направлению касательных к окружностям: силовые линии магнитного поля прямолинейного тока представляют собой замкнутые концентрические окружности, расположенные в плоскостях, перпендикулярных

направлению тока. При изменении направления тока в проводнике все магнитные стрелки повернутся и станут в противоположном направлении.

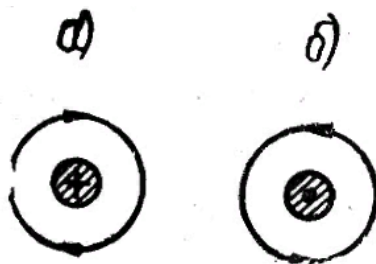


Рис. 21. Направление силовых линий.

а — электрический ток направлен от нас; *б* - электрический ток направлен на нас.

Для определения направления магнитных силовых линий пользуются правилом «винта», т. е. силовые линии направлены так, как движется головка винта, если ток направлен так, как движется сам винт. Условно направление магнитного поля около проводника принято изображать следующим образом. Сечение проводника, по которому идет ток, изображается в виде кружка. Если внутри этого кружка поставить точку, это будет означать, что ток идет к нам (как будто видим острие летящей стрелы). И, наоборот, крестик в кружке обозначает, что ток идет от нас.

Соленоидом называют свитый спиралью проводник, по которому пропущен электрический ток. Если соленоид приблизить к магнитной стрелке, увидим, что один конец соленоида притягивает южный, а другой — северный полюс. Следовательно, соленоид при прохождении по нему тока по своим магнитным свойствам подобен прямому магниту. Направление магнитных силовых линий и полюсов соленоида определяют с помощью «правила винта».

Если внутрь соленоида ввести сердечник из мягкого железа, а соленоид значительно отодвинуть от магнитной стрелки, стрелка компаса все же повернется. Это говорит о том, что железный сердечник усиливает магнитное действие соленоида.

Электромагнит. Соленоид, внутри которого находится стальной

сердечник, называют электромагнитом. Электромагниты широко применяют в технике. С их помощью создаются магнитные поля в электрических генераторах, электроизмерительных приборах, реле и т. д.

Магнитная проницаемость.

Способность любого материала намагничиваться в той или другой степени определяется его магнитной проницаемостью. Магнитная проницаемость ферромагнитных материалов различна и превышает магнитную проницаемость вакуума. Число, показывающее, во сколько раз магнитная проницаемость ферромагнитного материала больше магнитной проницаемости вакуума, называют *относительной магнитной проницаемостью*.

Пропуская ток по катушке с сердечником, создаем магнитное поле. Следовательно, сердечник катушки намагничивается. Чем больше сила тока и количество витков в катушке, тем больше намагничивается сердечник. Значит, величина намагничивающей силы равна произведению силы тока на количество витков проводника в катушке.

Напряженность.

Магнитное поле, создаваемое проводником при прохождении по нему тока, характеризуется напряженностью, которую определяют при делении намагничивающей силы на длину, катушки и обозначают 1 а/м . Однако в практике обычно применяют другую единицу измерения, в **80 раз** большую, чем 1 а/м , называемую *эрстедом*.

Магнитная индукция.

Наряду с напряженностью магнитное поле характеризуется магнитной индукцией и магнитным потоком. Магнитная индукция характеризуется количеством магнитных силовых линий, приходящихся на единицу площади намагниченного материала, и измеряется в вб/м^2 . Величину в **10 000 раз** меньше 1 вб/м^2 называют *гс*.

Под магнитным потоком, проходящим через площадь, перпендикулярную магнитным линиям, подразумевают произведение магнитной индукции на площадь. Магнитный поток измеряют в *веберах (вб)* или *максвеллах (мкс)*. $1 \text{ мкс} = 0,000\ 000\ 01 \text{ вб}$.

Проводник с током в магнитном поле.

Если проводник электрической цепи, по которой идет ток, поместить в магнитное поле подковообразного магнита, проводник с током придет в движение. Убрав магнит, увидим, что проводник не движется. Следовательно, со стороны магнитного поля на проводник с током действует сила.

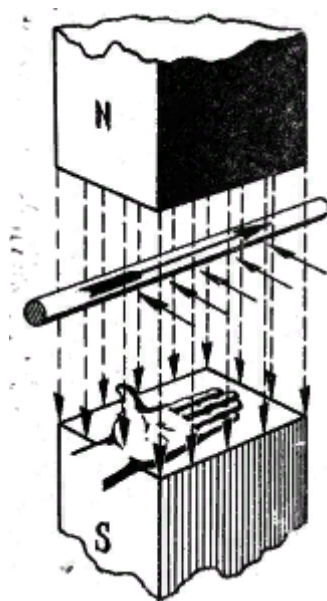


Рис. 22. Направление движения проводника с током.

Изменяя направление тока или направление магнитного поля, замечаем, что направление движений проводника также меняется. Иными словами, меняется направление силы, действующей на проводник.

Для определения направления движения проводника с током в магнитном поле (направление силы, действующей на проводник), применяют правило левой руки, которое гласит: *расположив левую руку так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь, а направление вытянутых пальцев показывало направление тока, тогда отогнутый большой палец покажет направление движения проводника с током.*

Электродвигатель постоянного тока.

Поместим в магнитное поле подковообразного магнита прямоугольный виток проволоки (рамку) и пустим по нему ток. В частях проводника **AB** и **CD** ток имеет разные направления, поэтому участок проводника **AB** движется от нас

за рисунок, а участок CD — к нам. Весь проводник повернется и установится так, что его плоскость будет перпендикулярна пронизывающим его магнитным силовым линиям. Если теперь из отдельных соединенных между собой проводников набрать катушку, установить ее в магнитном поле подковообразного магнита так, чтобы плоскость ее витков совпала с направлением силовых линий, и пустить по проводникам ток, катушка повернется и остановится в таком положении, когда плоскость ее витков окажется перпендикулярной направлению силовых линий. При изменении направления тока в проводниках они поворачиваются в магнитном поле на 180° . Чтобы повернуть проводники еще раз на 180° , нужно изменить направление тока в них в тот момент, когда они прошли уже положение равновесия.

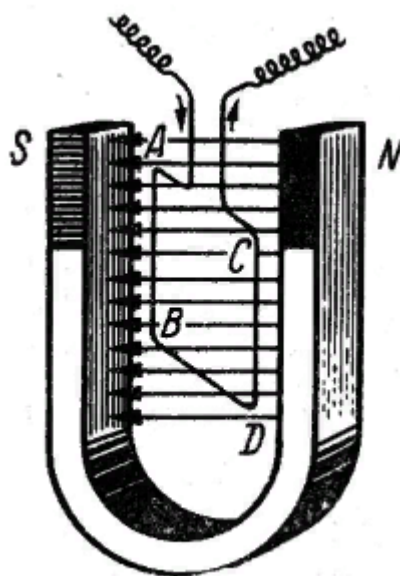


Рис. 23.

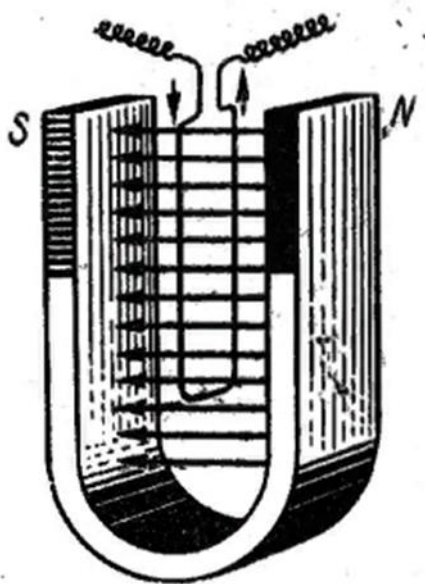


Рис. 24.

Следовательно, если бы удалось придумать приспособление, позволяющее в необходимый момент менять направление тока в проводниках (катушке), проводники стали бы вращаться в магнитном поле до тех пор, пока в них проходил бы ток.

Для автоматического изменения направления тока применяют коллектор, который состоит из двух полуколец, укрепленных на той же оси, на которой находятся проводники. Ток к полукольцам подводится при помощи двух пластинок, называемых щетками, которые касаются полуколец. При вращении проводников вместе с ними вращаются и укрепленные на оси полукольца.

Магнитное поле действует на проводники с наибольшей силой, если плоскость их расположения идет вдоль силовых линий магнитного поля. Когда эта плоскость перпендикулярна силовым линиям, катушка вращается только по инерции. Следовательно, вращение проводников осуществляется толчками. Чтобы обеспечить равномерное вращение в электродвигателях, проводники располагают не в одной плоскости, а по окружности цилиндра. Система таких проводников, расположенных в определенном порядке на стальном цилиндре, составляет якорь электродвигателя, который вращается в магнитном поле, создаваемом сильным электромагнитом, получающим ток от того же источника, что и обмотка якоря.

Электромагнитная индукция.

Мы уже установили, что ток производит магнитное действие: магнитная стрелка отклоняется под влиянием тока, проходящего по проводнику; железный стержень, помещенный внутри катушки с током, намагничивается; проводник с током, находясь в магнитном поле, приходит в движение.

Однако возможным оказывается обратное действие. При некоторых условиях магнитное поле может возбуждать электрический ток. При движении проводника в магнитном поле или изменении магнитного потока вокруг него в проводнике индуцируется (наводится) электродвижущая сила (э.д.с.), под действием которой в замкнутом проводнике образуется электрический ток. Было установлено, что электрический ток возникает в проводнике, если проводник и магнит движутся относительно друг друга. Но индукционный ток возникает и в проводнике только при условии, что проводник при своем движении пересекает магнитные силовые линии. Если проводник движется вдоль силовых линий, не пересекая их, ток в нем не возникает. Индукционный ток возникает также в том случае, если вокруг проводника изменяется величина магнитного потока.

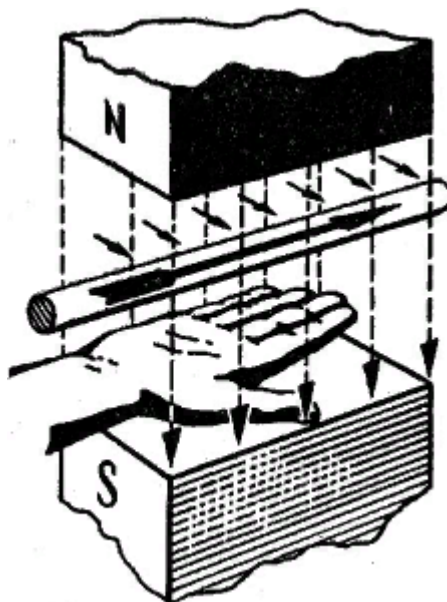


Рис. 25. Направление движения проводника в магнитном поле.

Возникновение электрического тока в замкнутом проводнике при пересечении им магнитных силовых линий называют электромагнитной

индукцией, возникающая электродвижущая сила (э.д.с)—индукционной, а ток — индукционным.

Направление индукционного тока определяют по правилу правой руки, которое заключается в следующем: *четыре пальца правой руки укажут направление индукционного тока, если ладонь правой руки расположись так, чтобы магнитные силовые линии входили в нее, а большой палец указывал направление движения проводника в магнитном поле.*

Самоиндукция.

При замыкании и размыкании электрической цепи вокруг проводника создается и исчезает магнитное поле. Изменяющееся магнитное поле пересекает проводник и создает в нем электродвижущую силу самоиндукции — э.д.с. самоиндукции. При всяком изменении «собственного» магнитного поля проводника он пересекается «собственными магнитными» линиями и в нем возникает э.д.с. самоиндукции.

Индуктивность электрической цепи измеряется в *генри (гн)*. Проводник обладает индуктивностью в *1 гн*, если при равномерном изменении тока в проводнике на *1 а* в *1 сек* в нем наводится э.д.с. самоиндукции, равная *1 в*.

Направление э.д.с. индукции и э.д.с. самоиндукции определяется по правилу левой руки (*закон Ленца*): *направление э.д.с. индукции всегда таково, что вызванный ею ток и его магнитное поле имеют такое направление, что стремятся препятствовать причине, порождающей эту э.д.с. индукции.*

Э.д.с. самоиндукции в электрических цепях может во много раз превосходить напряжение источника тока. Поэтому в цепях, обладающих большой индуктивностью, происходит пробой воздушного промежутка между контактами рубильников и выключателей. Образующаяся дуга или искра служит причиной обгорания и частично расплавления контактов.

Генератор постоянного тока.

В основу работы генератора постоянного тока положен принцип электромагнитной индукции. Якорь с обмоткой вращается первичным двигателем (двигатель внутреннего сгорания, электродвигатель, турбина и т.п.) в магнитном поле полюсов электромагнитов. Электродвижущая сила,

индуктируемая в проводниках обмотки якоря, при помощи коллектора и щеток отводится во внешнюю цепь. Коллектор обеспечивает получение постоянного тока.

Взаимоиндукция.

Возьмем два проводника, намотаем из них две катушки, расположим эти катушки на некотором расстоянии друг от друга и по одной из катушек пропустим изменяющийся ток. Тогда магнитное поле, созданное этим током, пересечет витки второй катушки, в которой возникнет э.д.с. взаимной индукции, а следовательно, и электрический ток взаимной индукции. Ток в свою очередь послужит причиной появления магнитного поля, которое пересечет витки первой катушки, вызвав в ней также э.д.с. взаимной индукции. Этот процесс называют взаимной индукцией.

Трансформатор.

На использовании явления взаимной индукции основано действие трансформаторов, т. е. таких устройств, которые преобразуют переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Трансформатор состоит из замкнутого стального сердечника, на котором помещены две катушки из изолированной проволоки с разным числом витков. Обмотку, подключаемую к источнику напряжения, называют первичной, а обмотку, к которой подключают потребители, — вторичной. Переменный ток, проходя по катушке, подключенной к источнику напряжения, все время перемагничивает сердечник, вследствие чего во второй катушке периодически меняется магнитное поле и возбуждается переменное напряжение.

При помощи трансформатора можно не только повышать, но и понижать напряжение. Для этого нужно ток с большим напряжением подвести к катушке с большим числом витков, тогда от катушки с малым числом витков получим ток с пониженным напряжением. Во сколько раз на вторичной катушке меньше число витков, чем на первичной, во столько раз меньше на ней напряжение, чем на первичной, и наоборот.

Если вторичная обмотка имеет больше витков, чем первичная, вторичное напряжение больше первичного и трансформатор называют повышающим. Если

же вторичная обмотка имеет меньше витков, чем первичная, трансформатор называют понижающим.

Отношение числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной обмотки (или отношение первичного напряжения ко вторичному) называют коэффициентом трансформации.

Мощность тока, получаемая из вторичной обмотки трансформатора, равна мощности тока, посылаемого в первичную обмотку. Так как мощность тока является произведением напряжения на ток, то, повышая при помощи трансформатора напряжение, во столько же раз понижаем силу тока, и наоборот.

Режим, при котором вторичная обмотка трансформатора разомкнута, а на зажимы первичной обмотки подано напряжение, называют холостым ходом трансформатора.

Имеются трансформаторы, на сердечниках которых есть всего одна обмотка. К различным точкам этой обмотки присоединены одновременно и первичная и вторичная цепи. Такие трансформаторы называют автотрансформаторами. Их применяют в тех случаях, когда имеется небольшая разница между первичным и вторичным напряжением.

4.7. Переменный ток.

Переменный ток, в отличие от тока постоянного, непрерывно изменяется как по величине, так и по направлению, причем изменения эти происходят периодически, т. е. точно повторяются через равные промежутки времени.

Чтобы вызвать в цепи такой ток, используются источники переменного тока, создающие переменную ЭДС, периодически изменяющуюся по величине и направлению. Такие источники называются генераторами переменного тока.

На рисунке показана схема устройства (модель) простейшего генератора переменного тока.

Прямоугольная рамка, изготовленная из медной проволоки, укреплена на оси и при помощи ременной передачи вращается в поле магнита. Концы рамки

припаяны к медным контактным кольцам, которые, вращаясь вместе с рамкой, скользят по контактными пластинам (щеткам).

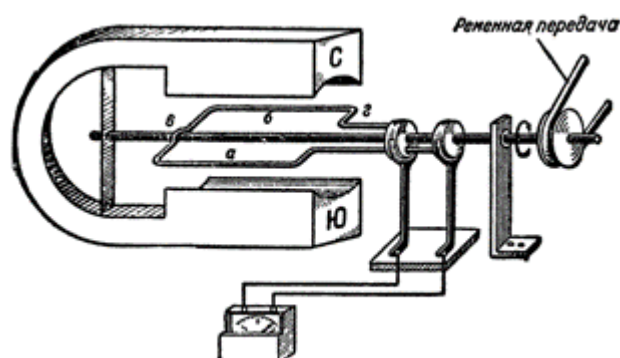


Рис. 26. Схема простейшего генератора переменного тока

Такое устройство является источником переменной ЭДС.

Предположим, что магнит создает между своими полюсами равномерное магнитное поле, т. е. такое, в котором плотность магнитных силовых линий в любой части поля одинаковая. Вращаясь, рамка пересекает силовые линии магнитного поля, и в каждой из ее сторон *а* и *б* индуцируются ЭДС.

Стороны же *в* и *г* рамки — нерабочие, так как при вращении рамки они не пересекают силовых линий магнитного поля и, следовательно, не участвуют в создании ЭДС.

В любой момент времени ЭДС, возникающая в стороне *а*, противоположна по направлению ЭДС, возникающей в стороне *б*, но в рамке обе ЭДС действуют согласно и в сумме составляют общую ЭДС, т. е. индуктируемую всей рамкой.

В этом нетрудно убедиться, если использовать для определения направления ЭДС известное нам **правило правой руки**.

Для этого надо ладонь правой руки расположить так, чтобы она была обращена в сторону северного полюса магнита, а большой отогнутый палец совпадал с направлением движения той стороны рамки, в которой мы хотим определить направление ЭДС. Тогда направление ЭДС в ней укажут вытянутые пальцы руки.

Для какого бы положения рамки мы ни определяли направление ЭДС в сторонах a и b , они всегда складываются и образуют общую ЭДС в рамке. При этом с каждым оборотом рамки направление общей ЭДС изменяется в ней на обратное, так как каждая из рабочих сторон рамки за один оборот проходит под разными полюсами магнита.

Величина ЭДС, индуцируемой в рамке, также изменяется, так как изменяется скорость, с которой стороны рамки пересекают силовые линии магнитного поля. Действительно, в то время, когда рамка подходит к своему вертикальному положению и проходит его, скорость пересечения силовых линий сторонами рамки бывает наибольшей, и в рамке индуцируется наибольшая ЭДС. В те моменты времени, когда рамка проходит свое горизонтальное положение, ее стороны как бы скользят вдоль магнитных силовых линий, не пересекая их, и ЭДС не индуцируется.

Таким образом, при равномерном вращении рамки в ней будет индуцироваться ЭДС, периодически изменяющаяся как по величине, так и по направлению.

ЭДС, возникающую в рамке, можно измерить прибором и использовать для создания тока во внешней цепи.

Используя явление электромагнитной индукции, можно получить переменную ЭДС и, следовательно, переменный ток.

Переменный ток для промышленных целей и для освещения вырабатывается мощными генераторами, приводимыми во вращение паровыми или водяными турбинами и двигателями внутреннего сгорания.

Графическое изображение постоянного и переменного токов



Рис. 27.

Графический метод дает возможность наглядно представить процесс изменения той или иной переменной величины в зависимости от времени.

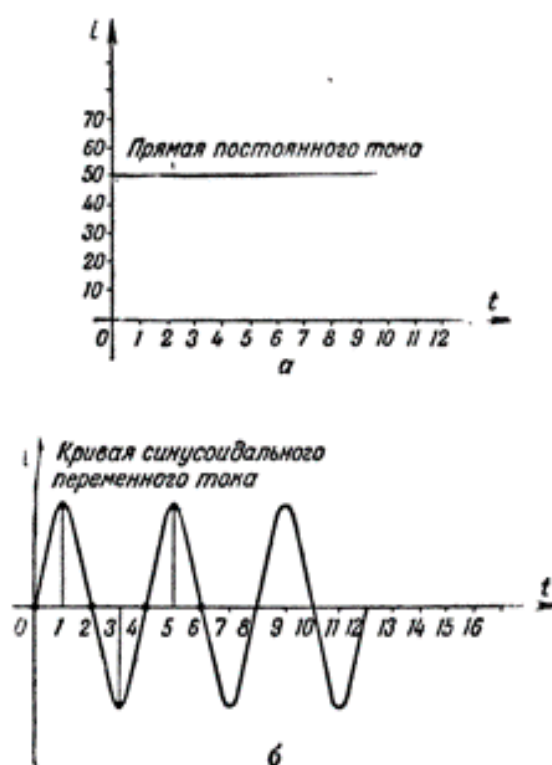


Рис. 28. Графическое изображение постоянного и переменного тока

На горизонтальной оси в определенном масштабе откладывают отрезки времени, а на вертикальной, также в некотором масштабе, — значения той величины, график которой собираются построить (ЭДС, напряжения или тока).

На рисунке графически изображены **постоянный и переменный токи**. В данном случае мы откладываем значения тока, причем вверх по вертикали от точки пересечения осей 0 откладываются значения тока одного направления, которое принято называть положительным, а вниз от этой точки — противоположного направления, которое принято называть отрицательным.

Убедиться в правильности построенного графика постоянного тока величиной 50 мА можно путём проведения наблюдений.

Так как этот ток постоянный, т. е. не меняющийся с течением времени своей величины и направления, то различным моментам времени будут соответствовать одни и те же значения тока, т. е. 50 мА. Следовательно, в момент времени, равный нулю, т. е. в начальный момент нашего наблюдения за током, он будет равен 50 мА. Отложив по вертикальной оси вверх отрезок, равный значению тока 50 мА, получают первую точку графика.

То же самое следует сделать и для следующего момента времени, соответствующего точке 1 на оси времени, т. е. отложить от этой точки вертикально вверх отрезок, также равный 50 мА. Конец отрезка определит нам вторую точку графика.

Проделав подобное построение для нескольких последующих моментов времени, мы получим ряд точек, соединение которых даст прямую линию, являющуюся **графическим изображением постоянного тока** величиной 50 мА.



Рис. 29.

Построение графика переменной ЭДС

На рисунке ниже в верхней части показана рамка, вращающаяся в магнитном поле, а внизу дано графическое изображение возникающей переменной ЭДС.

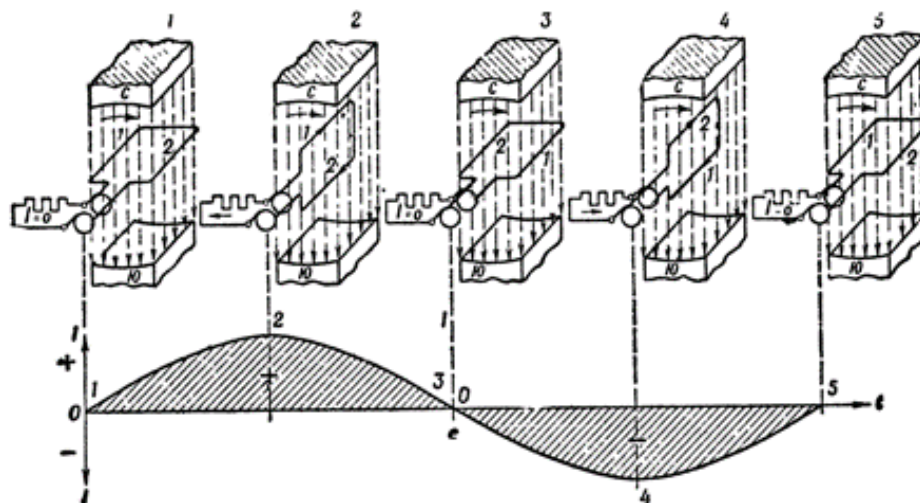


Рис. 30. Построение графика переменной ЭДС

При равномерном вращении рамки по часовой стрелке можно проследить ход изменения в ней ЭДС, приняв за начальный момент горизонтальное положение рамки.

В этот начальный момент ЭДС будет равна нулю, так как стороны рамки не пересекают магнитных силовых линий. На графике это нулевое значение ЭДС, соответствующее моменту $t = 0$, изобразится точкой 1.

При дальнейшем вращении рамки в ней начнет появляться ЭДС и будет возрастать по величине до тех пор, пока рамка не достигнет своего вертикального положения. На графике это возрастание ЭДС изобразится плавной поднимающейся вверх кривой, которая достигает своей вершины в точке 2.

По мере приближения рамки к горизонтальному положению ЭДС в ней будет убывать и упадет до нуля. На графике это изобразится спадающей плавной кривой.

Следовательно, за время, соответствующее половине оборота рамки, ЭДС

в ней успела возрасти от нуля до наибольшей величины и вновь уменьшиться до нуля в точке 3.

При дальнейшем вращении рамки в ней вновь возникнет ЭДС и будет постепенно возрастать по величине, однако направление ее уже изменится на обратное, в чем можно убедиться, применив правило правой руки.

График учитывает изменение направления ЭДС тем, что кривая, изображающая ЭДС, пересекает ось времени и располагается теперь ниже этой оси. ЭДС возрастает опять-таки до тех пор, пока рамка не займет вертикальное положение. Затем начнется убывание ЭДС, и величина ее станет равной нулю, когда рамка вернется в свое первоначальное положение, совершив один полный оборот. На графике это выразится тем, что кривая ЭДС, достигнув в обратном направлении своей вершины в точке 4, встретится затем с осью времени в точке 5.

На этом заканчивается один цикл изменения ЭДС, но если продолжать вращение рамки, тотчас же начинается второй цикл, в точности повторяющий первый, за которым, в свою очередь, последует третий, а потом четвертый, и так до тех пор, пока не останавливается вращение рамки.

Таким образом, за каждый оборот рамки ЭДС, возникающая в ней, совершает полный цикл своего изменения.

Если же рамка будет замкнута на какую-либо внешнюю цепь, то по цепи потечет переменный ток, график которого будет по виду таким же, как и график ЭДС.

Полученная волнообразная кривая называется **синусоидой**, а ток, ЭДС или напряжение, изменяющиеся по такому закону, называются **синусоидальными**.

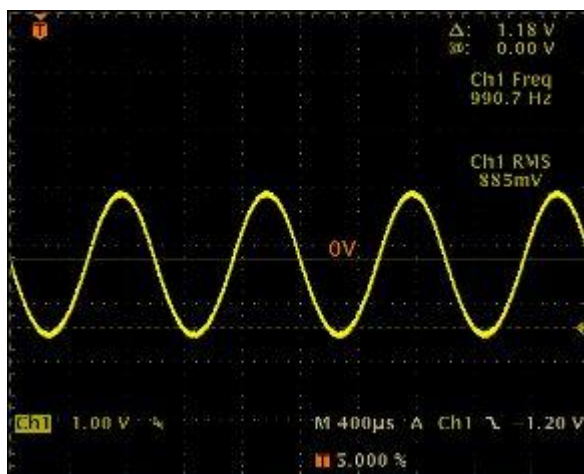


Рис. 31.

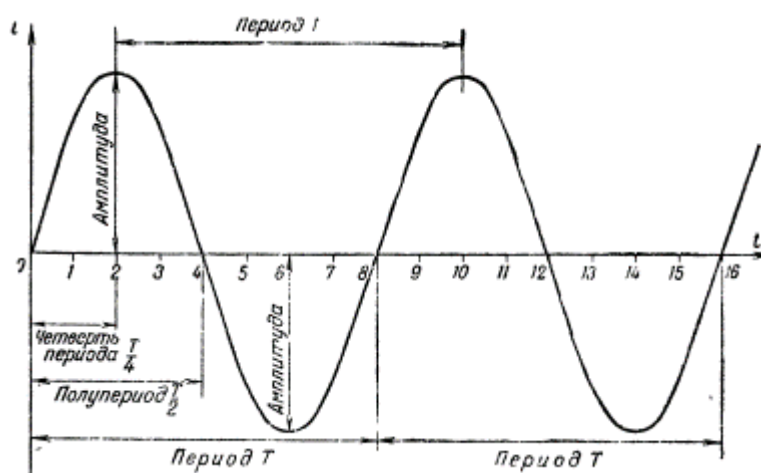
Сама кривая названа синусоидой потому, что она является графическим изображением переменной тригонометрической величины, называемой синусом.

Синусоидальный характер изменения тока — самый распространенный в электротехнике, поэтому, говоря о переменном токе, в большинстве случаев имеют в виду синусоидальный ток.

Для сравнения различных переменных токов (ЭДС и напряжений) существуют величины, характеризующие тот или иной ток. Они называются **параметрами переменного тока**.

Параметры переменного тока

Переменный ток характеризуется двумя параметрами — **периодом** и **амплитудой**, зная которые можно судить, какой это переменный ток, и построить график тока.



Промежуток времени, на протяжении которого совершается полный цикл изменения тока, называется периодом. Период обозначается буквой T и измеряется в секундах.

Промежуток времени, на протяжении которого совершается половина полного цикла изменения тока, называется полупериодом. Следовательно, период изменения тока (ЭДС или напряжения) состоит из двух полупериодов. Совершенно очевидно, что все периоды одного и того же переменного тока равны между собой.

Как видно из графика, в течение одного периода своего изменения ток достигает дважды максимального значения.

Максимальное значение переменного тока (ЭДС или напряжения) называется его амплитудой или амплитудным значением тока.

I_m , E_m и U_m — общепринятые обозначения амплитуд тока, ЭДС и напряжения.

Прежде всего следует обратить внимание на амплитудное значение тока, однако, как это видно из графика, существует бесчисленное множество промежуточных его значений, меньших амплитудного.

Значение переменного тока (ЭДС, напряжения), соответствующее любому выбранному моменту времени, называется его мгновенным значением.

i , e и u — общепринятые обозначения мгновенных значений тока, ЭДС и напряжения.

Мгновенное значение тока, как и амплитудное его значение, легко определить с помощью графика. Для этого из любой точки на горизонтальной оси, соответствующей интересующему нас моменту времени, нужно провести вертикальную линию до точки пересечения с кривой тока; полученный отрезок вертикальной прямой определит значение тока в данный момент, т. е. мгновенное его значение.

Очевидно, что мгновенное значение тока по истечении времени $T/2$ от начальной точки графика будет равно нулю, а по истечении времени $T/4$ его

амплитудному значению. Ток также достигает своего амплитудного значения; но уже в обратном направлении, по истечении времени, равного $3/4 T$.

Итак, график показывает, как с течением времени меняется ток в цепи, и что каждому моменту времени соответствует только одно определенное значение как величины, так и направления тока. При этом значение тока в данный момент времени в одной точке цепи будет точно таким же в любой другой точке этой цепи.

Число полных периодов, совершаемых током в 1 секунду, называется частотой переменного тока и обозначается латинской буквой f .

Чтобы определить частоту переменного тока, т. е. узнать, сколько периодов своего изменения ток совершил в течение 1 секунды, необходимо 1 секунду разделить на время одного периода $f = 1/T$. Зная частоту переменного тока, можно определить период: $T = 1/f$.

Частота переменного тока измеряется единицей, называемой герцем.

Если речь идёт о переменном токе, частота изменения которого равна 1 герцу, то период такого тока будет равен 1 секунде. И, наоборот, если период изменения тока равен 1 секунде, то частота такого тока равна 1 герцу.

Итак, мы определили параметры переменного тока — период, амплитуду и частоту, — которые позволяют отличать друг от друга различные переменные токи, ЭДС и напряжения и строить, когда это необходимо, их графики.

При определении сопротивления различных цепей переменному току использовать еще одну вспомогательную величину, характеризующую переменный ток, так называемую угловую или круговую частоту.

Круговая частота обозначается буквой ω и связана с частотой f соотношением $\omega = 2\pi f$.

При построении графика переменной ЭДС можно заметить, что за время одного полного оборота рамки происходит полный цикл изменения ЭДС. Иначе говоря, для того чтобы рамке сделать один оборот, т. е. повернуться на 360° , необходимо время, равное одному периоду, т. е. T секунд. Тогда за 1 секунду рамка совершает $360^\circ/T$ оборота. Следовательно, $360^\circ/T$ есть угол, на который поворачивается рамка в 1 секунду, и выражает собой скорость вращения рамки,

которую принято называть угловой или круговой скоростью.

Но так как период T связан с частотой f соотношением $f = 1/T$, то и круговая скорость может быть выражена через частоту и будет равна $\omega = 360^\circ f$.

Для удобства пользования круговой частотой при всевозможных расчетах угол 360° , соответствующий одному обороту, заменяют его радиальным выражением, равным 2π радиан, где $\pi = 3,14$. Таким образом, получается $\omega = 2\pi f$. Следовательно, чтобы определить круговую частоту переменного тока (ЭДС или напряжения), надо частоту в герцах умножить на постоянное число $6,28$.

Преимущества переменного тока

Как известно, электрический ток бывает постоянным и переменным. Но широко применяется только переменный ток. Это обусловлено тем, что напряжение и силу переменного тока можно преобразовывать практически без потерь энергии.

Промышленный переменный ток получают при помощи генераторов переменного тока с использованием явлений электромагнитной индукции.

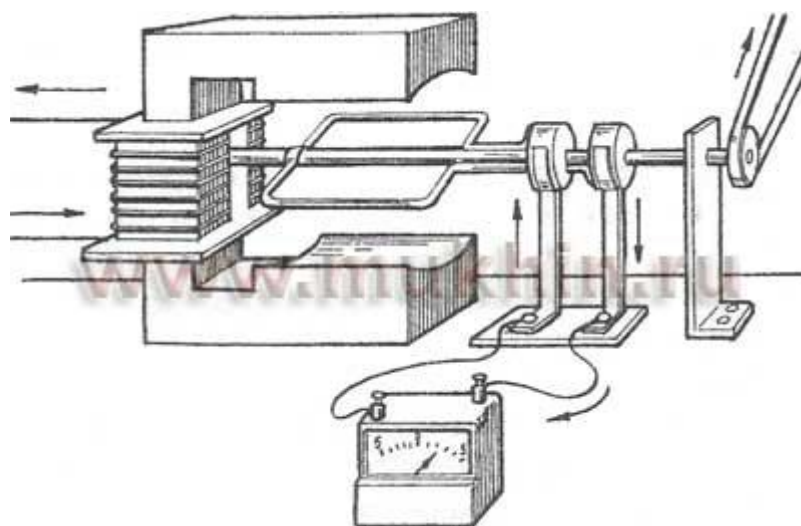


Рис. 33. Простейшая установка для выработки переменного электрического тока

Принцип действия установки прост. Проволочная рамка вращается в однородном магнитном поле с постоянной скоростью. Своими концами рамка закреплена на кольцах, вращающихся вместе с ней. К кольцам плотно прилегают

пружины, выполняющие роль контактов. Через поверхность рамки непрерывно будет протекать изменяющийся магнитный поток, но поток, создаваемый электромагнитом, останется постоянным. В связи с этим в рамке возникнет ЭДС индукции. В промышленности и быту большинства стран используют переменный ток с частотой 50 Гц.

Действующие значения силы тока и напряжения

Как известно, переменная ЭДС индукции вызывает в цепи переменный ток. При наибольшем значении ЭДС сила тока будет иметь максимальное значение и наоборот. Это явление называется совпадением по фазе. Несмотря на то, что значения силы тока могут колебаться от нуля и до определенного максимального значения, имеются приборы, с помощью которых можно измерить силу переменного тока.

Характеристикой переменного тока могут быть действия, которые не зависят от направления тока и могут быть такими же, как и при постоянном токе. К таким действиям можно отнести тепловое. К примеру, переменный ток протекает через проводник с заданным сопротивлением. Через определенный промежуток времени в этом проводнике выделится какое-то количество тепла. Можно подобрать такое значение силы постоянного тока, чтобы на этом же проводнике за то же время выделялось этим током такое же количество тепла, что и при переменном токе. Такое значение постоянного тока называется действующим значением силы переменного тока.

Действующим значением силы переменного тока называют величину постоянного тока, действие которого произведёт такую же работу (тепловой или электродинамический эффект), что и рассматриваемый переменный ток за время одного периода. В современной литературе чаще используется математическое определение этой величины — среднеквадратичное значение силы переменного тока.

Иначе говоря, действующее значение тока можно определить по формуле:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$

Для гармонических колебаний тока

$$I = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot I_m \approx 0,707 \cdot I_m$$

Аналогичным образом определяются действующие значения ЭДС и напряжения.

Катушка индуктивности и конденсатор в цепи переменного тока

Особенностями переменного тока являются изменение силы и направления тока. Эти явления отличают его от постоянного тока. Сила переменного тока состоит в прямой зависимости не только от напряжения и сопротивления, но и индуктивности проводников, подключенных к цепи.

Как правило, индуктивность существенно уменьшает силу переменного тока. В связи с тем, что сопротивление цепи равно отношению напряжения к силе тока, то подключение к цепи катушки индуктивности, которая представляет собой проводник уложенный в виде спирали, увеличит общее сопротивление. Это происходит вследствие наличия ЭДС самоиндукции, которая не дает току увеличиваться. Если напряжение изменяется, то сила тока просто не успевает достигнуть тех максимальных значений, которые она приобрела бы, не будь самоиндукции. Из этого вытекает, что наибольшее значение силы переменного тока ограничивается индуктивностью, т. е. чем больше будет индуктивность и частота напряжения, тем меньше будет значение силы тока через катушку.

Если в цепь постоянного тока включить батарею конденсаторов, то тока в цепи не будет, потому что пластины конденсатора отделяются друг от друга изоляционными прокладками. При наличии в цепи конденсатора постоянный ток существовать не может.

Если точно такую же батарею подсоединить к цепи переменного тока, то в ней возникнет ток. Объясняется это следующим образом. Под действием изменяющегося напряжения происходит зарядка и разрядка конденсаторов. То есть если одна обкладка конденсатора имела в течение какого-либо полупериода отрицательный заряд, то в следующий полупериод она приобретет положительный заряд. Следовательно, перезарядка конденсатора перемещает заряды по цепи. А это и есть переменный электрический ток.

Чем больше будет перемещаемый заряд, тем больше сила тока, т. е. чем большей емкостью обладает конденсатор, тем меньшим он обладает сопротивлением движению тока.

4.8. Трехфазный переменный ток.

Трехфазные цепи переменного тока служат для обеспечения генерации, передачи и распределения электрической энергии. Данные цепи, как следует из их названия, строятся каждая из трех электрических подцепей, в каждой из которых действует синусоидальная ЭДС. ЭДС эти генерируются общим источником, имеют равные амплитуды, равные частоты, однако смещены по фазе друг относительно друга на 120 градусов или на $2/3$ пи (треть периода).

Каждая из трех цепей трехфазной системы именуется фазой: первая фаза – фаза "А", вторая фаза – фаза "В", третья фаза – фаза "С".

Начала этих фаз обозначаются соответственно буквами А, В и С, а концы фаз – Х, Y и Z. Данные системы отличаются экономичностью, в сравнении с однофазными; возможностью простого получения вращающегося магнитного поля статора для двигателя, доступностью двух напряжений на выбор — линейного и фазного.

Генератор трехфазного тока и асинхронные двигатели

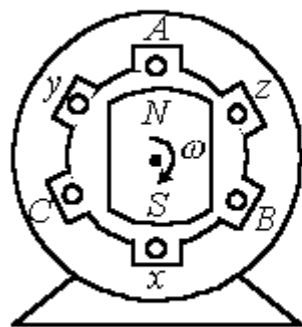


Рис.1

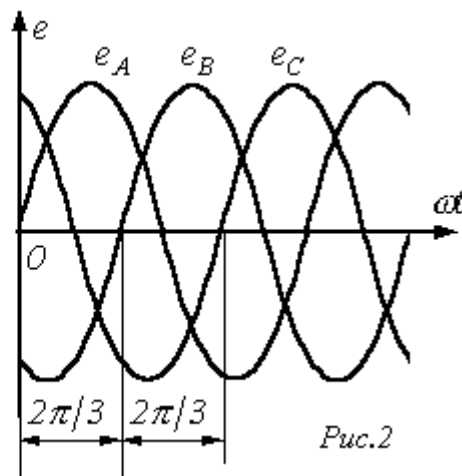


Рис.2

Итак, трехфазный генератор представляет собой синхронную электрическую машину, предназначенную для создания трех гармонических ЭДС, смещенных на 120 градусов по фазе (по сути - во времени) друг относительно друга.

На статоре генератора для этой цели установлена трехфазная обмотка, у которой каждая фаза состоит из нескольких катушек, причем магнитная ось каждой «фазы» обмотки статора физически в пространстве повернута на треть окружности относительно двух других «фаз».

Такое расположение обмоток позволяет получать от них систему трехфазных ЭДС в процессе вращения ротора. Ротором здесь служит постоянный электромагнит, возбуждаемый током обмотки возбуждения, расположенной на нем.

Турбина на электростанции вращает ротор с постоянной скоростью, магнитное поле ротора вращается вместе с ним, магнитные силовые линии пересекают проводники обмоток статора, в итоге получается система индуцированных синусоидальных ЭДС одинаковой частоты (50 Гц), смещенных друг относительно друга во времени на треть периода.

Амплитуда ЭДС определяется индукцией магнитного поля ротора и количеством витков в обмотке статора, а частота — угловой скоростью вращения ротора. Если принять начальную фазу обмотки А равной нулю, то для симметричных ЭДС трех фаз можно сделать запись в форме тригонометрических функций (фаза в радианах и в градусах):

$$e_A = E_m \sin \omega t$$

$$e_B = E_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = E_m \sin(\omega t - 120)$$

$$e_C = E_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = E_m \sin(\omega t - 240)$$

$$E_A = E_B = E_C = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = E \cdot \text{действующие значения равны}$$

Кроме того возможна запись действующих значений ЭДС и в комплексной форме, а также изображение множества мгновенных значений в графическом виде (см.рис2):

$$\dot{E}_A = Ee^{j0^0} = E$$

$$\dot{E}_B = Ee^{-j120^0}$$

$$\dot{E}_C = Ee^{-j240^0}$$

Векторные диаграммы отражают взаимный фазовый сдвиг трех ЭДС системы, причем в зависимости от направления вращения ротора генератора, направление чередования фаз будет различаться (прямое или обратное). Соответственно, направление вращения ротора подключенного к сети асинхронного двигателя будет разным:

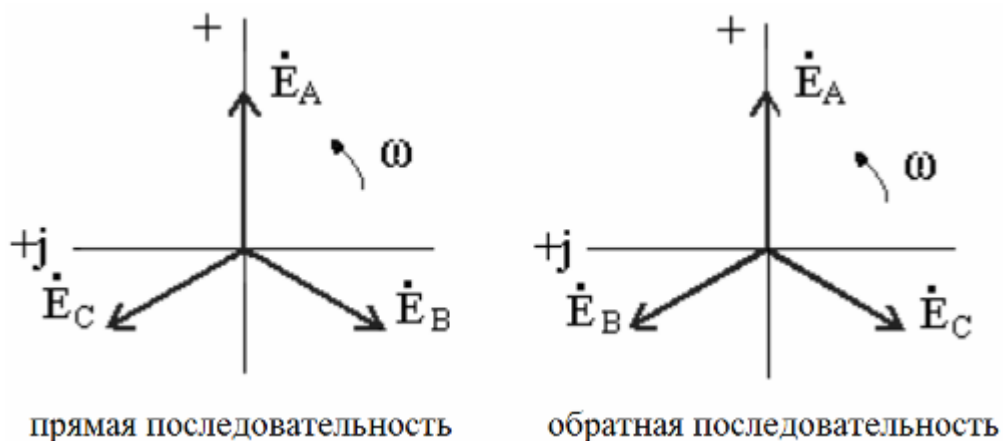


Рис.35.

Если нет дополнительных оговорок, то подразумевается прямое чередование ЭДС в фазах трехфазной цепи. Обозначение начал и концов обмоток генератора - соответствующих фаз, а также направление действующих в них ЭДС, показано на рисунке (справа схема замещения):

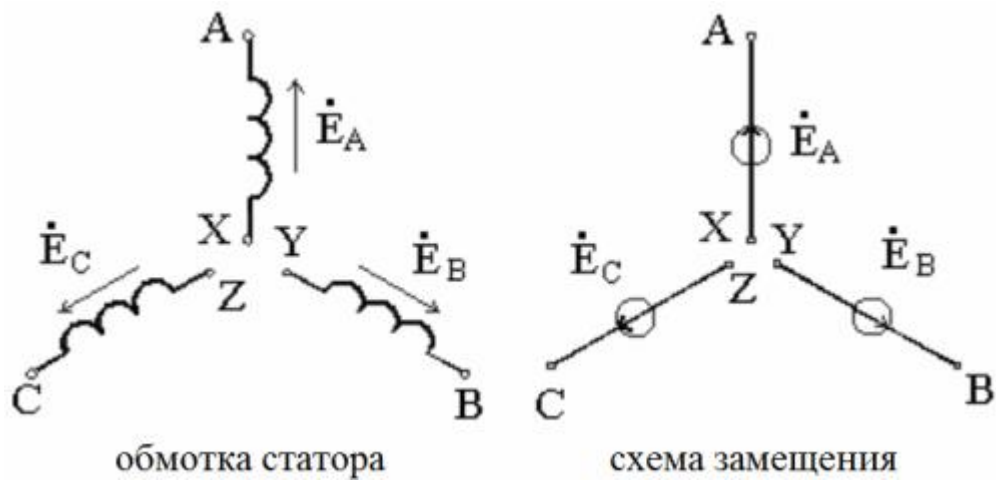
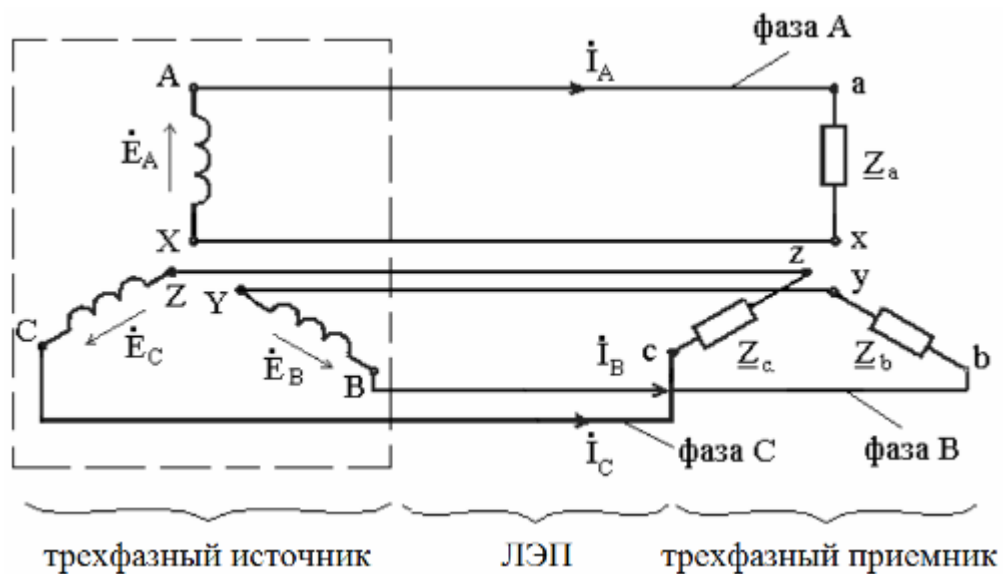


Рис.36

Схемы подключения трехфазной нагрузки — «звезда» и «треугольник»

Для питания нагрузки через три провода трехфазной сети, к каждой из трех фаз присоединяют как-бы по своему потребителю, или по фазе трехфазного потребителя (так называемого приемника электроэнергии).

Трехфазный источник можно изобразить схемой замещения из трех идеальных источников симметричных гармонических ЭДС. Идеальные приемники представлены здесь тремя полными комплексными сопротивлениями Z , каждое из которых питается от соответствующей фазы источника:

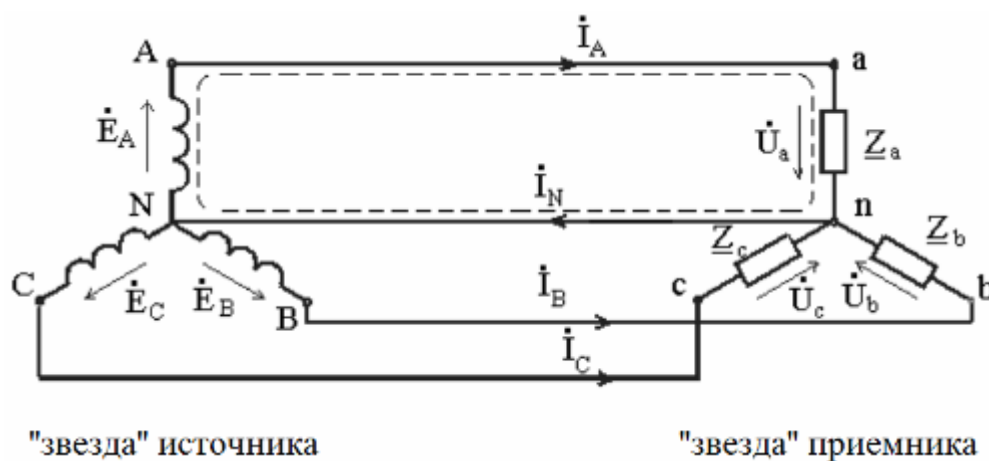


На рисунке для ясности изображены три цепи, не связанные между собой электрически, однако на практике такое включение не используется. В реальности три фазы все же имеют электрические соединения друг с другом.

Фазы трехфазных источников и трехфазных потребителей соединяют друг с другом различными способами, и чаще всего встречается одна из двух схем - «треугольник» или «звезда».

Фазы источника и фазы потребителя могут быть сопряжены между собой разными сочетаниями: источник соединен звездой и приемник звездой, или источник — звездой, а приемник — треугольником.

Именно такие сочетания соединений и применяются чаще всего на практике. Схема «звезда» предполагает наличие одной общей точки у трех «фаз» генератора или трансформатора, такая общая точка называется нейтралью источника (или нейтралью приемника, если речь о «звезде» потребителя).



Соединяющие источник и приемник провода, называются линейными проводами, они связывают выводы обмоток фаз генератора и приемника.

Провод, соединяющий нейтраль источника и нейтраль приемника называют **нейтральным проводом**. Каждая фаза образует своеобразную индивидуальную электрическую цепь, где каждый из приемников присоединен к

своему источнику парой проводов - одним линейным и одним нейтральным.

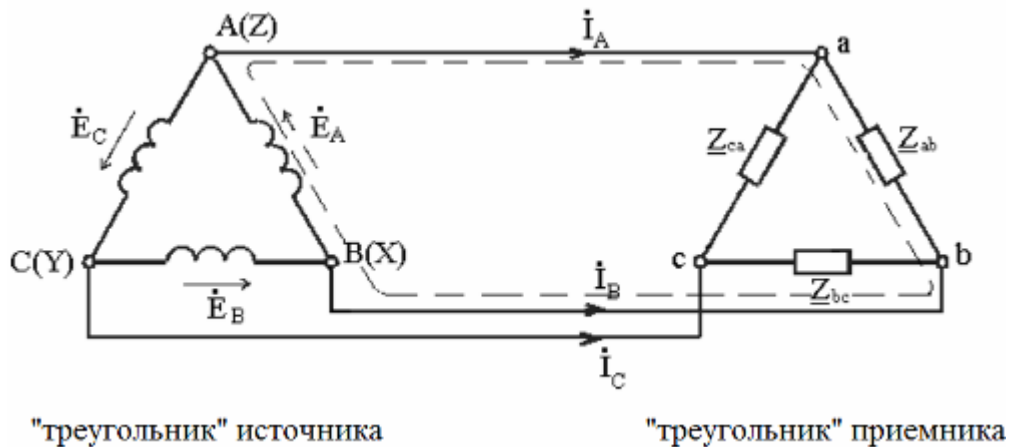


Рис.39.

Когда конец одной фазы источника соединяется с началом второй его фазы, конец второй — с началом третьей, а конец третьей — с началом первой, такое соединение фаз источника называется «треугольник». Три провода приемника, присоединенные аналогичным образом между собой, тоже образуют схему «треугольник», и вершины данных треугольников присоединяются друг к другу.

Каждая фаза источника в данной схеме образует собственную электрическую цепь с приемником, где присоединение образовано двумя проводами. Для такого подключения названия фаз приемника записывают двумя буквами в соответствии с проводами: ab, ac, ca. Индексы для параметров фаз обозначают этими же буквами: комплексные сопротивления Z_{ab} , Z_{ac} , Z_{ca} .

Фазное и линейное напряжения

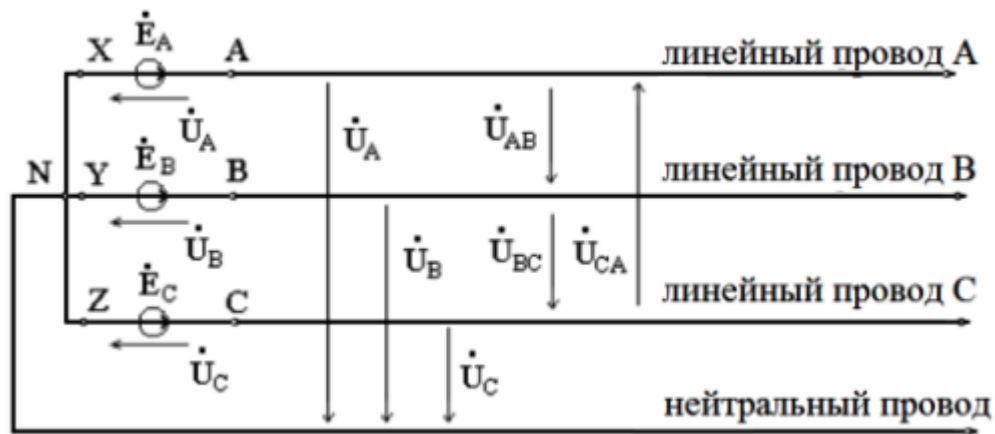


Рис.40.

У источника, обмотка которого соединена по схеме «звезда», имеется две системы трехфазных напряжений: фазное и линейное.

Фазное напряжение — между линейным проводом и нейтралью (между концом и началом одной из фаз).

Линейное напряжение — между началами фаз или между линейными проводами. За положительное направление напряжения здесь условно принимают направление от точки цепи с более высоким потенциалом — к точке с более низким потенциалом.

Поскольку внутренние сопротивления обмоток генератора крайне малы, ими обычно пренебрегают, и считают, что фазные напряжения равны фазным ЭДС, поэтому и на векторных диаграммах напряжения и ЭДС обозначают одними и теми же векторами:

$$\dot{E}_A = \dot{U}_A; \quad \dot{E}_B = \dot{U}_B; \quad \dot{E}_C = \dot{U}_C;$$

$$\dot{U}_A = U_\phi e^{j0^\circ}; \quad \dot{U}_B = U_\phi e^{-j120^\circ}; \quad \dot{U}_C = U_\phi e^{-j240^\circ}$$

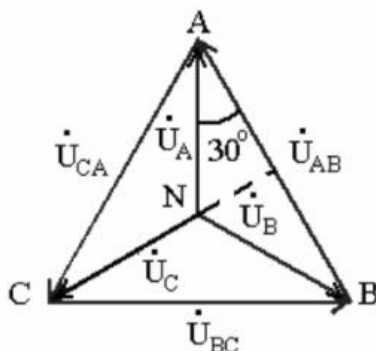


Рис.41.

Приняв потенциал нейтральной точки за ноль, получим, что потенциалы фаз окажутся тождественны фазным напряжениям источника, а линейные напряжения — разностям фазных напряжений. Векторная диаграмма примет вид как на рисунке выше.

Каждая точка на такой диаграмме соответствует определенной точке трехфазной цепи, и проведенный между двумя точками диаграммы вектор покажет поэтому напряжение (его величину и фазу) между соответствующими двумя точками той цепи, для которой построена данная диаграмма.

$$\underline{\varphi}_N = 0$$

$\dot{U}_A = \underline{\varphi}_A - \underline{\varphi}_N = \underline{\varphi}_A;$	$\dot{U}_{AB} = \underline{\varphi}_A - \underline{\varphi}_B = \dot{U}_A - \dot{U}_B;$
$\dot{U}_B = \underline{\varphi}_B - \underline{\varphi}_N = \underline{\varphi}_B;$	$\dot{U}_{BC} = \underline{\varphi}_B - \underline{\varphi}_C = \dot{U}_B - \dot{U}_C;$
$\dot{U}_C = \underline{\varphi}_C - \underline{\varphi}_N = \underline{\varphi}_C;$	$\dot{U}_{CA} = \underline{\varphi}_C - \underline{\varphi}_A = \dot{U}_C - \dot{U}_A;$

$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA}$

Рис.42

В силу симметричности фазных напряжений, симметричны и линейные

напряжения. Это видно по векторной диаграмме. Векторы линейных напряжений лишь сдвинуты между собой так же на 120 градусов. А соотношение между фазными и линейными напряжениями легко находится из треугольника на диаграмме: линейное в корень из трех раз больше фазного.

Кстати, для трехфазных цепей всегда нормируются именно линейные напряжения, ибо только при введении нейтрали можно будет говорить еще и о напряжении фазном.

$$U_{AB} = 2U_A \cos 30^\circ = \sqrt{3}U_A \quad \text{например:}$$

$$U_L = \sqrt{3}U_\phi, \quad U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}} \quad \begin{array}{l} U_L = 660 \text{ В}; U_\phi = 380 \text{ В}; \\ U_L = 380 \text{ В}; U_\phi = 220 \text{ В}; \\ U_L = 220 \text{ В}; U_\phi = 127 \text{ В}. \end{array}$$

Расчеты для «звезды»

На рисунке ниже изображена схема замещения приемника, фазы которого соединены «звездой», подключенного через провода ЛЭП к симметричному источнику, выводы которого обозначены соответствующими буквами. При расчетах трехфазных цепей решаются задачи по нахождению линейных и фазных токов когда известны сопротивления фаз приемника и напряжения источника.

Токи в линейных проводниках называются линейными токами, их положительное направление — от источника — к приемнику. Токи в фазах приемника — это фазные токи, их положительное направление — от начала фазы — к ее концу, как направление фазных ЭДС.

Когда приемник собран по схеме «звезда», имеет место ток и в нейтральном проводнике, его положительным направлением принимается — от приемника — к источнику, как на ниже приведенном рисунке.

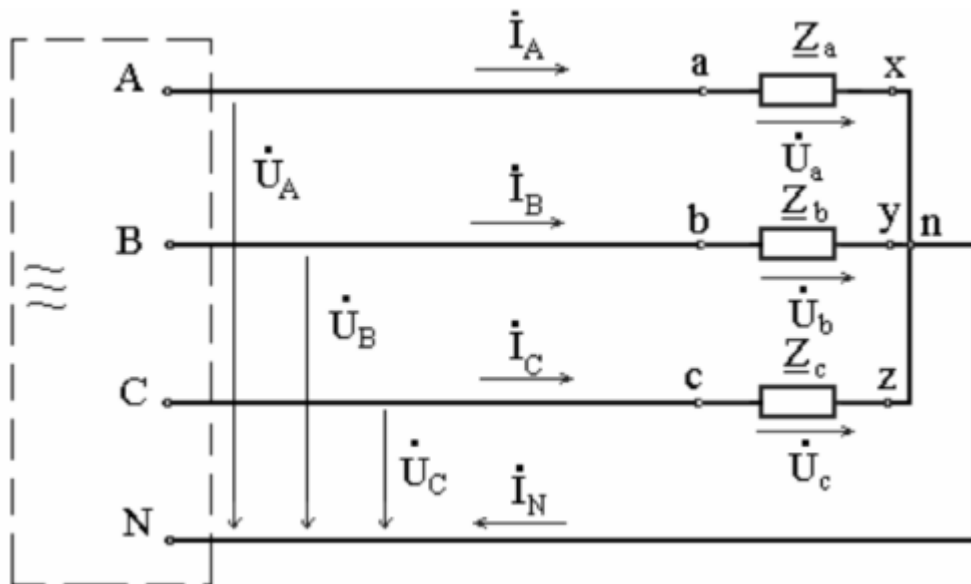


Рис.43.

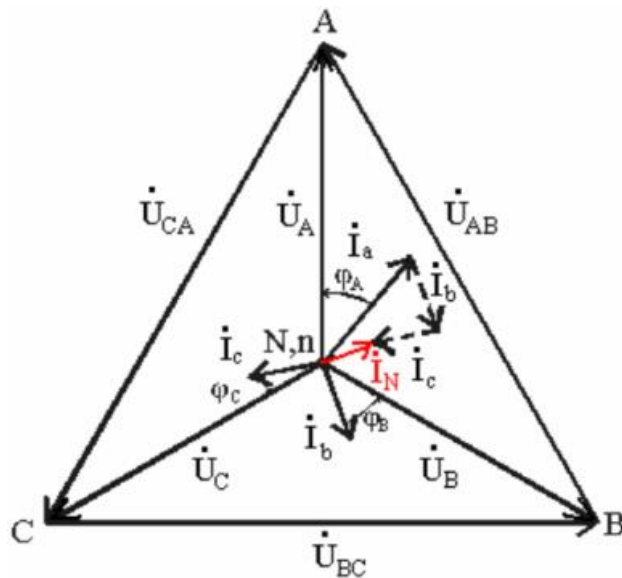
Если рассмотреть для примера несимметричную четырехпроводную цепь нагрузки, то фазные напряжения приемника, при наличии нейтрального проводника, окажутся равны фазным напряжениям источника. Токи в каждой фазе находятся по закону Ома. А первый закон Кирхгофа позволит найти величину тока и в нейтрали (в нейтральной точке n на рисунке выше):

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A; \dot{U}_b = \dot{U}_B; \dot{U}_c = \dot{U}_C$$

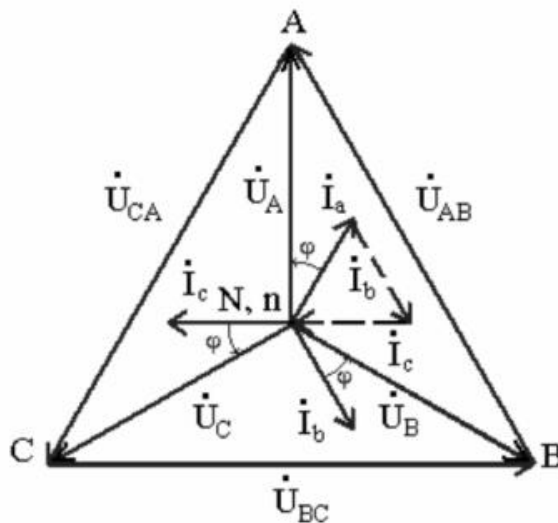
$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a}; \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b}; \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c},$$

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c$$

Далее рассмотрим векторную диаграмму данной цепи. На ней отражены линейные и фазные напряжения, также построены несимметричные фазные токи, показан цветом и ток в нейтральном проводнике. Ток нейтрального провода построен как сумма векторов фазных токов.



Пусть теперь нагрузка фаз симметрична и имеет активно-индуктивный характер. Построим векторную диаграмму токов и напряжений, приняв в расчет тот факт, что ток отстает от напряжения на угол φ :



Ток в нейтральном проводе будет равен нулю. Значит при соединении «звездой» симметричного приемника нейтральный провод влияния не оказывает, и может быть в принципе убран. Нет надобности в четырех проводах, достаточно трех.

Нейтральный провод в цепи трехфазного тока

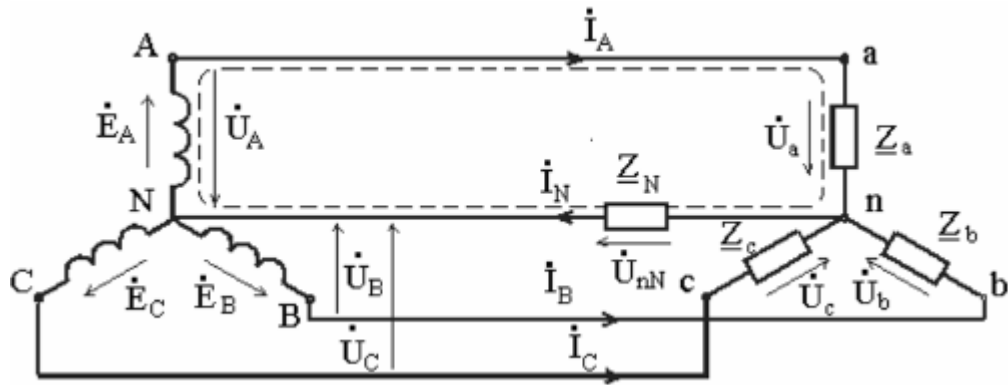


Рис.44.

Когда нейтральный проводник имеет достаточно большую длину, он оказывает ощутимое сопротивление прохождению тока. Отразим это на схеме добавив резистор Z_n .

Ток в нейтральном проводнике создает падение напряжения на сопротивлении, что приводит к искажению напряжений в фазных сопротивлениях приемника. Второй закон Кирхгофа для цепи фазы А приводит нас к следующему уравнению, и далее — находим по аналогии напряжения фаз В и С:

$$\begin{aligned}
 -\dot{U}_A + \dot{U}_a + \dot{U}_{nN} &= 0 \\
 \dot{U}_a &= \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}; \\
 \dot{U}_b &= \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}; \\
 \dot{U}_c &= \dot{U}_C - \dot{U}_{nN}
 \end{aligned}$$

Хотя фазы источника симметричны, фазные напряжения приемника несимметричны. И согласно методу узловых потенциалов, напряжение между нейтральными точками источника и приемника будет равно (ЭДС фаз равны фазным напряжениям):

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{E}_A \underline{Y}_a + \dot{E}_B \underline{Y}_b + \dot{E}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N} \quad \dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_a + \dot{U}_B \underline{Y}_b + \dot{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N}$$

$$\underline{Y}_a = \frac{1}{\underline{Z}_a}; \underline{Y}_b = \frac{1}{\underline{Z}_b}; \underline{Y}_c = \frac{1}{\underline{Z}_c} \quad - \text{ комплексные проводимости фаз приемника}$$

$$\underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N} - \begin{array}{l} \text{комплексная} \\ \text{проводимость} \\ \text{нейтрального} \\ \text{провода} \end{array}$$

Иногда, когда сопротивление нейтрального провода очень мало, его проводимость можно принять бесконечной, и значит напряжение между нейтральными точками трехфазной цепи считать равным нулю.

Таким образом, симметричные фазные напряжения приемника не искажаются. Ток в каждой фазе и ток в нейтральном проводнике находятся по закону Ома или по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a}; \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b}; \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c},$$

$$\dot{I}_N = \frac{\dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_N} = \underline{Y}_N \dot{U}_{nN}$$

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$$

Симметричный приемник имеет одинаковые сопротивления в каждой из своих фаз. Напряжение между нейтральными точками равно нулю, сумма фазных напряжений равна нулю и ток в нейтральном проводнике равен нулю.

Таким образом, для симметричного приемника соединенного «звездой» наличие нейтрали не влияет на его работу. Но соотношение между линейными и фазными напряжениями остаются в силе:

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\phi = Z_\phi e^{\pm j\phi} \quad \text{или} \quad \underline{Y}_a = \underline{Y}_b = \underline{Y}_c = \underline{Y}_\phi$$

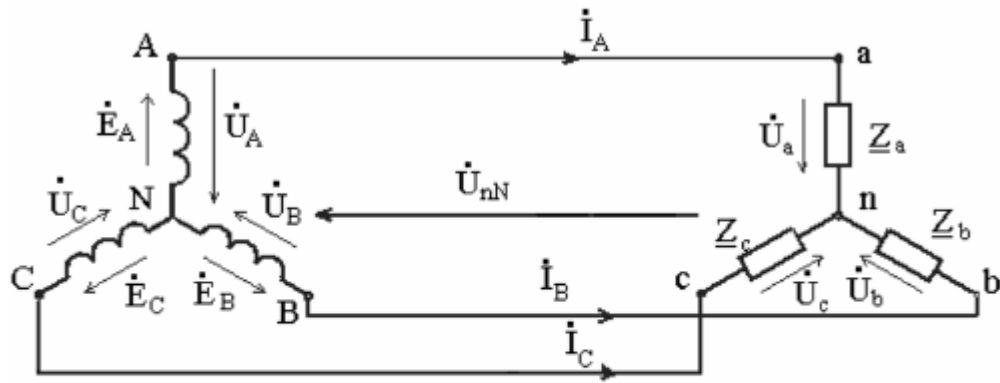
$$\dot{U}_{nN} = \frac{\underline{Y}_\phi (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C)}{3\underline{Y}_\phi + \underline{Y}_N} = 0 \quad \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0 \quad \dot{I}_N = 0$$

$$\dot{U}_{nN} = 0, \quad \dot{U}_a = \dot{U}_A; \dot{U}_b = \dot{U}_B; \dot{U}_c = \dot{U}_C.$$

$$\dot{U}_L = \sqrt{3}\dot{U}_\phi, \quad \dot{U}_\phi = \dot{U}_L / \sqrt{3}$$

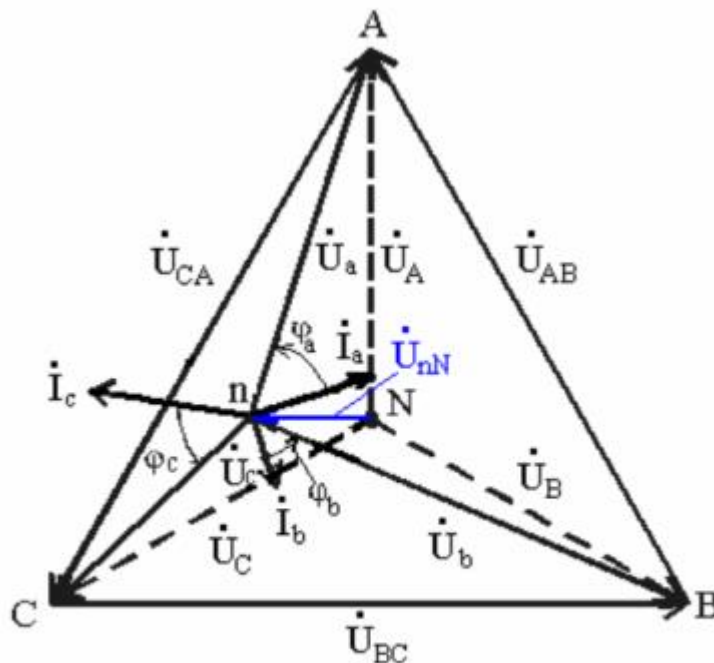
Несимметричный приемник, соединенный по схеме «звезда», в отсутствие нейтрального проводника будет обладать максимальным напряжением смещения нейтрали (проводимость нейтрали нулевая,

сопротивление - бесконечность):



$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_a + \dot{U}_B \underline{Y}_b + \dot{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}$$

Максимальны в этом случае и искажения фазных напряжений приемника. Векторная диаграмма фазных напряжений источника, с построением напряжения нейтрали, отражает данный факт:



напряжение смещения нейтрали в отсутствие нейтрального проводника

Очевидно, при изменении величин или характера сопротивлений приемника, величина напряжения смещения нейтрали варьируется в широчайших пределах, и нейтральная точка приемника на векторной диаграмме может располагаться в самых разных местах. При этом фазные напряжения приемника будут значительно различаться.

Симметричная нагрузка допускает удаление нейтрального провода без влияния на фазные напряжения у приемника; несимметричная нагрузка при удалении нейтрального проводника сразу ведет к устранению жесткой связи между напряжениями приемника и напряжениями фаз генератора, - на напряжения нагрузки влияют теперь только линейные напряжения генератора.

Несимметричная нагрузка приводит к несимметрии фазных напряжений на ней, и к смещению нейтральной точки дальше от центра треугольника векторной диаграммы.

Нейтральный провод поэтому необходим для выравнивания фазных напряжений приемника в условиях его несимметричности или при подключении к каждой из фаз однофазных приемников, рассчитанных на фазное, а не на линейное напряжение.

По этой же причине нельзя в цепь нейтрального провода устанавливать предохранитель, так как в случае разрыва нейтрального провода на фазных нагрузках возникнет тенденция к опасным перенапряжениям.

Расчеты для «треугольника»

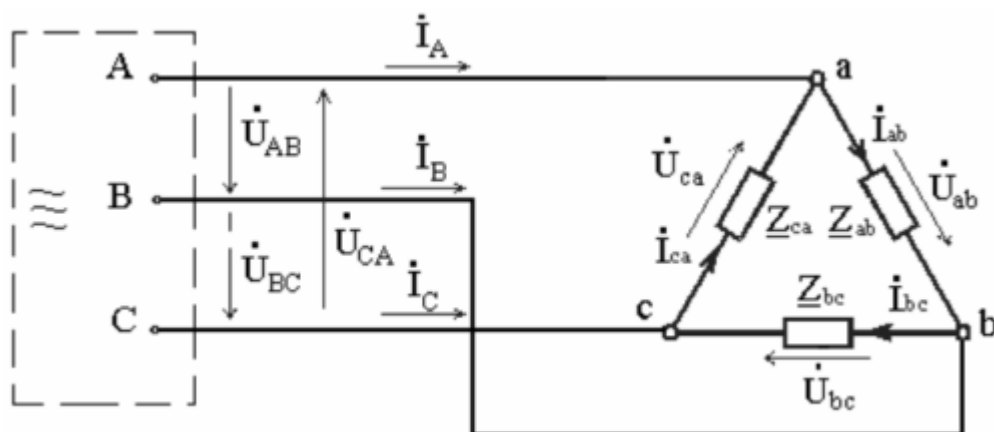


Рис.45

Теперь рассмотрим соединение фаз приемника по схеме «треугольник». На рисунке показаны выводы источника, причем нейтральный провод отсутствует, да и присоединять его здесь некуда. Задача при такой схеме соединения обычно заключается в том, чтобы вычислить фазные и линейные

токи при известных напряжении источника и фазных сопротивлениях нагрузки.

Напряжения между линейными проводами — это и есть фазные напряжения при соединении нагрузки «треугольником». Исключая из рассмотрения сопротивления линейных проводов, линейные напряжения источника приравниваем к линейным напряжениям фаз потребителя. Фазные токи замыкаются по комплексным сопротивлениям нагрузки и по проводам.

За положительное направление фазного тока принимают направление соответствующее фазным напряжениям, от начала — к концу фазы, а для линейных токов — от источника — к приемнику. Токи в фазах нагрузки находятся по закону Ома:

$$\begin{aligned}U_{\text{л}} &= U_{\text{ф}} \\ \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_{ab}; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{bc}; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_{ac} \\ \dot{I}_{ab} &= \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \quad \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \quad \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}},\end{aligned}$$

Особенность «треугольника», в отличие от звезды, в том, что фазные токи здесь не равны линейным. По фазным токам можно вычислить линейные, воспользовавшись первым законом Кирхгофа для узлов (для вершин треугольника). А сложив уравнения, получим, что сумма комплексов токов линейных равна в треугольнике нулю независимо от симметричности или несимметричности нагрузки:

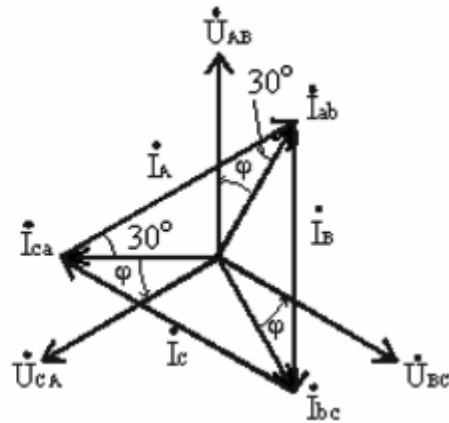
$$\begin{aligned}\dot{I}_A &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}, \\ \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C &= 0\end{aligned}$$

При симметричной нагрузке линейные (равные фазным в данном случае) напряжения создают систему симметричных токов в фазах нагрузки. Фазные токи являются равновеликими, а отличаются лишь фазами на треть периода, то есть на 120 градусов. Линейные токи — тоже равны между собой величинами, отличия лишь в фазах, что и отражено на векторной диаграмме:

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\phi = Z_\phi e^{\pm j\varphi}$$

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}},$$

$$I_A = I_B = I_C = I_L,$$



Допустим, что диаграмма построена для симметричной нагрузки индуктивного характера, тогда фазные токи запаздывают по отношению к фазным напряжениям на некоторый угол φ . Линейные токи образованы разностью двух токов фазных (так как соединение нагрузки «треугольник») и при этом симметричны.

Рассмотрев треугольники на диаграмме, легко видеть, что соотношение между токами фазными и линейными имеет вид:

$$I_A = 2I_{ab} \cos 30^\circ = \sqrt{3}I_{ab}$$

$$I_L = \sqrt{3}I_\phi, \quad I_\phi = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

То есть при симметричной нагрузке, соединенной по схеме «треугольник», действующее значение фазного тока в корень из трех раз меньше действующего значения тока линейного. В условиях симметрии для «треугольника» расчет для трех фаз сводится к расчету для единственной фазы. Линейное и фазное напряжения равны между собой, фазный ток находится по закону Ома, линейный ток — в корень из трех раз больше фазного.

$$U_\phi = U_L$$

$$I_\phi = U_\phi / Z_\phi$$

$$I_L = \sqrt{3} I_\phi$$

$$\varphi = \arctg (X_\phi / R_\phi)$$

Несимметричная нагрузка предполагает различие в комплексных сопротивлениях, что характерно для питания различных однофазных приемников от одной трехфазной сети. Здесь фазные токи, фазные углы, мощности в фазах, - будут различаться.

$$\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$$

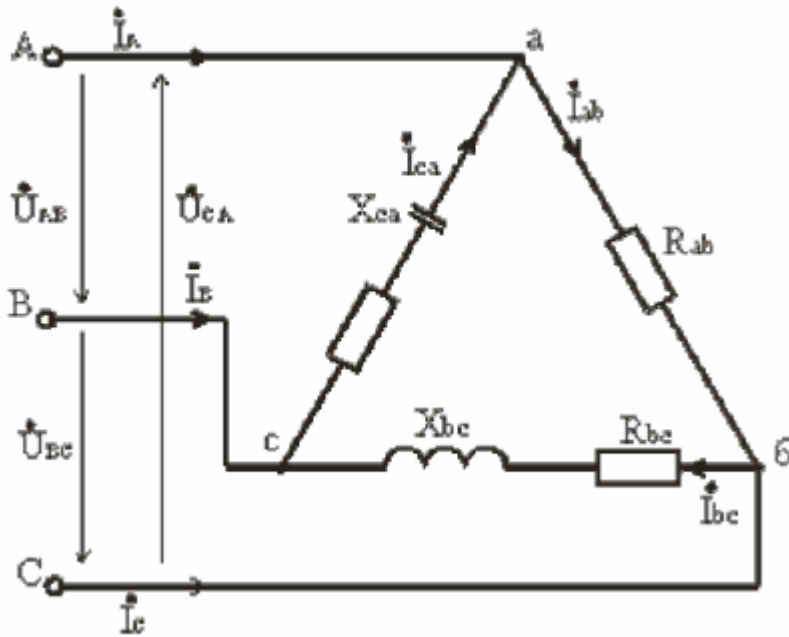
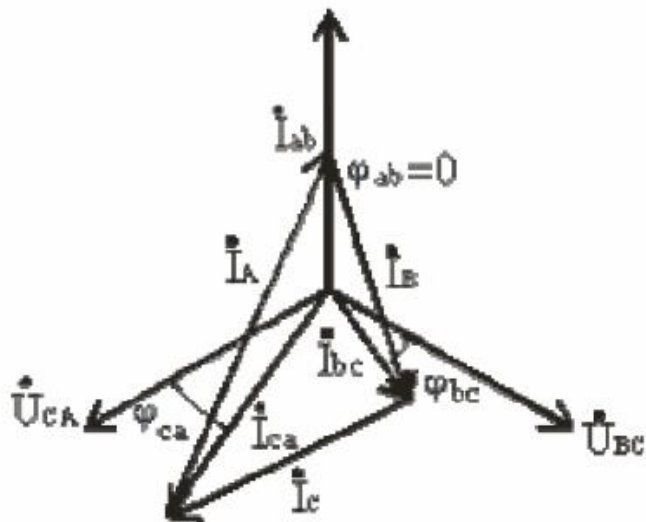


Рис.46.

Пусть в одной фазе имеется чисто активная нагрузка (ab), в другой — активно-индуктивная (bc), в третьей — активно-емкостная (ca). Тогда векторная диаграмма будет иметь вид подобный тому, как на рисунке:



$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}$$

Токи в фазах не симметричны, и для нахождения линейных токов придется прибегать к графическим построениям или к уравнениям для вершин по первому закону Кирхгофа.

Отличительная особенность схемы приемника «треугольник» в том, что при варьировании сопротивления в одной из трех фаз, для оставшихся двух фаз условия не изменятся, поскольку линейные напряжения никак не поменяются. Изменится лишь ток в одной конкретной фазе и токи в передающих проводах, к которым данная нагрузка подключена.

В связи с данной особенностью схема соединения трехфазной нагрузки по схеме «треугольник» востребована обычно для питания несимметричной нагрузки.

В ходе расчета несимметричной нагрузки в схеме «треугольник», первым делом вычисляют фазные токи, затем сдвиги фаз, и только потом находят линейные токи в соответствии с уравнениями по первому закону Кирхгофа или прибегают к векторной диаграмме.

Мощность в трехфазной цепи

Для трехфазной цепи, как и для любой цепи переменного тока, характерны полная, активная и реактивная мощности. Так, активная мощность для несимметричной нагрузки равна сумме трех активных составляющих:

$$P = P_a + P_b + P_c = U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c$$

Реактивная мощность — есть сумма реактивных мощностей в каждой из фаз:

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c = U_a I_a \sin \varphi_a + U_b I_b \sin \varphi_b + U_c I_c \sin \varphi_c$$

Для «треугольника» подставляются фазные величины, как то:

$$P_{ab} = U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_{ab}$$

Полная мощность каждой из трех фаз считается так:

$$\begin{aligned} S_a &= U_a I_a; \\ S_b &= U_b I_b; \\ S_c &= U_c I_c \end{aligned}$$

Полная мощность любого трехфазного приемника:

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

Для симметричного трехфазного приемника:

$$\begin{aligned} P &= 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi \\ Q &= 3Q_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi \end{aligned}$$

Для симметричного приемника, включенного по схеме «звезда»:

$$I_\phi = I_L, \quad \dot{U}_\phi = \dot{U}_L / \sqrt{3},$$

Для симметричного «треугольника»:

$$U_L = U_\phi, \quad I_\phi = I_L / \sqrt{3}$$

Значит и для «звезды», и для «треугольника»:

$$\dot{U}_\phi \dot{I}_\phi = 1/\sqrt{3} \dot{U}_L \dot{I}_L$$

Мощности активная, реактивная, полная — для любой симметричной схемы приемника:

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi; \\ Q &= \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi; \\ S &= \sqrt{3} U_L I_L. \end{aligned}$$

Работа трехфазного тока.

При подключении к каждому проводу трёхфазного источника тока осциллограф - прибор, рисующий колебания напряжения на временной шкале, мы увидим, что на каждом из них ток имеет идентичную форму - синусоиды. Но каждая из них будет сдвинута относительно соседней на 120 градусов, то есть на 1/3 периода.

Например, в тот момент, когда на фазе А напряжение равно нулю, на фазе В напряжение, пройдя максимум, снижается, а фаза С, где полярность тока уже сменилась имеет отрицательный (обратно направленный ток).

Через треть периода (0,007 сек) "на нуле" будет уже фаза С, фаза А пройдёт пик, снижаясь к нулю, а фаза В (как С, треть периода назад) будет иметь обратную полярность. И так по кругу.

В любой момент времени, между любыми двумя проводами вольтметр переменного тока, он покажет одну и ту же цифру - 380 Вольт. Это так называемое "линейное напряжение". Откуда же в наших розетках берётся значение напряжения 220 Вольт? Здесь "вступает в игру" четвёртый провод - нейтраль или "ноль".

Строго говоря, для передачи энергии и работы трёхфазных приборов, ноль не требуется. Ток (благодаря сдвигу синусоид) прекрасно перетекает от фазы к фазе, выполняя любую нужную работу - вращение двигателя, нагрев ТЭНа или освещение, если найти светильник на 380 Вольт. Ноль нужен в двух случаях:

- когда нужно запитать однофазный прибор;
- если нужно, для целей защиты людей, обеспечить заземление.

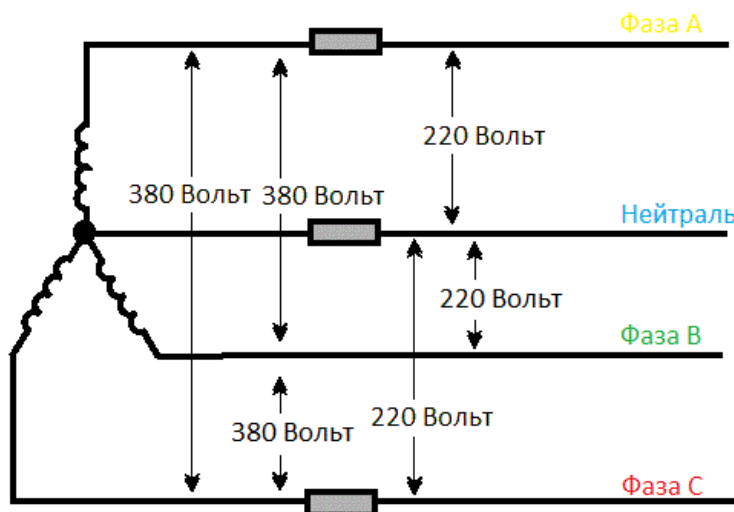


Рис.48

Трёхфазная система с нейтралью

Все три фазы соединяются одним "хвостом" вместе. Между оставшимися концами напруга по-прежнему 380 Вольт. А вот между "свободным" хвостом и

точкой соединения уже меньше (в 1,73 раза) - 220 Вольт ("фазное напряжение"). К этим выводам можно подключать электроприборы имеющие по два провода питания - они будут работать как надо.

Простота и гениальность системы трёх фаз - в её универсальности. К одной и той же линии могут быть подключены простые приборы на 220 Вольт и мощные электродвигатели на трёх фазах, маломощные настольные лампы и сверхмощные плавильные печи и всё будет работать без перебоев и долгие годы. Главное, чтобы хватило мощности источника тока - генератора или трансформатора.

И, при передаче энергии на большие расстояния, трёхпроводная линия, по сравнению с двухпроводной, обходится на треть дешевле, благодаря экономии на проводах.

4.9. Условные графические обозначения на электрических принципиальных схемах

Электрическая схема - это текст, описывающий определенными символами содержание и работу электротехнического устройства или комплекса устройств, что позволяет в краткой форме выразить этот текст.

Для того чтобы прочесть любой текст, необходимо знать алфавит и правила чтения. Так, для чтения схем следует знать символы - условные обозначения и правила расшифровки их сочетаний.

Основу любой электрической схемы представляют **условные графические обозначения** различных элементов и устройств, а также связей между ними. Язык современных схем подчеркивает в символах подчеркивает основные функции, которые выполняет в схеме изображенных элемент. Все правильные условные графические обозначения элементов электрических схем и их отдельных частей приводятся в виде таблиц в стандартах.

Условные графические обозначения образуются из простых геометрических фигур: квадратов, прямоугольников, окружностей, а также из сплошных и штриховых линий и точек. Их сочетание по специальной системе,

которая предусмотрена стандартом, дает возможность легко изобразить все, что требуется: различные электрические аппараты, приборы, электрические машины, линии механической и электрической связей, виды соединений обмоток, род тока, характер и способы регулирования и т. п.

Кроме этого в условных графических обозначениях на электрических принципиальных схемах дополнительно используются специальные знаки, поясняющие особенности работы того или иного элемента схемы.

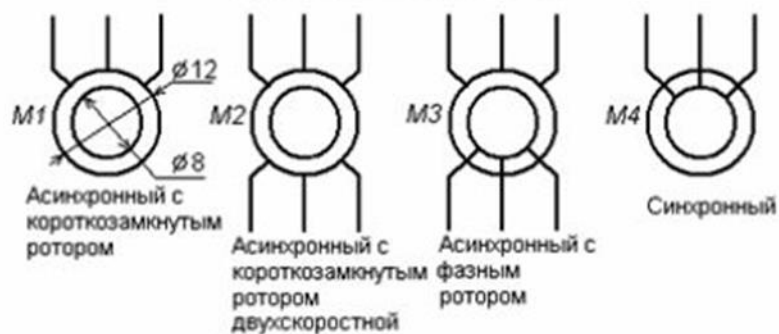
Так, например, существует три типа контактов - замыкающий, размыкающий и переключающий. Условные обозначения отражают только основную функцию контакта - замыкание и размыкание цепи. Для указания дополнительных функциональных возможностей конкретного контакта стандартом предусмотрено использование специальных знаков, наносимых на изображение подвижной части контакта. Дополнительные знаки позволяют найти на схеме контакты кнопок управления, реле времени, путевых выключателей и т.д.

Отдельные элементы на электрических схемах имеют не одно, а несколько вариантов обозначения на схемах. Так, например, существует несколько равноценных вариантов обозначения переключающих контактов, а также несколько стандартных обозначений обмоток трансформатора. Каждое из обозначений можно применять в определенных случаях.

Если в стандарте нет нужного обозначения, то его составляют, исходя из принципа действия элемента, обозначений, принятых для аналогических типов аппаратов, приборов, машин с соблюдением принципов построения, обусловленных стандартом.

Условные графические обозначения и размеры некоторых элементов принципиальных схем:

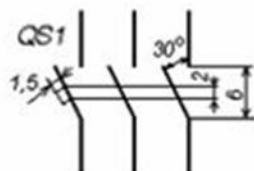
Трехфазные двигатели



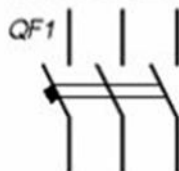
Двигатель постоянного тока



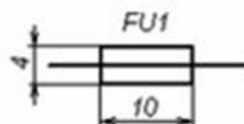
Рубильник



Автоматический выключатель



Предохранитель



Магнитный пускатель



Тепловое реле



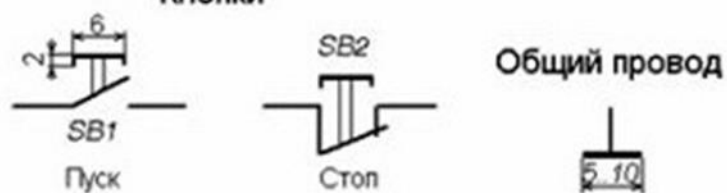
Электромагнитное реле напряжения KV (KA - тока)



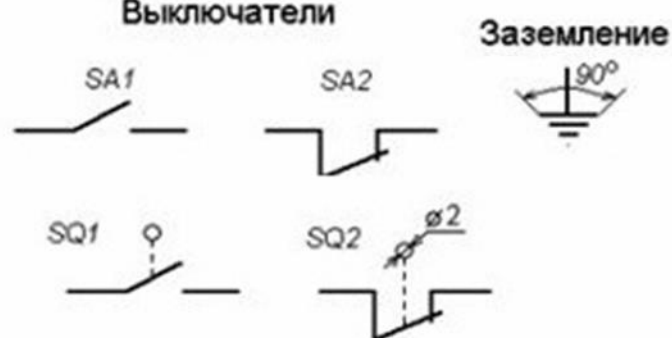
Реле времени



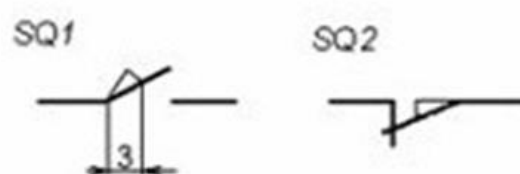
Кнопки



Выключатели

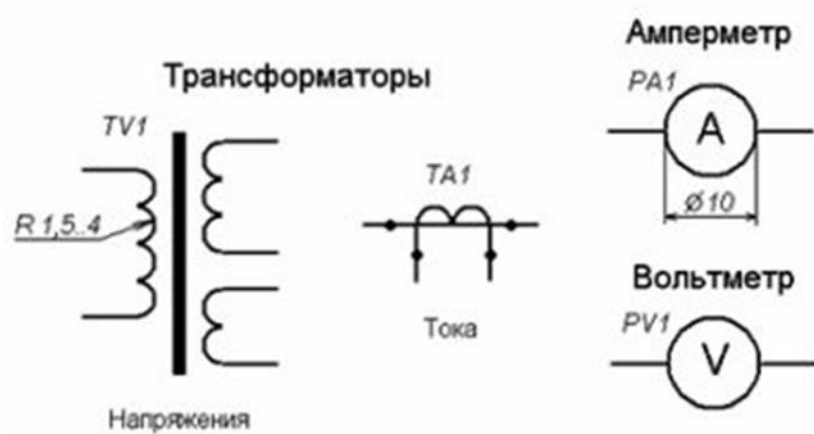


концевые, путевые

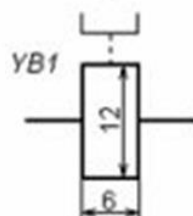


Лампы

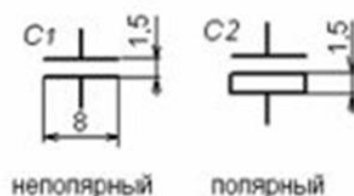




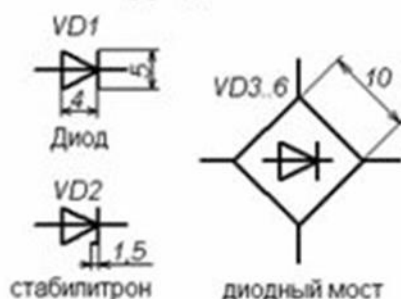
Электромагнитная муфта, тормоз



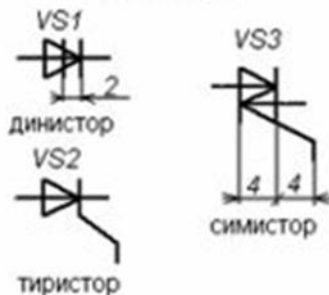
Конденсаторы



Диоды



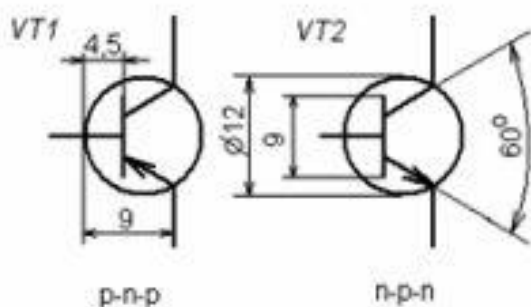
Тиристоры



Резисторы



Транзисторы биполярные



**Стандарты. Условные графические обозначения на электрических
схемах и схемах автоматизации:**

ГОСТ 2.710-81 Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах

ГОСТ 2.747-68 Размеры условных графических обозначений

ГОСТ 21.614-88 Изображения условные графические (в настоящий момент заменен и может использоваться только как справочный)

ГОСТ 21.210-2014 Условные графические изображения электрооборудования и проводок на планах

ГОСТ 2.755-87 Устройства коммутационные и контактные соединения

ГОСТ 2.756-76 Воспринимающая часть электромеханических устройств

ГОСТ 2.709-89 Обозначения условные проводов и контактных соединений

ГОСТ 21.404-85 Обозначения приборов и средств автоматизации

4.10. Логические элементы в электрических схемах

Логические элементы — устройства, осуществляющие определенную связь между входными и выходными величинами. Элементарный логический элемент имеет два входа и один выход. Сигналы на них дискретны, т. е. принимают одно из двух возможных значений — 1 или 0. За единицу иногда принимают наличие напряжения, а за нуль — отсутствие его. Работа таких устройств анализируется с помощью понятий булевой алгебры — алгебры логики.

Устройства, оперирующие дискретными сигналами, называют дискретными. Работа таких устройств анализируется с помощью понятий булевой алгебры — алгебры логики.

Основные положения алгебры логики

Логической переменной называют входную величину, которая может принимать только два противоположных значения: $x = 1$ или $x = 0$. Логической

функцией называют зависимость выходной величины от входных, и сам выходной сигнал, который тоже может принимать только два значения: $y = 1$ или $y = 0$. Логическая операция — это действие, которое совершает логический элемент с логическими переменными в соответствии с логической функцией. Значения 1 и 0 взаимно противоположны (инверсны): $1 = 0$, $0 = 1$. Черточкой обозначается отрицание (инверсия).

Принимается, что $0 \cdot 0 = 0$, $0 + 0 = 0$, $1 - 0 = 0$, $1 + 0 = 1$, $1 \cdot 1 = 1$, $1 + 1 = 1$.

При преобразовании формул алгебры логики сначала выполняют операции инверсии, затем умножения, сложения и затем все остальные.

Смотрите также по этой теме: Законы алгебры контактных схем

Основные логические операции рассмотрены здесь: Логические устройства

Логические элементы в виде релейно-контактных схем

Логические элементы могут быть представлены в виде релейно-контактной схемы.

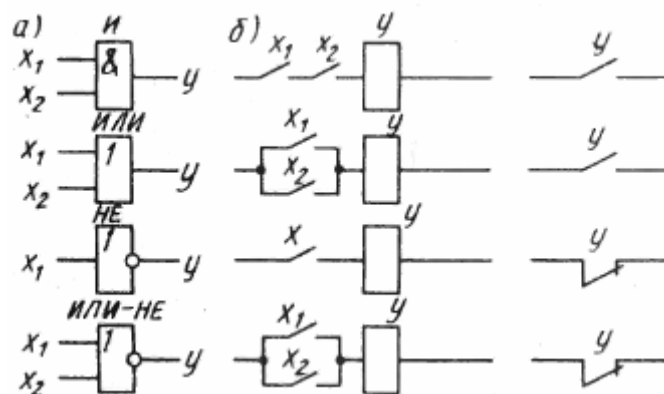


Рис.51. Основные логические элементы (а) и релейно-контактный эквивалент (б)

Если считать, что замкнутые контакты соответствуют единичному сигналу, а разомкнутые — нулевому, то элемент И можно представить соединенных контакта x_1 и x_2 и реле y . Если оба контакта замкнуты, то по катушке пойдет ток, реле сработает и его контакты замкнутся.

Элемент ИЛИ можно представить как два замыкающих контакта, соединенных параллельно. При замыкании или первого или второго из них реле срабатывает и замыкает свои контакты, через которые пойдет сигнал.

Элемент НЕ можно представить как один замыкающий контакт x и один размыкающий y . Если сигнал на вход не подавать ($x = 0$), то реле не срабатывает и контакты y остаются замкнутыми, ток через них проходит. Если же замкнуть контакты x , реле сработает и разомкнет свои контакты, тогда сигнал на выходе будет равен нулю.

Ниже изображена схема, выполняющая операцию ИЛИ — НЕ. Если ни на один из входов не подавать сигнал, то транзистор останется закрытым, ток через него не потечет, а напряжение на выходе будет равно ЭДС источника $U_y = U_c$, т. е. $y = 1$.

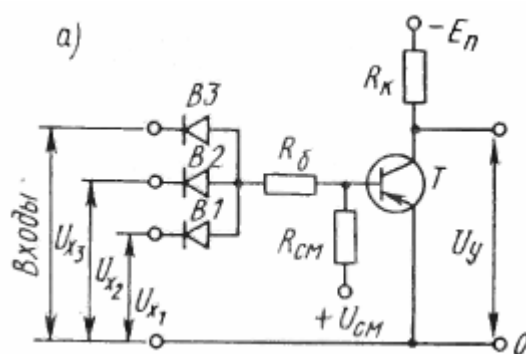


Рис.52. Схема логического элемента ИЛИ — НЕ, выполняющего логические операции

Если хотя бы на один из входов подать напряжение, то сопротивление транзистора упадет от ∞ до 0 и по цепи эмиттер — коллектор потечет ток. Падение напряжения на транзисторе станет равным нулю ($U_y = 0$). Это означает, что сигнала на выходе нет, т. е. $y = 0$. Для нормальной работы элемента необходимо создавать смещение потенциала базы относительно общей точки, это достигается специальным источником $U_{см}$ и резистором $R_{см}$. Резистор R_b ограничивает ток база — эмиттер.

Логические элементы, построенные на электромагнитных реле, транзисторах, магнитных сердечниках, электронной лампе, пневматических

реле, имеют слишком большие размеры, поэтому сейчас применяют интегральные микросхемы. Логические операции в них происходят на уровне кристаллов.



Рис.53.

Примеры использования логических элементов в схемах

Рассмотрим несколько узлов электрических схем, наиболее часто встречающихся в электроприводе.

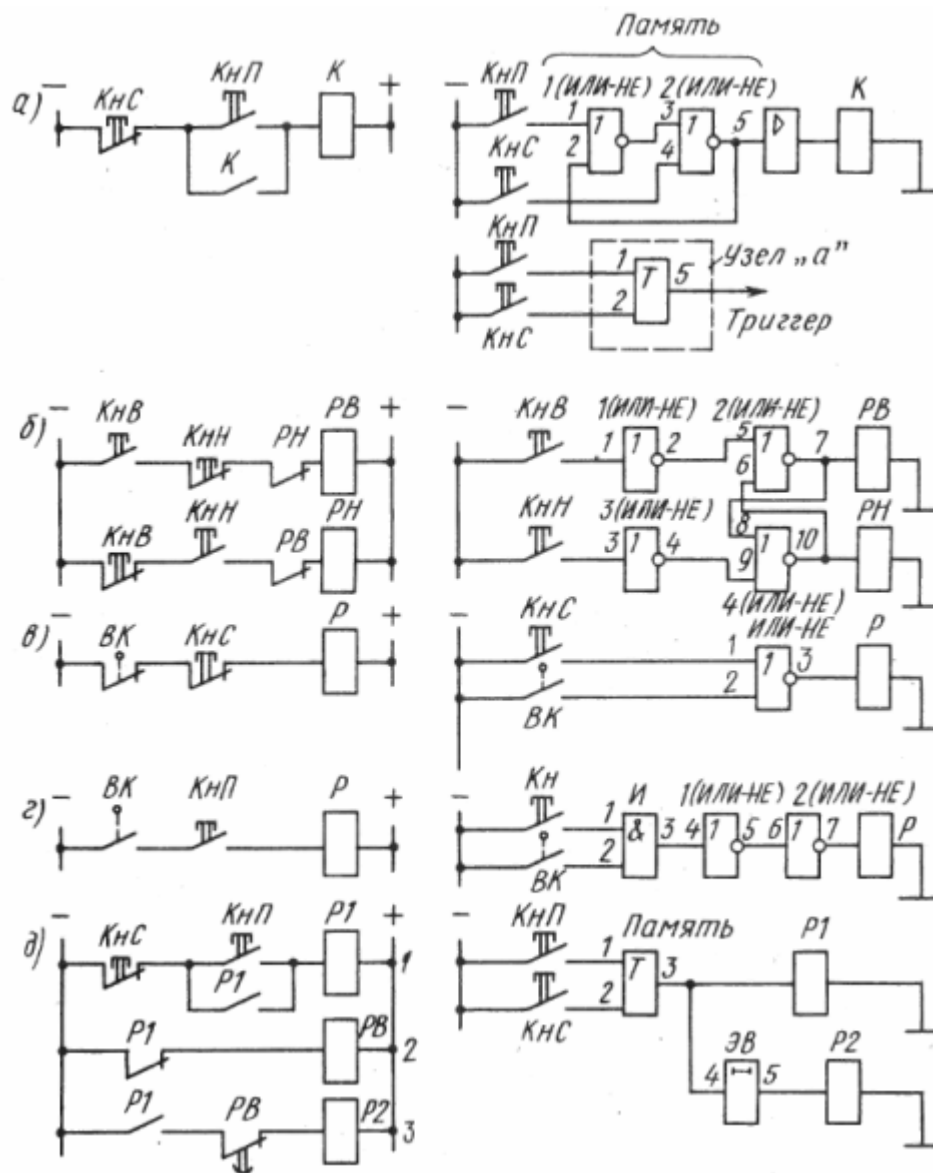


Рис.54. Узлы схем с логическими элементами: 1 - 8 — номера входа и выхода
 а - узел питания катушки контактора К, б - узел электрической блокировки двух реле, в - узел отпускания реле, г - узел включения реле, д - схема управления двумя реле

При нажатии кнопки КнП ток проходит по линии и срабатывает контактор. Его главные контакты (на схеме не показаны) подключают двигатель к сети, а контакты К, замыкаясь, шунтируют кнопку КнП. Теперь ток будет протекать по этим контактам, а кнопку КнП можно отпустить. Под действием пружины она размыкает свои контакты, но катушка будет продолжать питаться через контакты К. При нажатии кнопки КнС линия разрывается и контактор

отпускается.

Этот узел можно выполнить на логических элементах. В схему входят катушка контактора К, кнопки КнП и КнС, два логических элемента ИЛИ — НЕ и усилитель. Исходное состояние $x_1 = 0$ и $x_2 = 0$, тогда на выходе элемента 1 получим $y_1 = x_1 + x_2 = 0 + 0 = 1$. На выходе элемента 2 — $y_5 = x_3 + x_4 = 1 + 0 = 0$, т. е. катушка обесточена, реле не срабатывает.

Если нажать КнП, то $y_1 = x_1 + x_2 = 1 + 0 = 0$. На выходе элемента 2 $y_5 = x_3 + x_4 = 0 + 0 = 1$. По катушке проходит ток и контактор срабатывает. Сигнал y_2 подается на вход x_2 но y_1 от этого не меняется, так как $y_1 = x_1 + x_2 = 1 + 1 = 0$. Таким образом, катушка контактора находится под током.

Если нажать кнопку КнС, то на вход второго элемента будет подаваться сигнал $x_4 = 1$, тогда $y_2 = x_3 + x_4 = 0 + 1 = 0$ и контактор отпускается.

Рассмотренная схема способна "запоминать" команды: сигнал y_2 остается неизменным, даже если отпустить кнопку.

Такую же функцию памяти можно осуществить с помощью триггера. Если на вход подать сигнал $x_1 = 1$, то на выходе появится сигнал $y = 1$ и будет оставаться неизменным до тех пор, пока не нажмем кнопку КнС. Тогда триггер переключается и на выходе появляется сигнал $y = 0$. Он будет оставаться без изменения до тех пор, пока снова не нажмем кнопку КнП.

Узел электрической блокировки двух реле РВ (вперед) и РН (назад), исключающий их одновременное срабатывание, так как это приведет к короткому замыканию. Действительно, при нажатой кнопке КнВ срабатывает реле РВ, а его блок-контакты размыкаются и катушка РН не сможет оказаться под током, даже если нажать кнопку КнН. Отметим, что шунтирование замыкающих контактов кнопок здесь не предусмотрено, т. е. узел памяти отсутствует.

В схеме с логическими элементами при нажатии кнопки КнВ на первом элементе получим $x_1 = 1$, $y_2 = x_1 = 0$. На втором элементе $y_7 = x_5 + x_6 = y_2 + x_6 = 0 + 0 = 1$

Реле РВ срабатывает и сигнал y_7 подается на вход элемента 4 (y_7 — $x_8 = 1$). На входе элемента 3 сигнал отсутствует ($x_2 = 0$), тогда $y_4 = x_2 = 1$. На

четвертом элементе: $y_{10} = x_8 + x_9 = x_8 + y_4 = 1 + 1 = 0$, т. е. реле РН сработать не может, даже если нажать кнопку КнН. Тогда получим такой же результат: $y_{10} = x_8 + x_9 = x_8 + y_4 = 1 + 0 = 0$.

Узел отпускания реле в случае нажатия кнопки КнС или размыкания контактов конечного выключателя ВК. В схеме с логическими элементами в исходном положении $y_3 = x_1 + x_2 = 0 + 0 = 1$, т. е. катушка реле находится под током. При нажатии кнопки КнС получим $y_3 = x_1 + x_2 = 1 + 0 = 0$ и реле отпускается.

Узел включения реле в случае нажатия кнопки КнП при замкнутом контакте ВК. В схеме с логическими элементами в нормальном состоянии контактов получим $y_7 = x_6 = y_6 = x_4 = y_3 = x_1x_2 = 0 \cdot 0 = 0$. Если нажата только кнопка КнП, то $y_7 = x_1x_2 = 1 \cdot 0 = 0$. Если замкнут только контакт ВК, то $y_7 = x_1x_2 = 0 \cdot 1 = 0$. При замыкании КнП и ВК получим $y_7 = x_1x_2 = 1 \cdot 1 = 1$. Это означает, что реле срабатывает.

Схема управления двумя реле Р1 и Р2. При подаче напряжения на цепь срабатывает реле времени РВ, его контакты в линии 3 размыкаются мгновенно. Схема готова к работе. При нажатии кнопки КнП срабатывает реле Р1, его контакты замыкаются, шунтируют кнопку. Другие контакты в линии 2 размыкаются, а в линии 3 замыкаются. Реле РВ отпускается и его контакты с выдержкой времени замыкаются, срабатывает реле Р2. Таким образом, после нажатия кнопки КнП реле Р1 срабатывает сразу, а Р2 — через некоторое время.

В схеме с логическими элементами узел "Память" построен на триггере. Пусть на выходе у него сигнал отсутствует ($y_3 = 0$), реле Р1 и Р2 обесточены. Нажимаем кнопку КнП, появляется сигнал на выходе триггера. Срабатывает реле Р1 и начинает отсчет времени элемент ЭВ.

Когда появится сигнал $y_5 = 1$, срабатывает реле Р2. При нажатии кнопки КнС триггер переключается и тогда $y_3 = 0$. Реле Р1 и Р2 отпускаются.

Типовые узлы с логическими элементами широко применяют в более сложных схемах, причем такие схемы гораздо проще, чем схемы на релейно-контакторной аппаратуре.

4.11. Виды маркировки на схемах и оборудовании, позиционные обозначения элементов

В электрических схемах очень важна маркировка, без которой они практически не читаются. Система обозначений цепей на схемах должна соответствовать ГОСТ 2.709-89.

Для одной электроустановки в схемах всех типов одни и те же элементы и участки электрических цепей обозначают одинаково. При разногласиях из-за ошибки в маркировке за основную принимают маркировку, указанную на принципиальной схеме. Маркировку выполняют как на чертежах, так и на соответствующих аппаратах и устройствах.

На принципиальных схемах маркировку проставляют над участком проводника, а при вертикальном расположении цепи — справа от него.

Виды и порядок маркировок следующие:

1) заводская маркировка аппаратов и изделий (например, смотрите - Маркировка отечественных люминесцентных ламп, Маркировка силовых кабелей);

2) маркировка выводов электрических машин и аппаратов (унифицированных);

Например, выводы обмоток машин трехфазного тока обозначаются в соответствии с ГОСТ 26772 - 85.

Таблица №1. Маркировка выводов трехфазных машин

Наименование и схема соединения обмоток	Число выводов	Наименование выводов	Обозначение выводов	
			Начало	Конец
Обмотки статора (якоря). Открытая схема	6	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза	U1 (C1) V1 (C2) W1 (C3)	U2 (C4) V2 (C5) W2 (C6)
Соединение звездой	3 или 4	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза Нейтраль	U (C1) V (C2) W (C3) N (0)	

Соединение треугольником		Первый зажим Второй зажим Третий зажим	U (C1) V (C2) W (C3)	
Обмотки возбуждения (индукторов) синхронных машин	2		F1 (И1)	F2 (И2)

3) позиционные обозначения. Каждый элемент электрической схемы должен иметь обозначение, которое представляет собой сокращенное наименование элемента и может отражать функциональное назначение элемента. Например, реле времени - КТ1, КТ2, автоматический выключатель — QF1 и т.д.;

4) маркировка участков электрических цепей. Каждый участок цепи между двумя элементами схемы должен быть промаркирован. Марка может быть цифровой или цифробуквенной. Маркировку строят по координатному и адресному принципам в виде развертки или по порядку слева направо (подробнее об этом смотрите здесь - Обозначение электрических цепей на схемах);

5) схемная маркировка выводов аппаратов определяется маркой присоединенного провода и может не совпадать с заводской маркировкой места вывода аппарата;

6) заводская маркировка мест выводов цепей электроаппаратуры;

7) адресная маркировка, которая обычно указывается на схемах соединений и показывает, с каким аппаратом или элементом схемы соединяется данная цепь;

8) нумерация цепей по порядку (сверху вниз). Такая маркировка облегчает описание схемы, позволяя делать ссылки в тексте на номера цепей и быстро их находить;

9) нумерация участков — то же, что и для отдельных цепей, но с объединением нескольких цепей в один блок.

Позиционные обозначения на электрических схемах

Обозначения буквенно-цифровые на электрических схемах должны соответствовать ГОСТ 2.710-81

Таблица №2. Позиционные обозначения элементов на схемах. Буквенные коды наиболее распространенных элементов

Первая буква кода (обязательная)	Группа видов элементов	Примеры видов элементов
А	Устройства	Усилители, приборы телеуправления, лазеры, мазеры
В	Преобразователи неэлектрических величин в электрические (кроме генераторов и источников питания) или наоборот аналоговые или многозарядные преобразователи или датчики для указания или измерения	Громкоговорители, микрофоны, термоэлектрические чувствительные элементы, детекторы ионизирующих излучений, звукозаписывающие аппараты, сельсины
С	Конденсаторы	-
Д	Схемы интегральные, микросборки	Схемы интегральные аналоговые цифровые, логические элементы, устройства памяти, устройства задержки
Е	Элементы разные	Осветительные устройства, нагревательные элементы
Ф	Разрядники, предохранители, устройства защитные	Дискретные элементы защиты потоку и напряжению, плавкие предохранители, разрядники
Г	Генераторы, источники питания, кварцевые осцилляторы	Батареи, аккумуляторы, электрохимические и электротермические источники
Н	Устройства индикационные и сигнальные	Приборы звуковой и световой сигнализации, индикаторы
К	Реле, контакторы, пускатели	Реле токовые и напряжения, реле электротепловые, реле времени, контакторы, магнитные пускатели
Л	Катушки индуктивности,	Дроссели люминесцентного

	дроссели	освещения
M	Двигатели	Двигатели постоянного и переменного тока
P	Приборы, измерительное оборудование	Показывающие, регистрирующие и измерительные приборы, счетчики, часы
Q	Выключатели и разъединители в силовых цепях	Разъединители, короткозамыкатели, автоматические выключатели (силовые)
R	Резисторы	Переменные резисторы, потенциометры, варисторы, терморезисторы
S	Устройства коммутационные в цепях управления, сигнализации и измерительных	Выключатели, переключатели, выключатели, срабатывающие от различных воздействий
T	Трансформаторы, автотрансформаторы	Трансформаторы тока и напряжения, стабилизаторы
U	Преобразователи электрических величин в электрические, устройства связи	Модуляторы, демодуляторы, дискриминаторы, инверторы, преобразователи частоты, выпрямители
V	Приборы электровакуумные, полупроводниковые	Электронные лампы, диоды, транзисторы, тиристоры, стабилитроны
W	Линии и элементы сверхвысокой частоты, антенны	Волноводы, диполи, антенны
X	Соединения контактные	Штыри, гнезда, разборные соединения, токосъемники
Y	Устройства механические с электромагнитным приводом	Электромагнитные муфты, тормоза, патроны
Z	Устройства оконечные, фильтры, ограничители	Линии моделирования, кварцевые фильтры

Таблица №3. Примеры двухбуквенных кодов, наиболее часто встречающиеся в электрических схемах

Первая буква кода (обязательная)	Группа видов элементов	Примеры видов элементов	Двухбуквенный код
В	Преобразователи неэлектрических величин в электрические (кроме генераторов и источников питания) или наоборот аналоговые или многоразрядные преобразователи или датчики для указания или измерения	Тепловой датчик	ВК
		Фотоэлемент	ВL
		Датчик давления	ВР
		Датчик частоты вращения (тахогенератор)	ВR
		Датчик скорости	ВV
Е	Элементы разные	Нагревательный элемент	ЕК
		Лампа осветительная	ЕL
F	Разрядники, предохранители, устройства защитные	Предохранитель плавкий	FU
G	Генераторы, источники питания	Батарея	GB
H	Элементы индикаторные и сигнальные	Прибор звуковой сигнализации	HA
		Прибор световой сигнализации	HL
K	Реле, контакторы, пускатели	Реле токовое	KA
		Реле электротепловое	KK
		Контактор, магнитный пускатель	KM
		Реле времени	KT
		Реле напряжения	KV
S	Устройства коммутационные в цепях управления, сигнализации и измерительных.	Выключатель или переключатель	SA
		Выключатель кнопочный	SB

	Примечание. Обозначение SF применяют для аппаратов не имеющих контактов силовых цепей	Выключатель автоматический	SF
		Выключатели, срабатывающие от различных воздействий:	
		- от уровня	SL
		- от давления	SP
		- от положения (путевой)	SQ
		- от частоты вращения	SR
		- от температуры	SK
Q	Выключатели и разъединители в силовых цепях	Выключатель автоматический	QF