

Тема 12. Передача и распределение электрической энергии

Вопросы темы.

1. Назначение и классификация электрических сетей, их устройство и графическое изображение.
2. Провода, кабели, электроизоляционные материалы в сетях напряжением до 1000 В.
3. Городские электрические сети.
4. Падение и потеря напряжения в линиях электроснабжения.
5. Расчёт проводов по допустимой потере напряжения в линиях постоянного, однофазного и трёхфазного тока.
6. Расчёт проводов по допустимому нагреву.
7. Действие электрического тока на организм. Напряжение прикосновения и его допустимые значения. Однофазное и двухфазное прикосновение.
8. Защитное заземление трёхпроводных цепей трёхфазного тока.
9. Защитное заземление (зануление) четырёхпроводных цепей трёхфазного тока.

1. Назначение и классификация электрических сетей, их устройство и графическое изображение.

Электрическая энергия универсальна: она удобна для дальних передач, легко распределяется по отдельным потребителям и с помощью сравнительно несложных устройств преобразуется в другие виды энергии.

Эти задачи решает энергетическая система, где осуществляются преобразование энергии топлива или падающей воды в электрическую энергию, трансформация токов и напряжений, распределение и передача электрической энергии потребителям.

Часть энергетической системы, включающую трансформаторные подстанции (ТП) и линии электропередачи (ЛЭП), называют *электрической сетью*. Таким образом, электрическая сеть служит для передачи электрической энергии от мест производства к местам потребления и для распределения ее по группам и отдельным потребителям.

Электрические сети классифицируют по различным признакам.

- в зависимости от напряжения между проводами линии различают сети напряжением до 1000 и свыше 1000 В;
- по роду тока различают электрические сети постоянного, однофазного и трехфазного токов;

- *в зависимости от конструктивных особенностей* бывают воздушные и кабельные сети, а также сети внутри зданий и объектов.

Основные требования, предъявляемые к электрическим сетям, сводятся к экономии электротехнических материалов и снижению первоначальных затрат при гарантированной надежности электросети и высоком качестве электроэнергии. Для удовлетворения этих требований разработан ряд мероприятий, к которым относятся, в частности, применение повышенных напряжений, стальных проводов, регулирование напряжения.

В настоящее время сети трехфазного тока напряжением 220/127 В вытесняются сетями напряжением 380/220 В, сети напряжением 6 кВ — сетями 10 кВ и т. д.

При прокладке и эксплуатации электрических сетей большое внимание должно быть уделено обеспечению безопасности обслуживающего персонала.

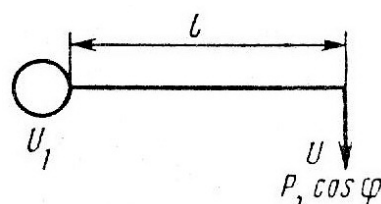
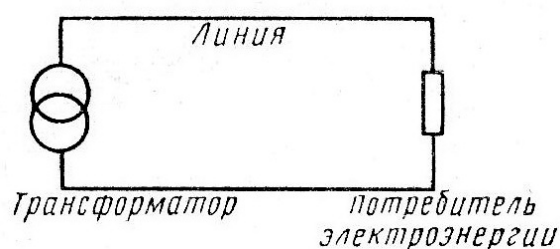
Расчет электрических сетей производят на основании исходных данных и нормативов ГОСТа, определяющего типовые элементы сети и ее характеристики.

К исходным данным относятся напряжение источника, напряжение и мощность потребителей, вид линии (однофазная, трехфазная, воздушная, кабельная), ее конфигурация (распределение потребителей вдоль линии, схема соединений), длина проводов (расстояние между источником электроэнергии и потребителями), условия окружающей среды и требования эксплуатации (техники безопасности).

В результате электрического расчета необходимо: 1) рассчитать площади поперечного сечения всех проводов так, чтобы потери напряжения в них и температура нагрева проводов не превышали допустимых норм; выбрать тип и стандартные площади сечения проводов; 2) определить требуемые характеристики плавких вставок и выбрать соответствующие предохранители; 3) выбрать схемы заземления, вычислить число и размеры заземлителей.

При расчете электрических сетей обычно используют так называемые однолинейные схемы. Многолинейная и соответствующая ей однолинейная схемы электрической цепи представлены на рис. 1, а, б.

На однолинейной схеме указывают: напряжение источника U_1 , (напряжение в начале линии), напряжение потребителя U (напряжение в конце линии), мощность P и коэффициент мощности $\cos \varphi$ потребителя, длину линии l .



а)

б)

Рис. 12.1. Многолинейная (а) и однолинейная (б) схемы электрической цепи

Число проводов в линии определяют по числу черточек, поставленных у источника. В качестве примера на рис. 2 изображена однолинейная схема трехпроводной линии.



Рис. 12.2. Однолинейная схема трехпроводной линии

2. Провода, кабели, электроизоляционные материалы в сетях напряжением до 1000 В

Для прокладки воздушных линий используют различные виды голых проводов.

Стальные однопроволочные провода изготавливают диаметром не более 5 мм. В очень редких случаях применяют медные однопроволочные провода диаметром 5 мм (в районах повышенной влажности, химически загрязненной атмосферы).

Наибольшее распространение находят многопроволочные провода, которые имеют высокую прочность и гибкость. Их изготавливают из одинаковых проволок, число которых может достигать 37. Диаметр проволок и их число подбирают таким образом, чтобы обеспечить наибольшую плотность упаковки проволок в проводе. Обычно 6, 11, 18 проволок располагают вокруг одной центральной и слабо закручивают. В качестве примера на рис. 12.3 показано поперечное сечение провода ПС-35.

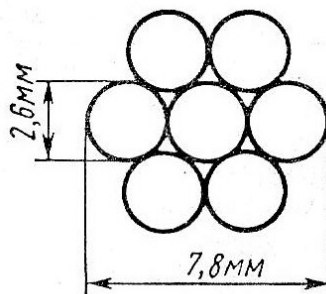


Рис. 12.3. Поперечное сечение провода ПС-35

Многопроволочные провода бывают стальными, алюминиевыми, сталеалюминиевыми и из биметаллических проволок. Для предохранения от ржавчины стальные провода делают из оцинкованной проволоки, иногда применяют нержавеющую сталь. В сталеалюминиевых проводах часть проволок — стальная, часть — алюминиевая. Этим обеспечивается механическая прочность при повышенной электропроводности. Биметаллические проволоки изготавливают электролитическим способом: стальную жилу покрывают слоем меди или алюминия.

Рассмотрим маркировку голых проводов для воздушных линий.

Медные провода обозначают буквой М, алюминиевые — А, сталеалюминиевые — буквами АС, стальные — ПС.

Однопроволочные провода обозначают буквой О. Цифры, следующие за буквами, указывают диаметр провода в миллиметрах (у однопроволочных проводов) или площадь поперечного сечения в миллиметрах в квадрате (у многопроволочных проводов). Например, ПС05 — провод стальной однопроволочный диаметром 5 мм; ПС35 — провод стальной многопроволочный площадью поперечного сечения 35 мм²; А25 — провод алюминиевый многопроволочный площадью поперечного сечения 25 мм² и т. д. Допустимые токовые нагрузки проводов при различных условиях приводятся в справочниках. Например, вне помещений при температуре нагрева провода 70° С и температуре окружающей среды 25° С для провода А16 допускается токовая нагрузка 105 А, для провода ПС04 - 30 А и т. д.

Для сравнительной характеристики голых проводов различных марок приведем некоторые выборочные данные:

Марка провода	М25	А25	АС25
Удельное активное сопротивление Ом/км	0,74	1,28	1,38
Удельная масса провода, кг/км	221	68	92

Таблица 1. Сравнительная характеристика голых проводов различных марок

Отсюда следует, что при равных площадях поперечного сечения стальной и сталеалюминиевый провода имеют близкие по значению активные сопротивления. Активное сопротивление медного провода примерно в 1,5 раза меньше, однако медь является дорогостоящим материалом и для проводов электрических сетей применяется редко.

Для электропроводки внутри помещений, как правило, используют изолированные провода из меди или алюминия. Изолированные однопроволочные провода имеют большую жесткость и площадь поперечного сечения не выше 10 мм².

Многопроволочные провода изготавливают из луженых медных или алюминиевых жил. Они удобны при монтаже и эксплуатации.

Для прокладки скрытых безопорных линий, а также для канализации электроэнергии, подводимой к подвижным объектам, служат электрические кабели. В

кабеле провода двух- или трехфазной линии заключены в прочную герметическую многослойную оболочку, что повышает надежность линий электропередачи. Кабели можно прокладывать под землей и под водой. Подземные кабели — основное средство канализации электроэнергии в крупных городах. Недостаток кабельных линий — их высокая стоимость.

В качестве электроизоляционных материалов используют вулканизированную резину, хлопчатобумажную пряжу, пропитанную специальными составами, промасленную бумагу. В последнее время широкое распространение получили поливинилхлоридные оболочки.

3. Электроснабжение промышленных предприятий

Источниками электрической энергии единой энергосистемы Украины служат тепловые (ТЭС), гидравлические (ГЭС) и атомные (АЭС) электростанции, имеющие общий режим производства энергии. Линии электропередачи, трансформаторные и распределительные устройства обеспечивают совместную работу электростанций и распределение энергии между потребителями.

Единая энергосистема (ЕЭС) обладает рядом преимуществ по сравнению с региональными энергосистемами: 1) максимальной надежностью электроснабжения; 2) возможностью маневрирования мощностью; 3) высоким качеством энергии (прежде всего стабильностью напряжения и частоты тока); 4) возможностью максимальной концентрации мощности источников энергии (при этом существенно снижаются затраты на строительство и эксплуатацию электростанций, а также расход топлива на 1 кВт*ч).

Около 2/3 всей электроэнергии ЕЭС потребляется промышленностью. Схема электроснабжения промышленных предприятий строится по ступенчатому принципу, число ступеней зависит от мощности предприятия и схемы размещения отдельных потребителей электроэнергии. На первой ступени напряжение энергосистемы подводится к главной подстанции, где оно от 110 - 220 кВ снижается до 10 - 6 кВ. Сети второй ступени подводят это напряжение к цеховым трансформаторным подстанциям, где оно понижается до напряжения потребителей. Третью ступень составляют сети, распределяющие напряжение цеховой подстанции между отдельными потребителями.

На крупных предприятиях с большим потреблением электроэнергии (химические, металлургические заводы) питание потребителей может осуществляться при напряжении 660 В. Большинство предприятий использует трехфазные сети 380/220 В. На некоторых (старых) предприятиях применяют систему 220/127 В.

В помещениях с повышенной опасностью допустимое напряжение питания потребителей не должно превышать 36 В, в особо опасных условиях (котлы, металлические резервуары) — 12 В.

По требуемой *надежности* питания потребители электрической энергии делят на три категории. К *первой категории* относятся такие потребители, пе-

перыв в снабжении которых электроэнергией связан с опасностью для людей или влечет за собой большой материальный ущерб (доменные цехи, котельные производственного пара, подъемные и вентиляционные установки шахт, аварийное освещение и др.). Они должны работать непрерывно. Электроприемники I категории должны обеспечиваться электроэнергией **от двух независимых источников питания**, причем перерыв в электроснабжении допускается только на время **автоматического включения резерва (АВР)**. **Независимым** называется источник питания объекта, на котором сохраняется напряжение при исчезновении его на других источниках.

Для потребителей *второй категории* (самых многочисленных) допускаются перерывы в питании на ограниченное время, необходимое **для включения резерва выездной бригадой или дежурным персоналом**.

К потребителям *третьей категории* относятся вспомогательные цехи и другие объекты, для которых допускается перерыв в электроснабжении до одних суток.

Для повышения надежности энергоснабжения предусматривается питание потребителей от двух независимых сетей и автоматически включаемого резервного источника электроэнергии. Различают «горячий» и «холодный» резервные источники. «Горячий» резервный источник обеспечивает немедленное аварийное питание, его используют для безаварийной остановки потребителя.

Дальнейшее улучшение систем электроснабжения промышленных предприятий связано с повышением напряжения питания (с 220 до 380 В, с 6 до 10 кВ и т. д.) при максимально возможном приближении высокого напряжения к потребителям (глубокий ввод) и уменьшении числа ступеней трансформации.

4. Падение и потеря напряжения в линиях электроснабжения

В проводах возникает падение напряжения, пропорциональное току и сопротивлению линии. Напряжения на зажимах потребителя U меньше напряжения на зажимах источника U_1 . Разность

$$\Delta U = U_1 - U \quad (1)$$

называют *потерей напряжения*.

Потерю напряжения часто выражают в процентах от номинального значения напряжения потребителя: $\frac{\Delta U}{U} \cdot 100$.

При заданном напряжении источника от потери напряжения зависит напряжение на зажимах потребителя, поэтому значение потери напряжения строго регламентируется. В линиях, по которым осуществляется питание силовой (электродвигатели, гальванические ванны и др.) нагрузки, допускается потеря напряжения, не превышающая 6% от номинального напряжения потребителя. В

осветительных сетях допускается потеря напряжения не более 2,5%. В зависимости от конкретных условий могут быть установлены и другие предельные значения потери напряжения.

Несоблюдение норм потери напряжения приводит к нарушению работы потребителей, уменьшению пусковых и вращающих моментов двигателей, изменению светового потока осветительных установок. Например, при уменьшении напряжения на 10% световой поток ламп накаливания уменьшается на $\frac{1}{3}$. Незначительное превышение напряжения относительно номинального приводит к резкому сокращению срока службы ламп накаливания.

Нетрудно видеть, что в цепях постоянного тока понятия падения и потери напряжения совпадают: $\Delta U = IR_{\text{лп}}$, где I - ток в линии; $R_{\text{лп}}$ - сопротивление провода линии.

Несколько сложнее выглядят эти зависимости в цепях переменного тока.

Рассмотрим векторную диаграмму токов и напряжений, изображенную на рис. 12.4.

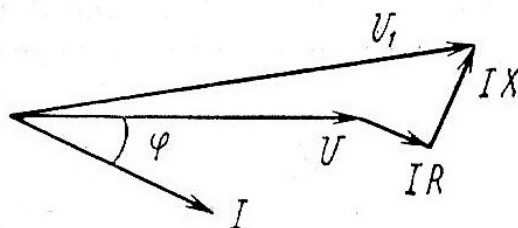


Рис. 12.4. Связь векторов напряжений на входе и выходе линии

Проходящий по линии ток нагрузки I сдвинут по фазе относительно напряжения U на угол φ , определяемый коэффициентом мощности нагрузки. Падение напряжения на активном сопротивлении линии IR совпадает по фазе с током I , а падение напряжения на реактивном сопротивлении линии IX опережает по фазе ток I на 90° (считаем, что емкостное сопротивление линии меньше ее индуктивного сопротивления). В этом случае падением напряжения считают векторную разность напряжений в начале и конце линии: $\overline{\Delta U} = \overline{U_1} - \overline{U} = \overline{I}Z$, где Z - полное сопротивление линии.

При расчете сетей напряжением до 1000 В считают, что реактивное сопротивление линий мало по сравнению с ее активным сопротивлением и им можно пренебречь. В этом случае

$$\Delta U \approx IR \cos \varphi, \quad (2)$$

где ΔU - потеря напряжения в линии; I - ток нагрузки, проходящий в проводах линии; $R = R_{\text{лп}}$ - активное сопротивление проводов линии; $\cos \varphi$ - коэффициент мощности потребителя электроэнергии.

5. Расчёт проводов по допустимой потере напряжения в линиях постоянного, однофазного и трёхфазного тока

Схема цепи постоянного тока изображена на рис. 12.5.

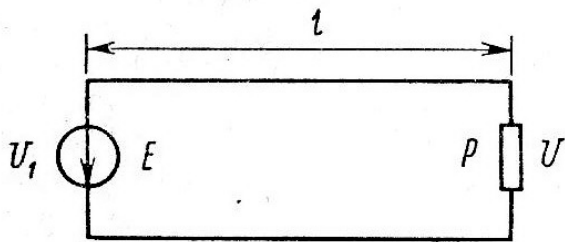


Рис. 12.5. Схема сети постоянного тока

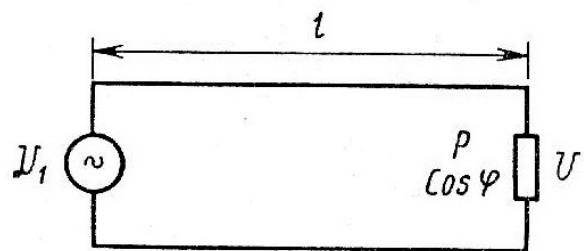


Рис. 12.6. Схема сети однофазного переменного тока

Выразим потерю напряжения через ток в линии и сопротивление проводов:

$$\Delta U = U_1 - U = IR_{\text{лп}}.$$

Сопротивление проводов

$$R_{\text{лп}} = \frac{2l\rho}{S},$$

где l - длина линии, м; S - площадь поперечного сечения провода, мм²; ρ - удельное сопротивление материала провода, Ом/(мм²*м).

Для меди $\rho =$, для алюминия $\rho =$. Поскольку линия двухпроводная, то в формулу введен коэффициент 2.

Таким образом,

$$\Delta U = I \cdot \frac{2l\rho}{S},$$

Откуда $S = \frac{2l\rho}{\Delta U}.$

Для удобства расчетов последнюю формулу преобразуют, для чего числитель и знаменатель умножают на напряжение U :

$$S = \frac{2IU\rho}{\Delta UU} = \frac{2IP\rho}{\Delta UU}$$

Здесь потеря напряжения ΔU выражена в вольтах. Кроме того, в формулу вводят процентную потерю напряжения $\delta U = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100$. В результате получают

$$S = \frac{2IU\rho}{\Delta UU} = \frac{2IP\rho}{\Delta UU} = \frac{2 \cdot 100 \cdot IP\rho}{\Delta U/U \cdot 100 \cdot U^2} = \frac{200IP\rho}{\delta UU^2}, \quad (3)$$

где S - в мм²; l - в м; P - в Вт, U - в В; δU - в %.

На рис. 8 изображена электрическая цепь однофазного тока. Для неё справедливо выражение

$$S = \frac{200IP\rho}{\delta UU^2}, \quad (4)$$

где $P = UI \cos \varphi$ - активная мощность потребителя.

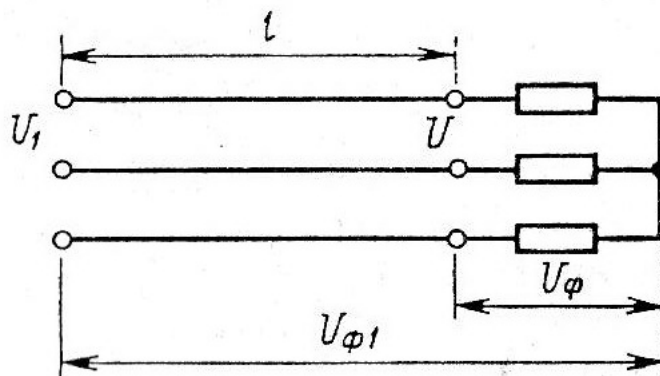


Рис. 12.7. Схема трёхфазной сети переменного тока

На рис. 12.7 изображена трехфазная цепь переменного тока с симметричной нагрузкой, для которой $\Delta U_\phi = U_{\phi 1} - U_\phi = IR_1 \cos \varphi$, где l - линейный ток; $R_1 = \frac{\rho l}{S}$ - сопротивление одного провода трехпроводной линии.

В справочных таблицах обычно указывается потеря линейного напряжения, которая в $\sqrt{3}$ раз больше потери фазного напряжения. Таким образом, $\Delta U = \sqrt{3}\Delta U_\phi = \sqrt{3}IR_1 \cos \varphi = \sqrt{3}l \frac{\rho l}{S} \cos \varphi = \frac{\delta UU}{100}$. Следовательно,

$$S = \frac{100\rho l\sqrt{3}I \cos \varphi}{\delta UU}$$

Умножив числитель и знаменатель последнего выражения на линейное напряжение U , окончательно найдём

$$S = \frac{100\rho l\sqrt{3}UI \cos \varphi}{\delta UU^2} = \frac{100\rho lP}{\delta UU^2}, \quad (5)$$

где $P = UI \cos \varphi$ - активная мощность, потребляемая симметричной трёхфазной нагрузкой.

6. Расчёт проводов по допустимому нагреву

Тепловой режим провода определяется уравнением теплового равновесия

$$I^2 R t = c F (\Theta - \Theta_0) t,$$

где F - площадь поверхности провода; c — коэффициент теплоотдачи (количество теплоты, отводимой в 1с с 1 м² поверхности при разности температур 1° С поверхности провода и окружающей среды); Θ - температура провода; Θ_0 - температура окружающей среды.

Левая часть этого уравнения выражает количество теплоты, выделяемой током I за время t в проводе, сопротивление которого равно R (закон Джоуля - Ленца). Правая часть уравнения определяет количество теплоты, отдаваемой проводом в окружающую среду за время t . Очевидно, что в установившемся режиме количество выделяющейся теплоты равно количеству теплоты, переходящей в окружающую среду.

Произведя в исходном уравнении подстановки $R = \frac{\rho l}{S}$, $F = \pi d l$, $d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}$, получим –

$$I^2 \frac{\rho l}{S} t = c \pi \sqrt{\frac{4S}{\pi}} I (\Theta - \Theta_0) t$$

где l - длина провода; S - площадь поперечного сечения провода; ρ - удельное сопротивление провода.

Последнее равенство преобразуют к виду

$$I = k S^{\frac{3}{4}} \sqrt{\frac{\Theta - \Theta_0}{\rho}},$$

где $k = \sqrt{2c\sqrt{\pi}}$.

Температура поверхности голого провода не должна превышать 70° С, а провода с резиновой или поливинилхлоридной изоляцией - 65° С. За расчетное значение температуры окружающей среды принимают максимальную среднемесячную температуру, которая колеблется от 15° С в северных районах до 35° С в южных.

Подставив в последнюю формулу площадь поперечного сечения провода, находят максимально допустимый ток, соответствующий заданным условиям. Так как формула довольно громоздка, то обычно пользуются заранее составленными таблицами. Если выбрана площадь сечения провода, то таблица позволяет определить максимально допустимый ток; если известен ток, проходящий по проводу, то таблица позволяет найти площадь сечения провода.

Площадь поперечного сечения провода S рассчитывается сначала по допустимой потере напряжения, а затем по допустимому нагреву. Из полученных значений S берут большее и округляют его до ближайшего стандартного значения, определяемого ГОСТом.

7. Действие электрического тока на организм человека. Напряжение прикосновения и его допустимые значения.

При прохождении электрического тока через организм человека в первую очередь поражается центральная нервная система, в результате чего нарушается работа сердечной мышцы и органов дыхания. Степень поражения зависит от силы и частоты тока, а также от пути прохождения тока через организм человека. При прочих равных условиях наибольшее физиологическое воздействие на организм человека оказывают токи частотой 50 - 60 Гц. Что касается силы тока, то неприятные ощущения возникают уже при токах в несколько миллиампер. При токе 25 мА (0,025 А) наступает судорожное сокращение мышц и человек оказывается не в состоянии самостоятельно разжать пальцы и освободиться от провода, находящегося под током. При токе 100 мА (0,1 А) практически мгновенно наступает паралич дыхания и сердца. Правилами техники безопасности за безусловно опасный принят ток 50 мА (0,05 А).

Постоянный ток примерно в 4-5 раз безопаснее переменного при напряжениях до 250-300 В. При более высоких напряжениях постоянный ток оказывается опаснее переменного.

Различают несколько степеней тяжести электротравм при электрическом ударе:

1) электротравма / степени – судорожное сокращение мышц без потери сознания;

- 2) электротравма II степени – судорожное сокращение мышц с потерей сознания;
- 3) электротравма III степени – потеря сознания и нарушение функций сердечной деятельности и/или дыхания;
- 4) электротравма IV степени – клиническая смерть.

Значительным электрическим сопротивлением обладает только поверхностный слой кожи человека. Это сопротивление зависит от многих причин (влажности кожи, степени расширения кожных капилляров и др.) и колеблется в широких пределах - от 800 до 100 000 Ом. Сопротивление резко снижается, например, при употреблении алкоголя. Если принять сопротивление тела человека равным 1000 Ом, то опасным будет ток при напряжении $U = I \cdot R_{чел} = 0,05 \cdot 1000 = 50 \text{ В}$.

При этом источник должен отдавать мощность $P = UI = 50 \cdot 0,05 = 2,5 \text{ Вт}$.

Если мощность источника значительно меньше указанной цифры, то высокие напряжения не приводят к общему поражению организма человека, но вызывают неприятные ощущения.

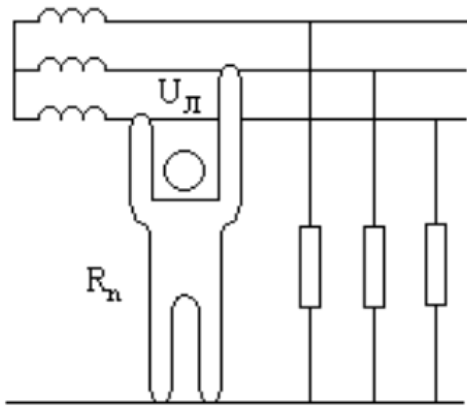
При неисправности изоляции токонесущих частей электротехнических установок незащищенные металлические конструкции могут оказаться под напряжением. Под напряжением окажется и человек, коснувшийся такой металлической конструкции. Назовем это напряжение напряжением прикосновения $U_{пр}$.

Правила техники безопасности считают опасными для человека следующие напряжения прикосновения: в сухом помещении $U_{пр} = 65 \text{ В}$; в сырых помещениях с относительной влажностью 75% и токопроводящими полами $U_{пр} = 36 \text{ В}$; в особо опасных помещениях (металлические кабины, котлы, помещения с относительной влажностью 100%) $U_{пр} = 12 \text{ В}$.

При погружении в воду сопротивление тела человека значительно снижается вследствие увеличения поверхности соприкосновения тела с проводящей средой и уменьшения удельного сопротивления кожи, поэтому даже сравнительно невысокие напряжения могут оказаться смертельно опасными. По этой причине, в частности, в ваннах комнатах не устанавливают розеток электропитания и выключателей, а осветительные приборы закрывают прозрачными колпаками.

8. Защитное заземление трёхпроводных цепей трёхфазного тока

Поражение электрическим током происходит при замыкании электрической цепи через тело человека. Двухфазным прикосновением называют тот случай, когда человек касается двух проводов, а однофазным - когда человек касается одного провода, имея при этом контакт с землей.



При двухфазном прикосновении на тело человека подается линейное напряжение $U_{\text{Л}}$, и через него протекает большой ток. Если считать, что среднее сопротивление тела человека $R = 1000 \text{ Ом}$, то идущий через него ток равен:

$$I = \frac{U_{\text{Л}}}{R} = \frac{380 \text{ В}}{1000 \text{ Ом}} = 0,38 \text{ А} = 380 \text{ мА}.$$

Этот ток **смертельно опасен!**

Рис. 12.8. Двухфазное прикосновение

Далее рассмотрим однофазные прикосновения.

Вследствие того, что сопротивление изоляции $R_{\text{ИЗ}}$ проводов электрической сети ограничено (не бесконечно велико), между линейными проводами существуют токи утечки $I_{\text{У}}$, которые замыкаются через землю. На рис. 12.9 распределенное по длине провода сопротивление изоляции для наглядности условно изображено сосредоточенным.

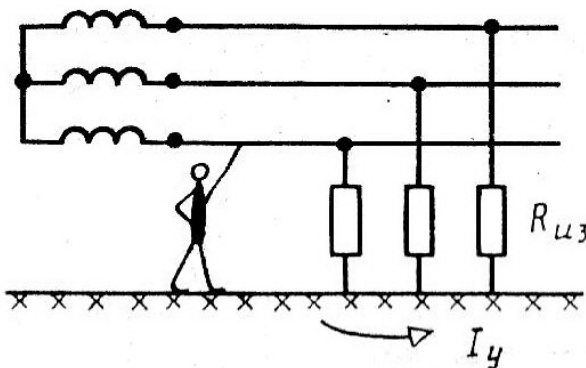


Рис. 12.9. Токи утечки в трехпроводной трехфазной линии

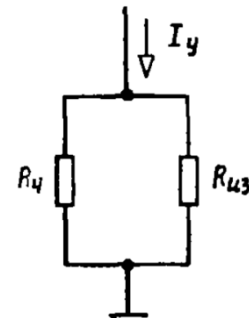


Рис. 12.10. Параллельное соединение сопротивлений изоляции и тела человека

Если человек, стоящий на земле, коснется даже одного оголенного провода линии, то он окажется в опасности, так как почти весь ток утечки пройдет через его тело, а ток утечки в мощных энергосистемах обычно превышает опасное значение 50 мА.

Действительно, согласно рис. 12.10, ток утечки распределяется между параллельными ветвями $R_{\text{ч}}$ и $R_{\text{ИЗ}}$, а так как $R_{\text{ИЗ}} \gg R_{\text{ч}}$, то практически весь ток утечки пойдет через человека.

Конечно, случаи, когда стоящий на земле человек касается оголенного провода энергосистемы, редки и должны быть исключены совсем. Для этого токоведущие части электроустановок закрываются кожухами, применяются ограж-

дения и блокировки, автоматически отключающие напряжение, когда человек входит внутрь ограждений. В местах опасности вывешиваются таблицы и плакаты. Обслуживающий персонал проходит курс техники безопасности, инструктируется, снабжается резиновыми перчатками, ботами, изолирующими ковриками и подставками.

Опасность прохождения через тело человека токов утечки возникает в тех случаях, когда вследствие повреждения изоляции под током оказываются металлические части и станины машин, не соединенные с токоведущими деталями.

Для обеспечения безопасности в этом случае применяется **защитное заземление** металлических частей электротехнических установок, не находящихся под напряжением. Заземление осуществляется с помощью стальных труб, полос, уголков, которые закладываются в почве на достаточной глубине и соединяются с заземляемыми деталями стальными полосами (шинами). Такое защитное заземление показано на рис. 12.11.

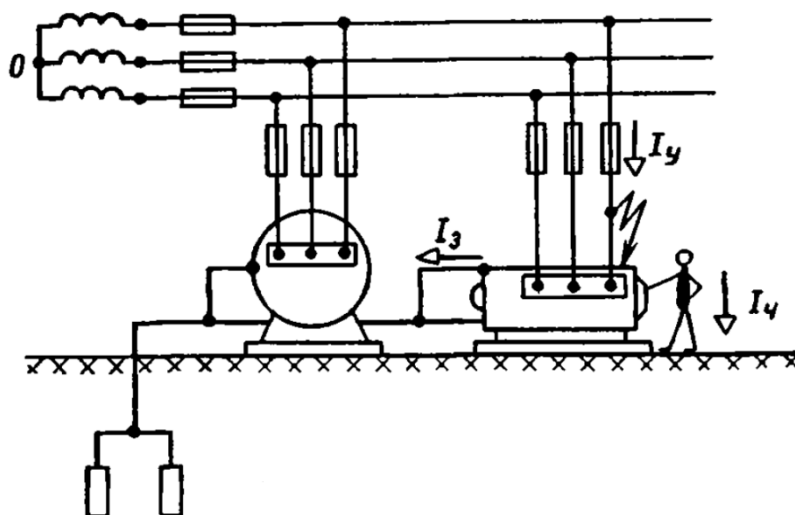


Рис. 12.11. Схема защитного заземления в трёхпроводной линии

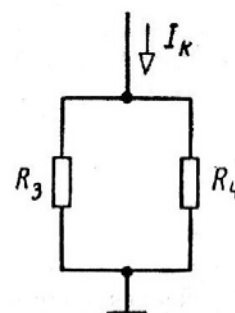


Рис. 12.12. Распределение тока утечки между телом человека и заземлителем

Если произойдет повреждение изоляции и корпус двигателя окажется соединенным с проводом сети, то человеку, прикоснувшемуся к заземленному двигателю, не угрожает опасность.

Действительно, в этом случае ток утечки распределяется между параллельными ветвями $R_ч$ и $R_з$ (рис. 12.12).

Так как сопротивление человека значительно больше, чем сопротивление заземлителя, то почти весь ток утечки пройдет через заземлитель.

Это справедливо, если заземлитель правильно рассчитан и тщательно выполнен. При повышенном сопротивлении заземлителя опасность поражения человека токами утечки остается.

9. Защитное заземление четырёхпроводных цепей трёхфазного тока

В рассмотренных ранее трехпроводных линиях при пробое изоляции и соединении одного из линейных проводов с корпусом двигателя защита из плавких предохранителей не срабатывает, так как токи утечки недостаточны для пережигания плавкой вставки. Чтобы срабатывала защита, можно было бы точку О (см. рис. 12.11) заземлить, как это показано пунктиром на рис. 12.13. Тогда при пробое изоляции возникало бы короткое замыкание фазы на землю и плавкая вставка перегорела бы. Но такое заземление нулевой точки в трехпроводной сети недопустимо, так как прикосновение человека к корпусу поврежденного двигателя было бы смертельно опасным.

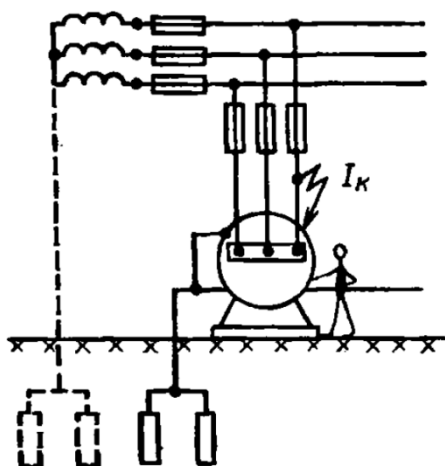


Рис. 12.13. Заземление нулевой точки в трёхпроводной линии

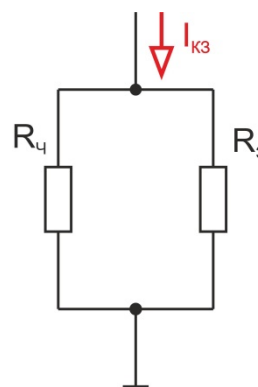


Рис. 12.14. Распределение тока короткого замыкания между телом человека и заземлителем

В этом случае через параллельно соединенные заземлитель и тело человека будет проходить уже не ток утечки, а ток короткого замыкания (рис. 12.14), и, несмотря на то что сопротивление заземлителя много меньше, чем сопротивление человека $R_з \ll R_ч$, относительно небольшая часть тока короткого замыкания, проходящая через человека, в абсолютном значении может значительно превышать опасный ток 50 мА.

Иначе обстоит дело в четырёхпроводных цепях трёхфазного тока. Здесь можно построить такую систему защиты, которая надёжно срабатывала бы при каждом пробое изоляции и попадании напряжения на корпус двигателя. *Для этого достаточно корпус двигателя и другие металлические части электротехниче-*

ских установок, нормально не находящихся под напряжением, надежно соединить с помощью стальных полос или проводов с нулевым проводом, как показано на рис. 12.15. Теперь пробой изоляции приводит к короткому замыканию фазы генератора. Соответствующая плавкая вставка в течение долей секунды перегорает и отключает от сети поврежденный участок.

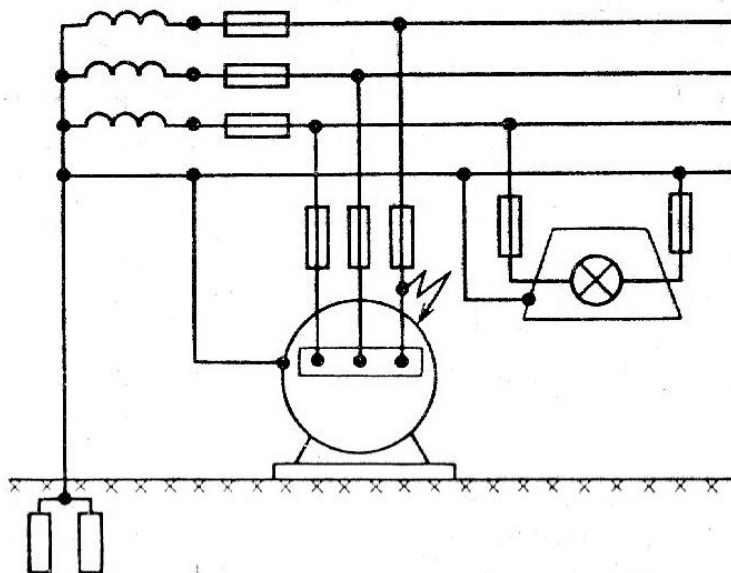


Рис. 12.15. Схема защитного заземления (зануления) в четырехпроводной линии

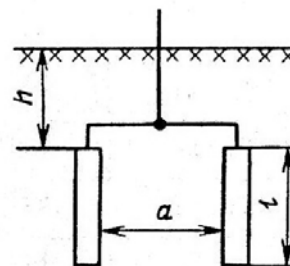


Рис. 12.16. Схема заземлителя

Такое соединение металлических частей электротехнических установок с нулевым проводом иногда называют **занулением**.

Для перегорания плавкой вставки нужно некоторое время. В течение этого времени человек, прикоснувшийся к поврежденному двигателю, будет соединен с линейным проводом и через его тело пройдет ток утечки. Чтобы защитить человека от тока утечки, корпус двигателя (и все металлические части электротехнических установок, не находящиеся под напряжением) нужно заземлить. Однако проще заземлить сам нулевой провод, так как все металлические части уже соединены с ним, и тогда нет необходимости тянуть дополнительные шины к электротехническим установкам. Полученная схема (рис. 12.15) получила широкое распространение. Ее называют четырехпроводной сетью с заземленной нейтралью.

Категорически запрещается в четырехпроводной сети трехфазного тока с заземлением нейтралью заземлять корпуса электротехнических установок, не соединив эти корпуса с нулевым проводом. Если нарушить этот запрет, получим опасную схему, изображенную рис. 12.13.

При выборе схемы заземления прежде всего следует оценить возможности использования в качестве заземлителей близко расположенных металлических конструкций: каркасов зданий, водопроводных труб, отопительных систем и др. В

электрических сетях напряжением до 1000 В общее сопротивление заземлителей не должно превышать 4 Ом при мощности сети 100 кВт и более и 10 Ом при мощности сети менее 100 кВт.

Если естественные заземлители отсутствуют или имеют сопротивление больше указанных значений, устанавливают искусственные заземлители, в качестве которых применяют:

1. Вертикально погруженные в почву стальные трубы длиной 3 м, с толщиной стенок 3,5 мм и диаметром 50 мм.
2. Угловую сталь или стальные полосы толщиной 4 мм и площадью поперечного сечения не менее 48 мм², расположенные вертикально или горизонтально. Наименьшее количество заземлителей — два. Расстояние a между заземлителями не менее половины их длины, глубина погружения h не менее трети длины l заземлителя (рис. 12.16).