

Министерство образования и науки Украины
Харьковский национальный университет имени
В.Н. Каразина

А.М. Цымбал

Электробезопасность

*Учебное пособие
для студентов физических специальностей*

Харьков 2005

УДК 621.316.9
ББК 31.29н
Ц 93

*Рекомендовано к печати ученым советом радиофизического факультета Харьковского национального университета имени
В.Н. Каразина
(протокол №5 от 20.05005)*

Рецензенты:

кафедра теоретической и общей электротехники Украинской инженерно-педагогической академии (протокол №7 от 15.04.05);

зав. отдела РИ НАН Украины, доктор физ.-мат. наук, проф. Минаков А.А.;

Цымбал А.М. Электробезопасность: Учебное пособие для студентов физических специальностей.- Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2005. -73 с.

В пособии рассматриваются основы техники электробезопасности при эксплуатации научных и технических установок, использующих напряжения до 1000 В.

Пособие предназначено для студентов физических специальностей.

У посібнику розглядаються основи техніки електробезпеки при експлуатації наукових та технічних установок, що використовують напругу до 1000 В.

Посібник призначено студентам фізичних спеціальностей.

УДК 621.316.9

ББК 31.29н

Ц 93

© Харьковский национальный университет
имени В.Н. Каразина
© Цымбал А.М., 2005

ПРЕДИСЛОВИЕ

В курсе "Основы охраны труда", который читается студентам четвертого курса радиофизического факультета, изучаются следующие основные разделы:

- электробезопасность;
- защита от неионизирующего излучения (микроволновое, лазерное);
- защита от ионизирующего излучения.

Выбор именно этих вопросов общей безопасности связан со спецификой обучения на радиофизическом факультете и, в дальнейшем, профиля работы его выпускников.

Характерной особенностью курса является тесная и непосредственная связь с другими теоретическими курсами, которые читаются на радиофизическом факультете: "Радиотехнические цепи и сигналы", "Основы радиоэлектроники", "Электродинамика", "Колебания и волны", "Техника и электроника СВЧ", "Квантовая радиофизика", "Атомная и ядерная физика".

Курс ставит целью дать студентам основные понятия о воздействии опасных факторов на человека и о физических принципах защиты от них.

Часть вопросов, связанных с конкретными оценками величин, определяющих степень безопасности, и их анализ, вынесена на практические занятия.

Данное пособие представляет первую часть курса и посвящено вопросам электробезопасности.

ВВЕДЕНИЕ

Число травм на производстве, вызванных электрическим током, сравнительно невелико и составляет около 3% общего числа несчастных случаев. Наибольшее число электротравм наблюдается: в сельском хозяйстве - 13%, строительстве - 9,3%, энергетике - 14,4%, машиностроении - 5,4%.

Иная картина будет при рассмотрении смертельных несчастных случаев. Оказывается, что из общего числа смертельных несчастных случаев на производстве 20-40 % (а в энергетике до 60%) происходит в результате поражения электрическим током, причем 75-80 % смертельных поражений током происходит при напряжении до 1000 В. Последнее объясняется тем, что установки напряжением до 1000 В применяются более широко, а контакт с электрооборудованием здесь имеет большее число людей, как правило, не имеющих электрическую специальность. Электрооборудование с напряжением выше 1000 В распространено меньше, и к его обслуживанию допускаются только высококвалифицированные электрики. В целом по частоте смертельных исходов электротравматизм в 15-16 раз превосходит другие виды травм. Наиболее распространенными причинами электротравматизма являются:

- появление напряжения там, где его в нормальных условиях быть не должно (на корпусах оборудования, на технологическом оборудовании, на металлических конструкциях сооружений и т. д.). Чаще всего это происходит вследствие повреждения изоляции;
- возможность прикосновения к незаизолированным токоведущим частям при отсутствии соответствующих ограждений;
- воздействие электрической дуги, возникающей между токоведущей частью и человеком в сетях напряжением выше 1000 В, если человек окажется в непосредственной близости от токоведущих частей;
- прочие причины, к которым относятся: несогласованные и ошибочные действия персонала; подача напряжения на установку, где работают люди; допуск к работам на отключенном электрооборудовании без проверки отсутствия напряжения и т.д.

Статистические данные о причинах поражения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Статистические данные о причинах поражения электротоком

Причина поражения	% от всех электротравм
Прикосновение к открытым токоведущим частям, находящимся под напряжением	56
Прикосновение к проводящим частям оборудования, оказавшимся под напряжением в результате повреждения изоляции	23
Прикосновение к токоведущим частям, покрытым изоляцией, потерявшей свои свойства; касание токоведущих частей предметами с низким электрическим сопротивлением	18
Соприкосновение с полами, стенами, элементами конструкций, грунтом, оказавшимися под напряжением вследствие аварийного замыкания на землю	2
Поражение через электрическую дугу	1

В связи с вышеизложенным и с учетом того, что выпускники физических специальностей по окончании университета имеют дело с техническими установками, в которых, как правило, используются напряжения до 1000 В, в пособии изложены вопросы электробезопасности в основном для таких напряжений. Предшествующими курсами лекций, необходимыми для изучения этих вопросов, являются курсы “Радиотехнические цепи и сигналы” и “Основы радиоэлектроники”, которые читаются студентам второго курса радиофизического факультета.

Глава 1. Воздействие электрического тока на человека

1.1. Виды воздействия

Действие электрического тока на живую ткань носит своеобразный и разносторонний характер. Проходя через организм человека, электрический ток производит термическое и электролитическое действия, являющиеся обычными физико-химическими процессами, присущими как живой, так и неживой материи. Одновременно электрический ток производит и биологическое действие, которое свойственно лишь живой ткани.

Различают следующие виды воздействия:

Тепловое воздействие ведет к опасным нагревам ткани и возникновению таких электротравм, как ожоги, электрические знаки, металлизация кожи.

Электрический (токовый) ожог возникает при перегреве кожи и внутренних тканей тела человека проходящим по ним током.

Термический (дуговой) ожог появляется в результате перегрева кожи и внутренних тканей тела мощным тепловым потоком от электрической дуги.

Электрический знак представляет собой специфическое поражение кожи в месте контакта с электродом, вызванное сравнительно слабым тепловым воздействием тока.

Металлизация кожи возникает при проникновении в верхние слои кожи мельчайших частичек металла, расплавившегося под действием электрической дуги.

Химическое воздействие электрического тока обусловлено электролизом крови и других содержащихся в организме растворов, изменением их химического состава и, как следствие, нарушением их физиологических функций. Воспаление наружных оболочек глаз (электроофтальмия) также является результатом химических изменений в клетках организма при облучении их мощным потоком ультрафиолетовых лучей электрической дуги.

Механическое воздействие тока проявляется в расслоении мышц, разрыве сухожилий, вывихах суставов и других повреждениях тканей организма в результате резких непроизвольных судорожных сокращений мышц, вызванных протеканием тока.

Биологическое воздействие тока выражается в раздражении живых тканей организма, рефлекторном возбуждении нервной системы и нарушении внутренних биоэлектрических процессов. В результате могут возникать электрический удар и электрический шок.

Кратко суть такого воздействия можно пояснить следующим:

Электрический ток, проходя через организм, раздражает живые ткани, вызывая ответную реакцию - возбуждение. Так, если электрический ток проходит непосредственно через мышечную ткань, то возбуждение, обусловленное раздражающим действием тока, проявляется в виде сокращения мышц. Однако, действие тока может быть и не прямым, а рефлекторным, т.е. через центральную нервную систему. При этом ток вызывает раздражение рецепторов - особых клеток, имеющих в большом количестве во всех тканях организма и обладающих высокой чувствительностью к воздействию факторов внешней и внутренней среды. Раздражение рецепторов приводит в возбуждение находящиеся возле них чувствительные нервные окончания, от которых волна возбуждения в виде нервного импульса передается со скоростью примерно 27 м/с по нервным путям в центральную нервную систему. Таким образом ток вызывает возбуждение тканей, которые и не лежат на его пути. При обычных естественных раздражениях рецепторов центральная нервная система обеспечивает целесообразную ответную реакцию соответствующих органов тела. В случае чрезмерного или необычного раздражающего действия, например от электрического тока, центральная нервная система может подать нецелесообразную исполнительную команду, что может привести к серьезным нарушениям деятельности жизненно важных органов, в том числе сердца и легких.

1.2. Электротравмы

Все многообразие действий электрического тока на организм нередко приводит к различным электротравмам, которые условно делят на местные и так называемые электрические удары, когда поражается весь организм.

Примерное распределение несчастных случаев в промышленности по указанным видам травм следующее:

- 20 % - местные;
- 25 % - электрические удары;
- 55% - смешанные.

1.2.1. Местные электротравмы

Местная электротравма - ярко выраженное местное нарушение целостности тканей тела. Чаще всего это поверхностные повреждения. Обычно местные травмы излечиваются. Характерные местные травмы – электрические ожоги, электрические знаки, металлизация кожи, механические повреждения и электроофтальмия.

Электрический ожог – самая распространенная электротравма: ожоги возникают у большей части пострадавших (~65 %); причем 23% их сопровождается другими травмами – знаками, металлизацией и офтальмией.

Токовый ожог возникает в электроустановках с напряжением не выше 1-2 кВ. При более высоком напряжении, как правило, образуется электрическая дуга, которая обуславливает возникновение уже дугового ожога. При этом в установках до 6-10 кВ ожоги являются следствием коротких замыканий. При более высоких напряжениях дуга возникает чаще всего при ошибочных операциях с коммутационными аппаратами; при этом дуга может переходить на человека, в результате через него проходит большой ток - несколько ампер и даже десятков ампер.

Различают четыре степени ожогов: 1 – покраснение кожи, 2 – образование пузырей, 3 – омертвление всей толщи кожи, 4 – обугливание тканей. Обычно тяжесть повреждения организма при ожогах обуславливается не степенью ожога, а площадью поверхности тела, пораженной ожогом.

Электрические знаки представляют собой резко очерченные пятна серого или бледно-желтого цвета на поверхности кожи. Пораженный участок затвердевает подобно мозоли. Обычно эти знаки безболезненны и лечение их заканчивается благополучно.

Металлизация встречается при коротких замыканиях, при этом брызги расплавленного металла под действием возникших динамических сил и теплового потока разлетаются во все стороны с большой скоростью. Каждая частица имеет малый запас тепла и, как правило, не способна прожечь одежду. Пораженный участок имеет шероховатую поверхность. Обычно с течением времени болящая кожа сходит. Лишь при поражении глаз пострадавший может лишиться зрения. Поэтому работы, при которых возможно возникновение электрической дуги должны выполняться в защитных очках.

Механические повреждения являются следствием резких непроизвольных судорожных сокращений мышц под действием тока. В результате могут произойти разрывы сухожилий, кожи, кровеносных сосудов и нервной ткани; могут иметь место вывихи суставов и переломы костей.

Механические повреждения возникают при относительно длительном нахождении человека при напряжении до 380 В, они возникают сравнительно редко (0,5 % лиц, пострадавших от тока). Все случаи механических повреждений сопутствуют электрическим ударам, поскольку они вызываются током, проходящим через тело человека.

Электроофтальмия – воспаление наружных оболочек глаза – роговицы и конъюнктивы – возникает в результате воздействия потока ультрафиолетового излучения, возникающего при наличии электрической дуги. Это излучение поглощается клетками организма и вызывает в них химические изменения. Электроофтальмия развивается через 4-8 часов после облучения. При этом имеют место покраснение и воспаление кожи и слизистых оболочек век, слезотечение и частичное ослепление. Обычно болезнь продолжается несколько дней. Предупреждение электроофтальмии обеспечивается применением защитных очков с обычными стеклами, которые практически не пропускают ультрафиолетовых лучей.

1.2.2. Электрический удар

В результате биологического воздействия могут возникать электрический удар и электрический шок.

Электрический удар возникает как следствие раздражения живых тканей организма и является наиболее характерной электротравмой, вызывающей гибель пострадавших. В зависимости от исхода условно выделяют пять степеней поражения:

- 1 степень – судорожное, едва ощутимое сокращение мышц;
- 2 степень – судорожное сокращение мышц, сопровождающееся сильными, с трудом переносимыми болями, без потери сознания; возможны механические повреждения;
- 3 степень – судорожное сокращение мышц с потерей сознания, но с сохранившимися дыханием и работой сердца;
- 4 степень – потеря сознания и нарушение сердечной деятельности или дыхания;
- 5 степень – клиническая смерть.

Электрический шок – своеобразная тяжелая нервно-рефлекторная реакция организма в ответ на чрезмерное раздражение электрическим током, сопровождающаяся глубокими расстройствами кровообращения, дыхания, обмена веществ и др. Шок имеет две фазы: фазу возбуждения и фазу торможения. Фаза возбуждения наступает непосредственно после воздействия тока, у пострадавшего сохраняется сознание, дыхание, кровообращение. Затем наступает фаза торможения, резко снижается кровяное давление, учащается пульс, ослабевает дыхание, возникает угнетенное состояние; наступает клиническая и, при отсутствии своевременной медицинской помощи, биологическая смерть.

1.3. Факторы, влияющие на исход поражения электрическим током

Основным фактором, определяющим степень воздействия на человека, является значение тока, проходящего через тело. Но вместе с тем исход поражения зависит и от рода тока, его частоты, пути через тело, времени воздействия, условий внешней среды и индивидуальных особенностей пострадавшего. Сопротивление тела

человека и приложенное к нему напряжение влияют на исход поражения лишь постольку, поскольку они определяют значение тока, проходящего через человека.

1.3.1. Характерные значения тока

Переменный ток разной силы частотой 50 Гц, проходящий через человека по пути рука-рука, при определенных значениях тока оказывает такое воздействие на организм:

- 1-2 мА (пороговый ощутимый ток) – начало ощущения, слабый зуд, пощипывание кожи;
- 5-10 мА – боль в мышцах кисти рук и предплечья, судорожные их сокращения, руки с трудом, но можно оторвать от электродов;
- 10-20 мА (пороговый неотпускающий ток) – едва переносимые боли во всей руке, руки невозможно оторвать от электродов;
- 25-50 мА – очень сильная боль в руках и груди, дыхание крайне затруднено, при длительном воздействии возможны паралич дыхания и потеря сознания;
- 50-80 мА – паралич дыхания, нарушение работы сердца, при длительном воздействии возможны фибрилляция сердца, прекращение кровоснабжения мозга, клиническая смерть;
- 100 мА и более – при длительности более 3с наступает фибрилляция сердца, паралич дыхания, клиническая смерть;
- 5000 мА – паралич дыхания, остановка сердца, клиническая смерть, при длительном воздействии – тяжелые ожоги.

Пороговый ощутимый ток не может вызвать поражения человека, и в этом смысле не является опасным, Однако длительное (в течение нескольких минут) прохождение тока через человека отрицательно сказывается на здоровье и поэтому является недопустимым. Значение порогового ощутимого тока у разных людей различно и при частоте 50 Гц характеризуется нормальным законом распределения (рис.1а) с математическим ожиданием 1,1 мА и среднеквадратичным отклонением 0,154 мА.

Пороговый неотпускающий ток тоже условно можно считать безопасным для человека. При частоте 50 Гц он также характеризуется нормальным законом распределения с математическим ожиданием 14,9 мА среднеквадратичным отклонением 3,19 мА (рис.1б).

Следует отметить, что при постоянном токе неотпускающих токов, строго говоря, нет, так как при любых значениях тока человек может самостоятельно разжать руку, в которой зажат проводник. Однако в момент отрыва возникают болезненные сокращения мышц, аналогичные тем, которые наблюдаются примерно при таком же переменном токе.

Пороговый фибрилляционный ток опасен для человека, причем вероятность возникновения фибрилляции определяется не только значением, родом и частотой тока, но и длительностью его протекания (рис.1в). Это объясняется неодинаковой чувствительностью сердца к электрическому току в различных фазах кардиоцикла (рис. 2).

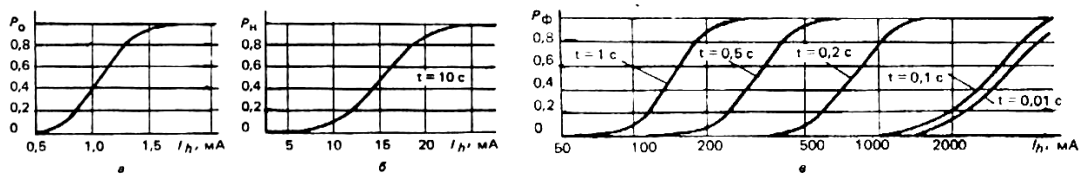


Рис.1. Зависимости от значения и длительности протекания электрического тока характерных реакций человека: (а) – ощущения; (б) – неотпускания; (в) – фибрилляции

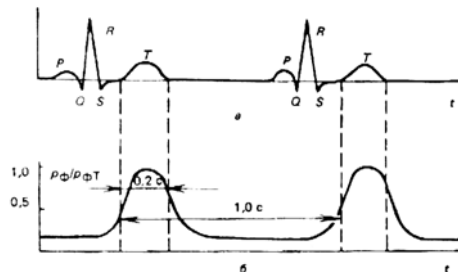


Рис. 2. Характерная электрокардиограмма (а) и плотность распределения вероятности возникновения фибрилляции сердца в зависимости от времени в пределах кардиоцикла (б); Р, Q, R, S, Т – зубцы на кардиограмме

Длительность фазы Т кардиоцикла, в которой сердце наиболее уязвимо, не превышает 0,2 с, поэтому при уменьшении длительности протекания тока уменьшается вероятность прохождения тока именно в фазе Т.

Безопасный ток, который длительно (несколько часов) может проходить через человека, не нанося ему вреда, во много раз меньше порогового ощутимого тока, Для практических целей его значения принимаются равными 50-75 мкА при 50 Гц и 100-125 мкА при постоянном токе.

1.3.2. Длительность прохождения тока

Чем продолжительней действие тока, тем больше вероятность тяжелого или смертельного поражения. Такая зависимость объясняется тем, что с увеличением времени растет значение этого тока (уменьшается сопротивление тела - см. ниже), растут и накапливаются последствия воздействия тока и повышается вероятность совпадения момента прохождения тока с уязвимой фазой Т (соответствует периоду, когда заканчивается сокращение желудочков сердца и они переходят в расслабленное состояние) сердечного цикла. Следует отметить, что если время прохождения тока совпадает с фазой Т, то и в этом случае вероятность возникновения фибрилляции сердца зависит от длительности воздействия тока. На рис.3 показана зависимость порогового фибрилляционного тока 50 Гц от длительности его прохождения (при этом время прохождения тока совпадает с фазой Т).

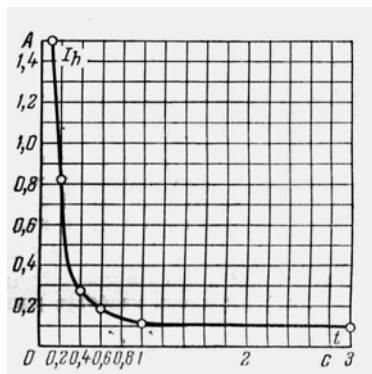


Рис. 3. Зависимость порогового фибрилляционного тока от длительности прохождения

1.3.3. Влияние пути тока

Путь прохождения тока через человека играет существенную роль в исходе поражения. Если на пути тока оказываются жизненно важные органы - сердце, легкие, головной мозг, то опасность поражения весьма велика. В противном случае воздействие на эти органы может быть только рефлекторным.

Возможных путей прохождения тока очень много, однако на практике характерных путей насчитывают 15, из которых самые распространенные 6.

Наиболее опасными являются петли голова-руки и голова-ноги, когда ток может проходить через головной и спинной мозг. Эти петли возникают относительно редко. Следующими по опасности есть пути, которые проходят через сердце человека, например, правая рука-ноги, (по частоте возникновения этот путь занимает второе место, наиболее распространенный путь – рука-рука). Наименее опасным является путь нога-нога, который возникает при воздействии на человека так называемого шагового напряжения.

Отметим, что при поражении человека по пути "правая рука-ноги" через сердце человека проходит 6,7% общей величины электрического тока; для путей левая рука – ноги и нога-нога эти величины составляют, соответственно, 3,7% и 0,4%.

1.3.4. Частота и род тока

Переменный ток

С увеличением частоты от 0 до 50 Гц опасность поражения растет, далее она уменьшается и практически исчезает при 450-500 кГц, хотя опасность ожогов остается. На рис. 4 приведены зависимости опасности поражения током (кривая L) и значений пороговых неотпускающих токов от частоты. Практически заметное снижение опасности поражения наблюдается при частотах 1000 Гц и более.

Постоянный ток

Постоянный ток примерно в 4-5 раз безопаснее переменного с частотой 50 Гц (так, значения пороговых неотпускающих токов соответственно 50-80 мА и 10-15 мА). Но это справедливо лишь для напряжений до 500 В. При более высоких напряжениях постоянный ток становится опаснее переменного.

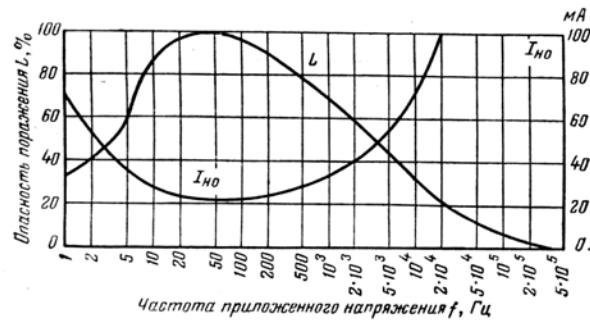


Рис.4. Зависимость опасности поражения током (кривая L) и неотпускающего тока (кривая $I_{но}$) от частоты

1.4. Электрическое сопротивление тела человека

1.4.1. Электрическое сопротивление различных тканей

Тело человека является проводником электрического тока. Проводимость живой ткани в отличие от обычных проводников обусловлена не только ее физическими свойствами, но и биохимическими и биофизическими процессами, присущими лишь живой материи. В результате сопротивление тела человека является переменной величиной, имеющей нелинейную зависимость от множества факторов. В целом тело человека можно рассматривать как проводник особого рода, обладающий свойствами проводников первого рода (полупроводники) и второго рода (электролиты).

Электрическое сопротивление различных тканей тела человека неодинаково: кожа, кости, жировая ткань, сухожилия и хрящи имеют относительно большое сопротивление, а мышечная ткань, кровь, лимфа и особенно спинной и головной мозг – малое сопротивление, что показывает таблица 2 (здесь приведено удельное объемное сопротивление, ρ_n , Ом·м, при токе 50 Гц).

Таблица 2

Сопротивление различных тканей

Кожа сухая	$3 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4$
Кости (без надкостницы)	$10^4 - 2 \cdot 10^6$
Жировая ткань	30-60
Мышечная ткань	1,5-3
Кровь	1-2
Спинномозговая жидкость	0,5-0,6

Из таблицы видно, что главным фактором, определяющим сопротивление тела человека в целом (а, следовательно, и степень опасности тока), является кожа.

В целом сопротивление тела человека, т.е. сопротивление между двумя электродами, наложенными на поверхность тела, при сухой, чистой и неповрежденной коже (при напряжении до 15-20 В) колеблется в пределах примерно от 3 до 100 кОм и более. Сопротивление внутренних тканей составляет 300-500 Ом. Надо отметить, что при напряжении 200-300 В наступает электрический пробой верхнего слоя кожи. Для анализа травматизма сопротивление кожи человека принимают $R_h = 1000$ Ом.

Сопротивление тела человека можно считать состоящим из трех последовательно включенных сопротивлений: двух одинаковых сопротивлений наружного слоя кожи, $2z_n$, (так называемое наружное сопротивление тела) и одного, называемого внутренним сопротивлением тела R_v (которое включает в себя сопротивление внутренних слоев кожи и сопротивление внутренних тканей тела).

Сопротивление наружного слоя кожи состоит из активного и емкостного сопротивлений, включенных параллельно. Емкостное сопротивление обусловлено тем, что в месте прикосновения электрода к телу образуется как бы конденсатор, обкладками которого являются электрод и хорошо проводящие ток внутренние ткани, а диэлектриком – наружный слой кожи (эпидермис). Емкость такого конденсатора (обычно плоского) можно представить в виде

$$C_n = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S/d, \quad (1)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - электрическая постоянная.

Экспериментально установлено, что C_n изменяется от нескольких сотен пикофарад до нескольких микрофарад.

Активное сопротивление наружного слоя кожи R_n определяется из соотношения:

$$R_n = \rho_n \cdot d/S, \quad (2)$$

где d – толщина эпидермиса, S – площадь электрода.

Внутреннее сопротивление R_b является активным. Его величина зависит от длины и поперечного сечения участка тела, по которому проходит ток. Оно практически не зависит от площади электродов, частоты тока, значения приложенного напряжения. Величина $R_b \sim 500-700 \text{ Ом}$

Полное сопротивление тела человека зависит от частоты тока, приложенного напряжения, длительности протекания тока, пути тока через человека, пола, возраста и других факторов.

При постоянном токе, а также малых напряжениях (до 42 В) переменного тока с частотой 50 Гц полное сопротивление тела человека $z_n \sim 6-100 \text{ кОм}$ (расчетная формула $z_n = 2 R_n + R_b$). Напряжения свыше 50 В вызывают электрический пробой кожи, и сопротивление уменьшается до $z_n = R_b$.

Зависимость сопротивления человека (в кОм) от напряжения прикосновения $U_{пр}$ (в В) при переменном токе частотой 50 Гц выражается эмпирической формулой:

$$z_n = 77 / (U_{пр} + 10) + 0,3. \quad (3)$$

На рис. 5, 6 приведены эквивалентные схемы замещения сопротивления человека и зависимость сопротивления от напряжения прикосновения.

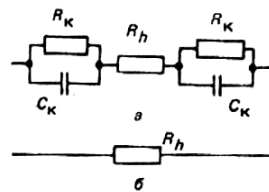


Рис. 5. Эквивалентная схема замещения сопротивления человека: а) – при $U > 50 \text{ В}$; б) – при $U < 50 \text{ В}$

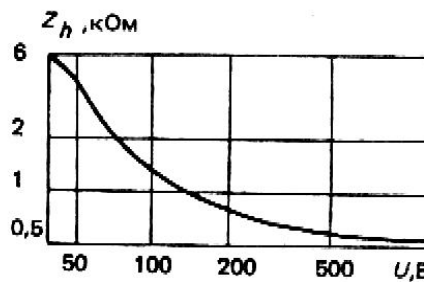


Рис. 6. Зависимость полного сопротивления человека от напряжения прикосновения, $f=50 \text{ Гц}$

В расчетах по электробезопасности сопротивление тела человека принимают равным 1 кОм при $U_{пр} \geq 50 \text{ В}$ и 6 кОм при меньших напряжениях.

1.4.2. Зависимость сопротивления тела человека от различных факторов

Зависимость от состояния кожи

Повреждения кожи могут снизить сопротивление тела человека до R_b , что увеличивает опасность поражения током.

Увлажнение кожи, ее загрязнение, потовыделение понижают сопротивление и также создают предпосылки для тяжелого поражения.

Зависимость сопротивления от параметров электрической цепи

Сопротивление зависит от места приложения электродов, значений токов и приложенного напряжения, рода и частоты тока, площади электродов и др.

Место приложения электродов

Сопротивление кожи и внутреннее сопротивление, естественно, неодинаковы на разных участках тела. Наименьшим сопротивлением обладает кожа лица, шеи, рук на участке выше ладоней и, в особенности, подмышечных впадинах и тыльной стороне кисти руки.

Увеличение тока, проходящего через человека, сопровождается усилением нагрева кожи и раздражающего действия на ткани. Это рефлекторно вызывает реакцию организма в виде расширения сосудов кожи. Отсюда усиливаются снабжение ее кровью и потоотделение, что приводит к уменьшению сопротивления кожи в соответствующем месте.

Повышение напряжения $U_{пр}$ вызывает заметное уменьшение полного сопротивления человека (см. выше рис.6 и формулу (3)), что связано с увеличением тока при увеличении $U_{пр}$ и пробоем рогового слоя кожи, что, как показывают опыт, происходит при напряженности электрического поля $E \sim 500-2000 \text{ В/мм}$ ($E = U_{пр}/2d$).

Род и частота тока. Экспериментально показано, что $z_{п}$ для постоянного тока больше, чем для переменного. Разница велика при $U_{пр} < 5-10$ В. С ростом $U_{пр}$ разница уменьшается и при $U_{пр} = 40-50$ В они практически одинаковы (рис.7).

Зависимость $z_{п}$ от площади электродов приведена на рис.8. Видно, что с ростом частоты эта зависимость практически исчезает. Это можно получить и из формул, полученных на основании анализа эквивалентных схем замещения сопротивления человека (рис.5).

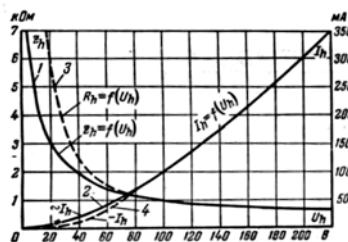


Рис.7. Зависимость сопротивления тела человека и протекающего через него тока от напряжения; 1, 2 – переменный ток, 3, 4 – постоянный ток

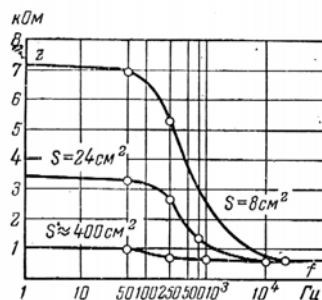


Рис.8. Зависимость сопротивления тела человека от частоты f и площади электродов S

Следует отметить, что ожидаемого, казалось бы, увеличения опасности поражения током при увеличении частоты тока не происходит (см. рис.4). Причины этого весьма сложны и недостаточно изучены.

Зависимость сопротивления от физиологических факторов и окружающей среды.

Сопротивление, как правило, больше у мужчин, чем у женщин, у детей, чем у взрослых и у пожилых людей, чем у молодых. Объясняется это различной толщиной и строением кожи.

Физические раздражения всякого рода (болевые, световые, звуковые и др.), возникающие неожиданно для человека, могут на несколько минут снижать сопротивление тела на 20-50%.

Уменьшение или увеличение парциального давления кислорода соответственно снижает или увеличивает $z_{п}$. Отсюда следует большая опасность поражения током в закрытых помещениях, где парциальное давление кислорода, как правило, меньше.

Глава 2. Опасность поражения человека электротоком в различных электрических сетях

2.1. Возможные случаи поражения человека током

Все случаи поражения человека током являются следствием прикосновения не менее чем в двух точках электрической цепи, между которыми существует некоторое напряжение. Опасность такого прикосновения оценивается величиной тока, проходящего через человека, который зависит от многих факторов: типа сети, режима ее нейтрали, изоляции токоведущих частей сети от земли, схемы включения человека в цепь и др. Напряжение прикосновения – это напряжение между двумя точками цепи тока, которых одновременно касается человек. При прикосновении человека к заземленному корпусу, имеющему контакт с одной из фаз, часть тока замыкания на землю будет проходить через человека, а если корпус не заземлен, то через человека проходит весь ток замыкания на землю.

Прикосновение человека к находящимся под напряжением токоведущим частям установок может быть двух видов:

- двухфазным, при этом напряжение прикосновения равно напряжению источника питания, а ток, проходящий через тело человека не зависит от числа фаз сети, режима нейтрали и определяется выражением $I_h = U/R_h$. В этом случае длительность протекания тока ничем не ограничена. Двухфазные прикосновения в сетях с напряжением выше 42 В очень опасны, но по статистике случаи такого прикосновения редки.

- однофазным; напряжение прикосновения и ток, проходящий через человека, при этом зависят от напряжения электроустановки и целого ряда других факторов.

Прикосновение человека к нетокковедущим частям электроустановки может быть опасно в аварийном режиме при повреждении изоляции и замыкании токоведущих частей на корпус. Здесь напряжение прикосновения и ток

зависят от значения тока замыкания на корпус, сопротивления заземляющего устройства, коэффициента напряжения прикосновения (см. далее), а время протекания тока зависит от времени срабатывания защиты.

Прикосновение человека к двум точкам земли, находящимся под разными потенциалами, возможно в аварийном режиме при повреждении изоляции и замыкании токоведущих частей на землю. Ток, протекающий через человека, при этом определяется выражением $I_h = U_{ш}/R_h$, где $U_{ш}$ – так называемое напряжение шага. В электроустановках напряжением до

1000 В эти токи невелики.

2.2. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, протекающих через человека

Напряжения прикосновения и токи при нормальном режиме электроустановок и при продолжительности действия не более 10 минут в сутки не должны превышать значений, которые установлены на реакции ощущения. Эти значения приведены в Табл. 3.

Таблица 3

Допустимые напряжения прикосновения и токи через человека в нормальном режиме

Род тока, частота	Допустимое напряжение прикосновения, В	Допустимый ток, мА
Переменный, 50 Гц	2,0	0,3
Переменный, 400 Гц	3,0	0,4
Постоянный	8,0	1,0

Поражение человека током при аварийных режимах в электроустановках носит вероятностный характер и наступает при совпадении следующих независимых случайных событий:

- повреждение изоляции электрооборудования и появление опасного потенциала на корпусе ;
- прикосновение человека к корпусу оборудования с поврежденной изоляцией во время действия защиты;
- протекание через тело человека тока, по значению и длительности достаточного для возникновения фибрилляции.

Вероятность поражения определяется произведением вероятностей перечисленных выше событий:

$$P_{пор} = P_{повр} P_{пр} P_{ф}, \quad (4)$$

где индексы относятся к соответствующим событиям.

Пути уменьшения вероятности поражения человека:

- правильная организация и своевременное проведение профилактических мероприятий (уменьшение $P_{повр}$);
- внедрение автоматизации производственных процессов с использованием ограждений и блокировок (снижение $P_{пр}$);
- применение технических способов защиты, направленных на снижение напряжения прикосновения и времени существования аварийного режима (снижение $P_{ф}$).

Напряжения прикосновения и токи при аварийном режиме бытовых электроустановок напряжением до 1000 В частотой 50 Гц не должны превышать значений, установленных для расчетного значения вероятности возникновения фибрилляции $P_{ф} = 3 \cdot 10^{-6}$ (см. табл.4).

Напряжения прикосновения и токи, проходящие через человека I_h , при аварийном режиме производственных электроустановок напряжением до 1000 В с глухозаземленной или изолированной нейтралью не должны превышать значений, установленных для расчетного значения вероятности возникновения фибрилляции $P_{ф} = 0,001$ (см. табл.5).

Из этих таблиц видно, что требования для обеспечения безопасности в быту значительно выше, чем для производства.

Таблица 4

Напряжения прикосновения и токи при аварийном режиме бытовых электроустановок

Продолжительность воздействия, с	Допустимое напряжение прикосновения, В	Допустимый ток, мА
0,01-0,08	220	220
0,1	200	200
0,2	100	100
0,5	50	50
1,0	25	25
Свыше 1,0	12	2

Таблица 5

Напряжения прикосновения и токи, проходящие через человека I_h , при аварийном режиме производственных электроустановок

Род тока, частота	Нормируемая величина	Допустимые значения при продолжительности воздействия, с					
		0,01	0,1	0,2	0,5	1,0	>1,0
~, 50 Гц	$U_{пр}, В$	650	500	250	100	50	36
	I_h, mA	650	500	250	100	50	6
~, 400 Гц	$U_{пр}, В$	650	500	500	200	100	36
	I_h, mA	650	500	500	200	100	8
=		650	500	400	250	200	40
		650	500	400	250	200	15

Повышение нормируемых значений допустимого напряжения прикосновения и расчетного значения вероятности возникновения фибрилляции при аварийных режимах в производственных электроустановках обусловлено:

- сложностью реализации технических способов защиты, обеспечивающих снижение напряжения прикосновения;
- высокой квалификацией персонала и уровнем организации эксплуатации этих установок;
- возможностью существенного снижения вероятности повреждения электрооборудования $P_{повр}$ и вероятности прикосновения $P_{пр}$ во время действия защиты и обеспечения за счет этого достаточно малой вероятности поражения персонала.

Приведенные в таблицах нормы не могут рассматриваться как обеспечивающие абсолютную безопасность и принимаются в качестве практически приемлемых с достаточно малой вероятностью поражения. Они предназначены и для использования при расчетах защитных устройств от поражения электрическим током – защитных заземлений, занулений, защитных отключений и др.

2.3. Опасность однофазных двухпроводных электрических цепей.

2.3.1. Электрические сети с заземленным проводом.

Однофазное прикосновение человека к изолированному от земли проводу в электроустановках напряжением **выше 42 В опасно**. Данная ситуация показана на рис.9а (здесь же приведена и соответствующая эквивалентная схема). В нормальном режиме сопротивления изоляции $R_{и1}$ и $R_{и2}$ проводов L1, L 2 относительно земли велики по сравнению с сопротивлением заземляющего устройства $R_{з1}$, сопротивление тела человека также велико по сравнению с $R_{з1}$. Тогда ток через человека определяется выражением $I_h \approx U / R_h$ (при получении этого соотношения, как и других, ниже, учитываются неравенства $R_{и1}, R_{и2} \gg R_{з1}$, R_h и $R_h \gg R_{з1}$).

Однофазное прикосновение к заземленному проводу в нормальном режиме, как можно легко убедиться, **не опасно**.

В аварийном режиме ток короткого замыкания (КЗ) равен $I_k = U / (R_{и1} + R_{и2} + R_{н2})$, где $R_{и1}$, $R_{и1}$, $R_{и2}$ – соответственно сопротивления участков провода L1 от начала до места прикосновения и от места прикосновения до места КЗ и сопротивление провода L2 до места КЗ. Отсюда следует, что напряжение на заземленном проводе в точке прикосновения может достигать **опасных** значений $U_1 = U \cdot R_{и1} / (R_{и1} + R_{и2} + R_{н2})$. Продолжительность существования этого аварийного режима определяется временем срабатывания защитных устройств.

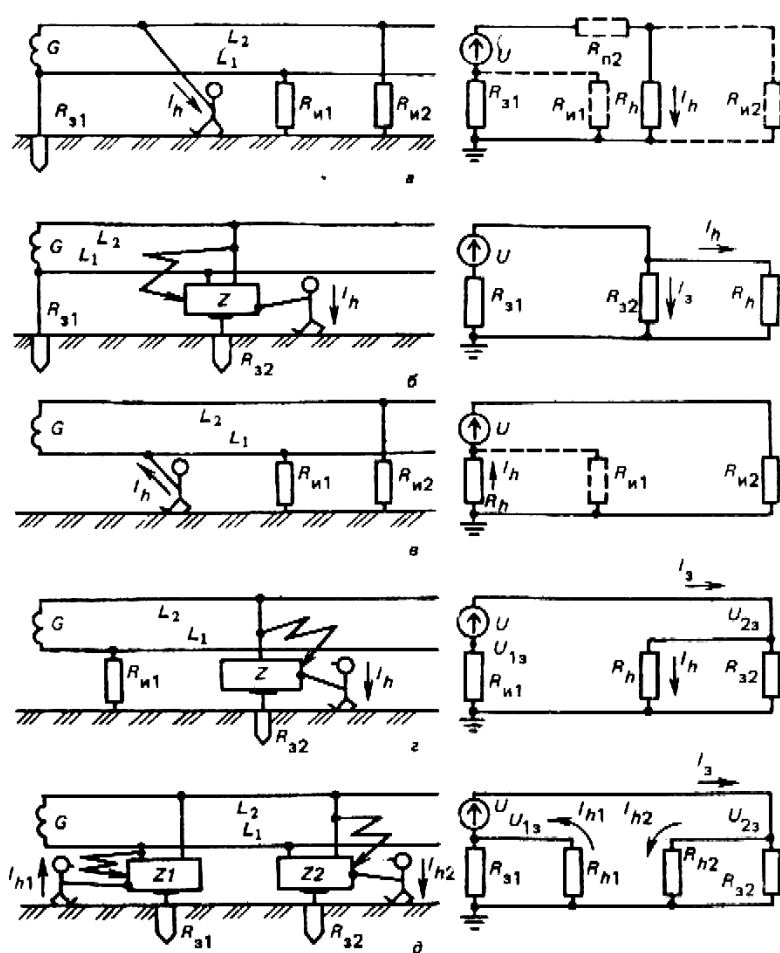


Рис.9. Прикосновение человека к двухпроводной сети с заземленным проводом — а, б (соответственно при нормальном режиме и при замыкании провода на заземленный корпус), с изолированным проводом — в, г, д (соответственно при нормальном режиме, при замыкании провода на корпус, при замыкании на корпус обоих проводов) и соответствующие эквивалентные схемы

В случае прикосновения к нетоковедущим частям электроустановки в аварийном режиме (рис.9б) — при замыкании провода L2 на корпус установки — ток замыкания на корпус определяется выражением $I_3 \approx U / (R_{31} + R_{32})$, где R_{31} , R_{32} — сопротивления заземляющих устройств, считающиеся значительно меньшими, чем R_h . Этот ток обычно недостаточен для срабатывания устройств защиты, поэтому такой режим может существовать долго.

На корпусе напряжение относительно земли $U_{23} = I_3 R_{32}$.

На заземленном проводе L1 также появляется напряжение относительно земли $U_{13} = I_3 R_{31}$.

При этом токи, проходящие через человека, прикоснувшегося к заземленному корпусу или заземленному проводу L1 соответственно равны:

$$I_h = U_{23} / R_h = U R_{32} / R_h (R_{31} + R_{32}), \quad (5a)$$

$$I_h = U_{13} / R_h = U R_{31} / R_h (R_{31} + R_{32}). \quad (5б)$$

Поскольку обычно $R_{31} \approx R_{32}$, величины токов могут быть **опасными** ($I_h \sim U / 2R_h$).

2.3.2. Электрические сети с изолированными от земли проводами

Однофазные электроустановки имеют, как правило, малую длину кабельных сетей и малую емкость проводов относительно земли, поэтому комплексные сопротивления проводов близки к активным сопротивлениям изоляции проводов относительно земли. Напряжения токоведущих частей установок относительно земли в нормальном режиме тогда определяются выражениями:

$$U_{13} = U R_{n1} / (R_{n1} + R_{n2}), \quad U_{23} = U R_{n2} / (R_{n1} + R_{n2}). \quad (6)$$

В случае прикосновения человека к токоведущим частям установки, например, к проводу L1, ток через него $I_h \approx U / R_{n2}$ (это выражение можно легко получить из рассмотрения эквивалентной схемы, приведенной на рис. 9в, с учетом того, что $R_{n1}, R_{n2} \gg R_h$).

Обычно сопротивление изоляции составляют сотни кОм, поэтому в этом случае однофазные прикосновения **не опасны**.

В аварийном режиме при замыкании одного провода на землю или на заземленный корпус однофазное прикосновение ко второму проводу эквивалентно двухфазному прикосновению, что при напряжениях выше 42 В **очень опасно**.

Прикосновение к нетоковедущим частям электроустановки, оказавшимся под напряжением относительно земли в результате повреждения изоляции (см. рис.9г), не опасно, пока сопротивление изоляции провода L1 велико по сравнению с сопротивлением заземляющего устройства R_{32} . В этом случае $I_h \approx UR_{32}/R_h R_{n1}$.

Если повреждена изоляция обоих проводов и они замыкаются на разные заземленные корпуса (рис.9д), то прикосновение человека к какому-либо корпусу **очень опасно**. Для этих случаев можно получить соотношения:

$$I_{h1} \approx UR_{31}/R_{h1}(R_{31} + R_{32}); \quad I_{h2} \approx UR_{32}/R_{h2}(R_{31} + R_{32})$$

Как следует из вышеизложенного, большое значение в электробезопасности имеет состояние изоляции проводов.

Надежность изоляции достигается:

- 1) правильным выбором ее материала и геометрии (толщина, форма);
- 2) правильными условиями эксплуатации;
- 3) надежной профилактикой в процессе работы.

Изоляция исключает возможность прохождения тока через тело человека при прикосновении к токоведущим частям или ограничивает этот ток до безопасных значений для человека. Для поддержания высокого уровня надежности изоляции необходимо проводить ее испытание повышенным напряжением и контроль изоляции. Испытания проводятся при приеме-сдаче электроустановок и периодически во время их эксплуатации. Под контролем изоляции понимается измерение ее активного сопротивления с целью обнаружения дефектов и предупреждения коротких замыканий на землю. Измерения проводятся при снятом рабочем напряжении на каждом участке сети, при этом измеряется величина сопротивления изоляции каждой фазы относительно земли и между каждой парой фаз.

Сопротивление изоляции участка сети в сетях напряжением до 1000 В должно быть не менее 0,5 мОм на фазу, а сопротивление изоляции для различных электроаппаратов устанавливается различным: от 1 до 25 мОм.

2.4. Анализ опасности в трехфазных сетях

2.4.1. Общие сведения о трехфазных системах

Анализ опасности в трехфазных сетях более сложный, чем для однофазных сетей. Рассмотрим сначала основные характеристики трехфазных систем.

Три синусоидальные э.д.с. одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутые по фазе на 120° , образуют трехфазную симметричную систему.

Широкое распространение трехфазных систем вызвано, главным образом, следующими причинами:

- при одинаковых напряжениях, мощностях потребителей питание трехфазным током позволяет получить значительную экономию материалов по сравнению с тремя однофазными линиями;
- трехфазный генератор дешевле, легче и экономичнее, чем три генератора такой же общей мощности;
- при равномерной нагрузке трехфазный генератор создает на валу приводного двигателя постоянный момент в отличие от однофазного, у которого и момент и мощность на валу пульсируют с двойной частотой тока.

В целях экономии обмотки трехфазного генератора соединяют звездой или треугольником. При этом число соединительных проводов от генератора к нагрузке уменьшается до трех или четырех.

При соединении звездой концы обмоток объединяют в одну точку, которая называется нулевой, а начала служат зажимами для подключения нагрузки. Напряжение между нулевой точкой и началом каждой фазы называют *фазным напряжением* (U_ϕ), а напряжение между началами обмоток называют *линейным напряжением* (U_λ). При этом действующее значение линейного напряжения превышает действующее значение фазного напряжения.

Легко заметить, что при соединении треугольником линейное напряжение генератора равно его фазному напряжению. Следовательно, для получения нужного линейного напряжения каждая обмотка генератора должна быть рассчитана на большее напряжение, чем в случае соединения обмоток генератора звездой. Это приводит к удорожанию генератора. Кроме того, нагрузка редко бывает совершенно симметричной. В связи с этим обмотки генератора, как правило, соединяют звездой.

Приемники электроэнергии также можно соединять звездой или треугольником.

Более распространены сети, в которых и обмотки генератора и приемники электроэнергии соединены звездой. Это, в частности, вызвано возможностью получения при этом двух значений напряжений. Такое соединение схематически показано на рис.10, где от нулевой точки генератора идет четвертый провод до нулевой точки нагрузки. Такая система называется *четырёхпроводной*, а четвертый провод в ней – *нейтральным* или *нулевым*.

При симметричной нагрузке сумма токов в нулевом проводе ($I_0 = I_A + I_B + I_C$) равна нулю, и четвертый провод с этой точки зрения не нужен. При несимметричной нагрузке этот ток не равен нулю.

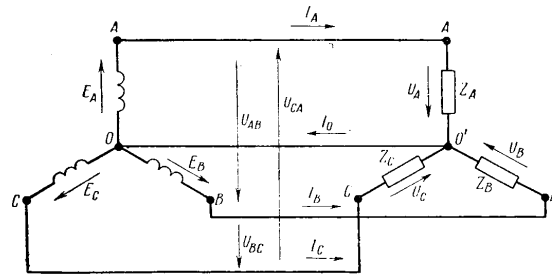


Рис.10. Схема четырехпроводной трехфазной сети, в которых обмотки генератора и приемники электроэнергии соединены звездой

Если бы четвертого провода не было, несимметричность нагрузки приводила бы к асимметрии фазных напряжений (что вызывает нарушения нормальной работы потребителей).

2.4.2. Трехфазная четырехпроводная сеть с нейтралью, заземленной через активное и индуктивное сопротивления

Для анализа опасности трехфазных сетей рассмотрим (в достаточно общем случае) прикосновение человека к одной из фаз трехфазной четырехпроводной сети с нейтралью, заземленной через активное и индуктивное сопротивления. Этот случай иллюстрируется на рис.11а. На рис.11б приведена соответствующая эквивалентная схема.

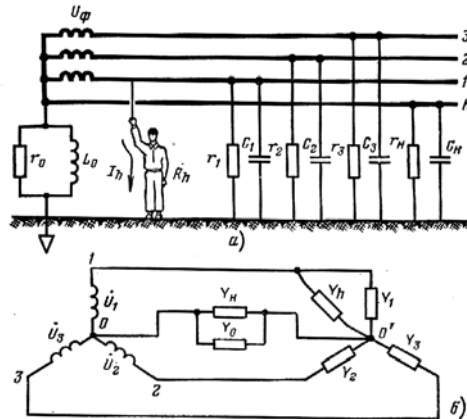


Рис.11. Прикосновение человека к одной из фаз трехфазной четырехпроводной сети с нейтралью, заземленной через активное и индуктивное сопротивление —(а); соответствующая эквивалентная схема —(б)

Проводимости изоляции фазных и нулевого проводов относительно земли, заземления нейтрали и человека в комплексной форме определяются выражениями:

$$\begin{aligned} Y_1 &= 1/r_1 + j\omega C_1; \\ Y_2 &= 1/r_2 + j\omega C_2; \\ Y_3 &= 1/r_3 + j\omega C_3; \\ Y_H &= 1/r_H + j\omega C_H; \\ Y_0 &= 1/r_0 + j\omega L_0; \\ Y_h &= 1/R_h. \end{aligned} \quad (7)$$

В случае прикосновения человека к одной из фаз (например, 1 — см. рис.12) напряжение прикосновения и ток через человека равны:

$$\dot{U}_{\text{пр}} = \dot{U}_1 - \dot{U}_0, \quad \dot{I}_h = \dot{U}_{\text{пр}} Y_h \quad (8)$$

где $\dot{U}_1$ — комплексное напряжение фазы 1, $\dot{U}_0$ — комплексное напряжение между нейтралью источника и землей.

Величину $\dot{U}_0$ можно найти, используя метод узлового напряжения; она определяется выражением:

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_1(Y_1 + Y_h) + \dot{U}_2 Y_2 + \dot{U}_3 Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_H + Y_0 + Y_h}. \quad (9)$$

Для трехфазной системы $\dot{U}_1 = \dot{U}_\phi$, $\dot{U}_2 = \dot{U}_\phi a^2$, $\dot{U}_3 = a\dot{U}_\phi$,

где a — оператор, учитывающий сдвиг фаз, $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$.

Тогда напряжение прикосновения будет равно

$$\dot{U}_{\text{пр}} = \dot{U}_{\phi} \frac{Y_2(1-a^2) + Y_3(1-a) + Y_n + Y_0}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_n + Y_0 + Y_h}, \quad (10)$$

а ток, протекающий через человека

$$\dot{I}_h = \dot{U}_{\text{пр}} Y_h = U_{\phi} Y_h \frac{Y_2(1-a^2) + Y_3(1-a) + Y_n + Y_0}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_n + Y_0 + Y_h}. \quad (11)$$

Полученные выражения являются основными для анализа опасности прикосновения человека к электросети.

Проанализируем с их помощью опасность прикосновения к фазе наиболее распространенных трехфазных сетей: четырехпроводной с глухозаземленной нейтралью и трехпроводной с изолированной нейтралью.

2.4.3. Трехфазная четырехпроводная сеть с глухозаземленной нейтралью

В таких сетях сопротивление нейтрали считается активным и не должно превышать 10 Ом.

Нормальный режим

В нормальном режиме (изоляция всех проводов в норме) можно считать, что проводимости $Y_1=Y_2=Y_3=Y_4=0$.

Тогда согласно (10)

$$U_{\text{пр}} = U_{\phi} R_h / (R_h + r_0) \approx U_{\phi}; I_h = U_{\phi} / R_h.$$

Таким образом, оказывается, что прикосновение к одной из фаз в таких сетях **весьма опасно** (ток I_h может быть опасным: $I_h \sim 220 \text{ В} / 1000 \text{ Ом} = 220 \text{ мА}$).

Аварийный режим

Пусть одна из фаз (например 3) замкнута на землю через относительно малое сопротивление $r_{3м}$, а человек прикасается к фазе 1 (рис.11). При этом можно считать $Y_1=Y_2=Y_n=0$.

Из (10) можно получить выражение:

$$U_{\text{пр}} = U_{\phi} R_h \frac{\sqrt{r_{3м}^2 + 3r_{3м}r_0 + (r_0\sqrt{3})^2}}{r_{3м}r_0 + R_h(r_{3м} + r_0)}. \quad (12)$$

Ток через человека будет равен $I_h = U_{\text{пр}} Y_h$.

Анализ этих выражений показывает, что напряжение прикосновения человека к исправному фазному проводу трехфазной сети с заземленной нейтралью в аварийном режиме (одна из фаз замкнута на землю) всегда меньше линейного, но больше фазного:

$$U_{\text{л}} = U_{\phi} \sqrt{3} > U_{\text{пр}} > U_{\phi}.$$

Таким образом, прикосновение человека в этом аварийном режиме **более опасно**, чем при нормальной работе сети.

2.4.4. Трехфазная трехпроводная сеть с изолированной нейтралью

Нормальный режим

Так же, как и в предыдущем случае, анализ опасности сети проводим с использованием формул (10, 11), в которых надо принять $Y_n = Y_0 = 0$.

Из этих формул при условии равенства сопротивлений изоляции r и емкости проводов относительно земли, т.е.

$$Y_1=Y_2=Y_3=Y=1/r + j\omega C,$$

для тока через человека можно получить выражение

$$\dot{I}_h = \frac{U_{\phi}}{R_h + Z/3}, \quad (13)$$

где Z - комплексное сопротивление равное $1/Y$.

В действительной форме

$$I_h = \frac{U_{\phi}}{R_h} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r(r + 6R_h)}{9R_h^2(1 + r^2\omega^2C^2)}}}. \quad (13')$$

Аварийный режим сети

В этом случае одна из фаз (например, 3) замыкается на землю через малое сопротивление $r_{3м}$, а проводимости других фаз приравниваются нулю: $Y_1 = Y_2 = 0$.

Тогда с использованием (8, 9) можно получить выражения:

$$I_h = \frac{U_\phi \sqrt{3}}{R_h + r_{3м}}, \quad (14)$$

$$U_{np} = I_h R_h = U_\phi \sqrt{3} \frac{R_h}{R_h + r_{3м}}. \quad (15)$$

Поскольку обычно $R_h \gg r_{3м}$, напряжение прикосновения значительно больше фазного и несколько меньше линейного.

Из анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- в нормальном режиме работы сети с изолированной нейтралью значительно безопаснее, чем сети с заземленной нейтралью; первые при достаточно больших сопротивлениях изоляции проводов можно считать безопасными (естественно, при таких напряжениях, которые обеспечивают безопасные токи – так, при напряжениях до 380 В и обычных сопротивлениях изоляции токи не превышают 10 мА);
- при аварийном режиме обе сети опасны; менее опасна сеть с заземленной нейтралью.

2.4.5. Выбор схемы сети и режима нейтрали

В зависимости от режима нейтрали и наличия нулевого провода существуют четыре схемы трехфазных сетей:

- 1) трехпроводная с изолированной нейтралью;
- 2) трехпроводная с заземленной нейтралью
- 3) четырехпроводная с изолированной нейтралью;
- 4) четырехпроводная с заземленной нейтралью.

В настоящее время в Украине при напряжении до 1000 В применяются первая и четвертая схемы (вторая и третья схемы не обеспечивают безопасности персонала).

По техническим требованиям предпочтение часто отдается четырехпроводной сети, так как она позволяет использовать два рабочих напряжения.

По условиям безопасности выбор одной из двух схем производится на основе анализа безопасности конкретной схемы (см. проведенный выше).

На практике сети с изолированной нейтралью применяются тогда, когда можно обеспечить высокий уровень изоляции проводов относительно земли и когда емкость проводов незначительна. Обычно это сети небольших предприятий, шахт и др., где они могут постоянно поддерживаться в норме квалифицированным электротехническим персоналом.

Сети с заземленной нейтралью применяются во всех остальных случаях (сети крупных предприятий, городские и сельские сети и др.).

Согласно ГОСТ электробезопасность электроустановок обеспечивается конструкцией электроустановок, техническими способами и средствами защиты, организационными и техническими мероприятиями.

Все меры обеспечения электробезопасности сводятся к трем путям:

- 1) недопущение прикосновения и приближения на опасное расстояние к токоведущим частям, находящимся под напряжением;
- 2) снижение напряжения прикосновения;
- 3) уменьшение продолжительности воздействия электрического тока на пострадавшего.

К техническим способам относятся следующие:

- 1) применение надлежащей изоляции и контроль за ее состоянием;
- 2) обеспечение недоступности токоведущих частей;
- 3) автоматическое отключение электроустановок в аварийных режимах – защитное отключение;
- 4) заземление или зануление корпусов электрооборудования;
- 5) выравнивание потенциалов;
- 6) применение разделительных трансформаторов;
- 7) защита от опасности при переходе напряжения с высокой стороны на низкую;
- 8) компенсация емкостной составляющей тока замыкания на землю;
- 9) применение малых напряжений.

Основные из этих мер – заземление, зануление, защитное отключение – рассмотрим далее, в главе 3.

Здесь же отметим, что заземление или зануление электроустановок следует выполнять:

- 1) при напряжении 380 В и выше переменного тока и 440 В и выше постоянного тока – во всех электроустановках;
- 2) при номинальных напряжениях выше 42 В, но ниже 380 В переменного тока и выше 110 В, но ниже 440 В постоянного тока – только в помещениях с повышенной опасностью, особо опасных и в наружных установках.

Как правило, заземление или зануление электроустановок не требуется при номинальных напряжениях до 42 В переменного тока и до 110 В постоянного тока.

Классификация помещений по степени опасности поражения электрическим током следующая:

1. Помещения с повышенной опасностью.

Характеризуются наличием одного из условий:

- токопроводящей пыли;
- токопроводящих полов (металлические, земляные и т. д.);
- высокой температуры (более 35°C);
- относительной влажности (более 75 %);
- возможности одновременного прикосновения человека к металлоконструкциям зданий, технологическому оборудованию, имеющим соединение с землей, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования, с другой стороны.

2. Помещения особо опасные.

Характеризуются наличием одного из следующих условий, таких как:

- особая сырость (влажность около 100%);
- химическая активная или органическая среда, действующая на изоляцию;
- одновременное наличие 2 и более условий для помещений повышенной опасности.

3. Помещения без повышенной опасности.

В них отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность.

Глава 3. Защитное заземление

3.1. Заземление и принцип его действия

Защитное заземление – преднамеренное электрическое соединение с землей металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением (по разным причинам).

Заземляющее устройство состоит из заземлителя и заземляющих проводов, которые соединяют заземлитель с заземляемыми частями электроустановок.

Заземлителем называется проводник или группа соединенных между собой проводников, находящихся в контакте с землей.

Принцип действия заземления – снижение до безопасных значений напряжения прикосновения и шага, обусловленных замыканием.

Сети, в которых применяется заземление.

Анализ опасности различных сетей, аналогичный проведенному выше, показывает, что при напряжениях до 1000 В заземление может обеспечить безопасность в таких сетях:

- трехфазных трехпроводных с изолированной нейтралью (рис.12);
- однофазных двухпроводных, изолированных от земли;
- постоянного тока двухпроводных с изолированной точкой обмоток источника тока.

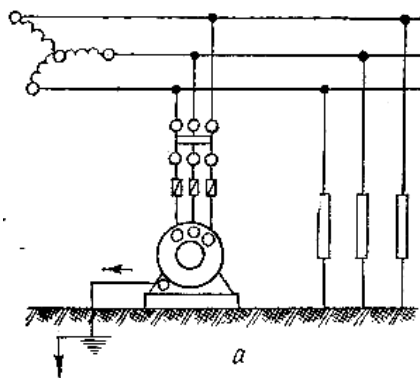


Рис.12. Трехфазные трехпроводные сети с изолированной нейтралью

Металлические нетоковедущие части установок могут оказаться под напряжением при замыкании. Если они не имеют контакта с землей, прикосновение к ним так же опасно, как и прикосновение к фазе. Если же они заземлены, то окажутся под напряжением заземлителя $U_3 = I_3 R_3$ (см. рис.13а), где I_3 – ток замыкания, R_3 – сопротивление заземлителя.

Напомним, что напряжением прикосновения называется напряжение между двумя точками цепи тока, которых одновременно касается человек.

Для защитных заземлений или занулений одна из этих точек имеет потенциал заземлителя φ_3 , а другая – потенциал основания в том месте, где стоит человек φ_{oc} .

В этом случае напряжение прикосновения

$$U_{пр} = \varphi_3 - \varphi_{oc}$$

или

$$U_{пр} = \varphi_3 \alpha_1, \quad (17)$$

где α_1 – так называемый коэффициент прикосновения, учитывающий форму потенциальной кривой заземлителя (см. рис. 13; здесь не учитывается падение напряжения в основании, на котором стоит человек)

$$\alpha_1 = (1 - \varphi_{oc} / \varphi_3). \quad (18)$$

Собственный потенциал заземлителя φ_3 равен произведению тока, стекающего через него в землю, на его сопротивление

$$U_3 = \varphi_3 = I_3 R_3. \quad (19)$$

Тогда ток через человека, оказавшегося под напряжением прикосновения,

$$I_h = I_3 R_3 \alpha_1 / R_h. \quad (20)$$

Последнее выражение показывает, что чем меньше величины α_1 и R_3 , тем меньше ток через человека, стоящего на земле и касающегося оборудования, которое находится под напряжением. **Таким образом, безопасность обеспечивается путем заземления корпуса посредством заземлителя с малым сопротивлением и малым коэффициентом прикосновения α_1 .**

Величина α_1 определяется потенциалом заземлителя и зависит от многих факторов: значения тока, стекающего в землю, конфигурации, числа и взаимного расположения электродов, образующих заземление, удельного сопротивления грунта и т.д.

Эти вопросы кратко изложены ниже.

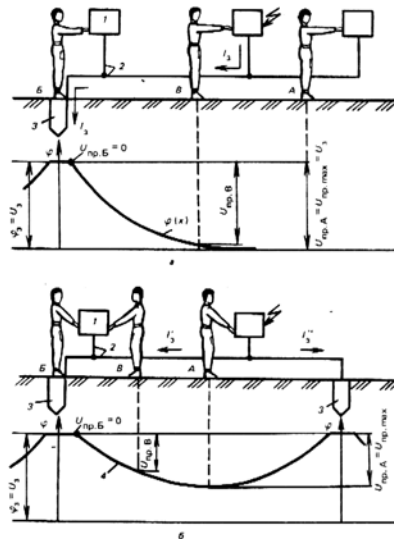


Рис. 13. Зависимость напряжения прикосновения от положения человека относительно заземлителя и формы потенциальной кривой

3.2. Потенциал заземлителя

Рассмотрим вначале шаровой заземлитель радиусом r , находящийся в однородной земле на большой глубине (когда можно пренебречь влиянием поверхности земли и рассматривать симметричную задачу). Пусть через шар стекает в землю ток I_3 (рис.14). Найдем потенциал в точке А на расстоянии x от центра заземлителя.

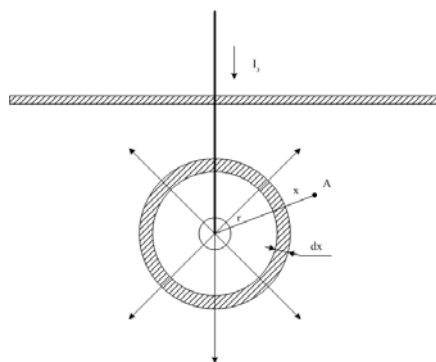


Рис.14. Шаровой заземлитель на большой глубине

Ток в земле растекается от шара равномерно и плотность его в земле убывает по мере удаления от заземлителя. Плотность тока в точке А определяется выражением:

$$j = I_3 / 4\pi x^2 \quad (21)$$

($4\pi x^2$ – поверхность сферы с радиусом x)

Плотность тока связана с напряженностью E электрического тока формулой:

$$j = \sigma E, \quad (22)$$

где σ – удельная проводимость, равная $1/\rho$ (ρ – удельное объемное сопротивление, Ом·м).

Величина E , как известно, определяется падением напряжения на единице пути:

$$E = dU/dx. \quad (23)$$

Из выражений (21-23) легко находится потенциал в любой точке (он равен падению напряжения на участке от этой точки до бесконечности:

$$\varphi = \int_0^{\infty} dU = I_3 \rho / 4\pi x. \quad (24)$$

Максимальный потенциал будет на поверхности шарового заземлителя (потенциал заземлителя):

$$\varphi_{\max} = \varphi_3 = I_3 \rho / 4\pi r, \quad (25)$$

а минимальный, равный нулю, на бесконечности.

Практически область нулевого потенциала лежит при $x > 20$ м.

Из других рассматриваемых заземлителей еще можно отметить шаровой заземлитель на поверхности земли (полушаровой заземлитель) и стержневой заземлитель. Для них уравнения потенциальных кривых соответственно имеют вид:

$$\varphi = I_3 \rho / 2\pi x; \quad \varphi = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}. \quad (26)$$

Потенциалы заземлителей этого типа получаются из (26) при $x = r$, где r – соответствующий радиус.

Отметим, что потенциальную кривую заземлителя любой формы на большом расстоянии (по сравнению с размерами заземлителя) с достаточной точностью можно описывать уравнением для полушарового заземлителя:

$$\varphi = I_3 \rho / 2\pi x. \quad (27)$$

3.3. Сопротивление заземлителя растеканию тока

Ток, проходящий через заземлитель в землю, испытывает сопротивление, называемое сопротивлением растекания.

Оно имеет три составляющих: сопротивление самого заземлителя, переходное сопротивление между заземлителем и грунтом, сопротивление грунта. Два первых слагаемых малы по сравнению с третьим, и под сопротивлением растеканию тока обычно понимают сопротивление грунта. Сопротивление растеканию тока заземлителей находится из соотношения $R = \varphi_3 / I_3$

Из приведенных выше формул (25-27) следует, что сопротивление растеканию тока зависит от свойств грунта, от размеров и формы заземлителя, но не от сопротивления собственно заземлителя.

По условиям безопасности заземление должно иметь малое сопротивление. Как следует из формул, этого можно достичь, увеличивая размеры одиночного заземлителя. Можно также применить параллельное соединение электродов (групповой заземлитель). Последнее более экономично, а также позволяет выровнять потенциальную кривую на площади, где они размещаются, что повышает безопасность.

Принцип выравнивания потенциала можно понять из рис. 15а. Выравнивание обеспечивается за счет взаимодействия полей растекания электродов, которые для этого должны быть расположены на расстояниях менее 40 м друг от друга.

3.3.1. Влияние свойств грунта на его удельное сопротивление

Род грунта непосредственно не влияет на удельное сопротивление, поскольку сухой грунт тока практически не проводит. На проводимость в большей степени влияют концентрация растворимых проводящих веществ, дисперсность, влажность. Проводимость грунта возрастает при уплотнении, поэтому в практике необходимо трамбовать грунт.

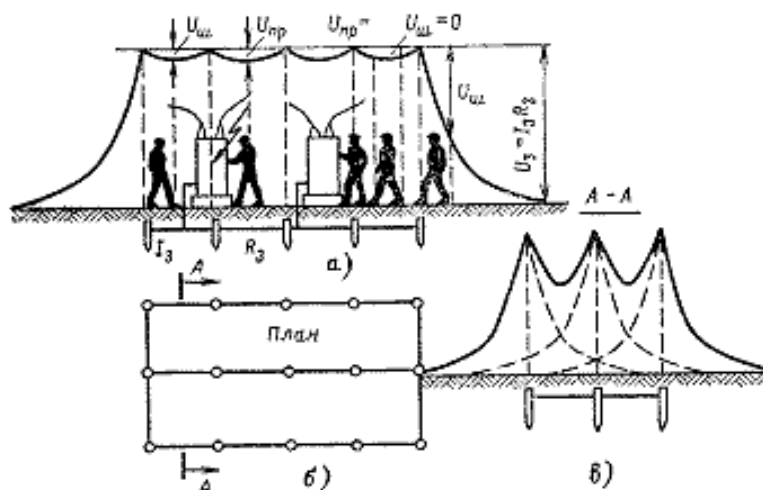


Рис.15. Принцип выравнивания потенциала на примере контурного заземления

В таблице 6 приведены пределы изменений удельного электрического сопротивления для некоторых видов грунта и воды.

График зависимости удельного сопротивления грунта от его влажности приведен на рис.16. Из рисунка следует, что есть оптимальные значения влажности растворимых веществ, которые обеспечивают наименьшее сопротивление.

Таблица 6.

Значения удельного электрического сопротивления различных грунтов и воды, Ом·м

Грунт	Возможные пределы колебаний	При влажности 10-20% массы грунта	Вода	Возможные пределы колебаний
Глина	8-70	40	Морская	0,2-1
Чернозем	9-53	20	Ручьевая	10-60
Торф	10-30	20	Речная	10-100
Песок	400-700	700	Грунтовая	20-70
Скалистый	10^4-10^7	—	Прудовая	40-50

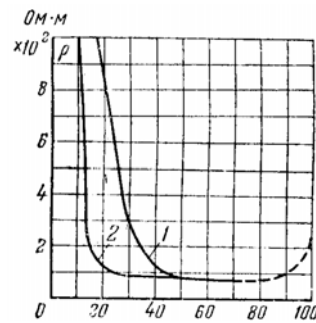


Рис.16. Зависимость удельного сопротивления грунта от его влажности; кривая 1 - тонкодисперсный грунт, кривая 2 – грубодисперсный грунт

3.3.2. Измерение сопротивления заземлителя

В целом задача расчета сопротивления заземлителей для конкретных условий довольно сложная, и лучший результат могут дать непосредственные измерения сопротивления растекания. При этом наибольшее распространение получил метод амперметра-вольтметра (рис.17). Кроме контрольного электрода (E_k), используют и два вспомогательных: токовый E_t (для создания цепи тока $I_{изм}$) и потенциальный E_n (для подключения одного из проводов вольтметра к точке с нулевым потенциалом). С помощью амперметра измеряется ток через контрольный зонд, а с помощью вольтметра – потенциал зонда ϕ . Сопротивление заземлителя определяется из выражения:

$$R_{изм} = \phi / I_{изм}. \quad (28)$$

В качестве источника тока применяется однофазный понижающий трансформатор. Питание прямо от сети недопустимо, так как связь этой сети с землей (заземление, плохая изоляция и др.) существенно искажает результаты измерений. Погрешность метода определяется величиной

$$\gamma = R_n / (R_n + R_v), \quad (29)$$

где R_n , R_v – сопротивления потенциального электрода и вольтметра соответственно.

Для сложного заземлителя используются схемы размещения электродов, приведенные на рис.18.

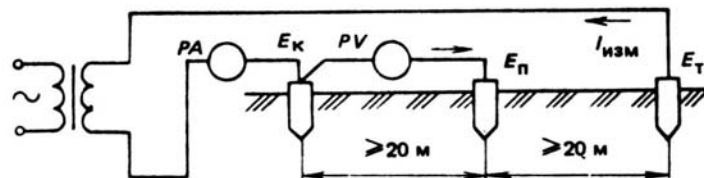


Рис.17. Метод амперметра-вольтметра для измерения сопротивления заземлителя

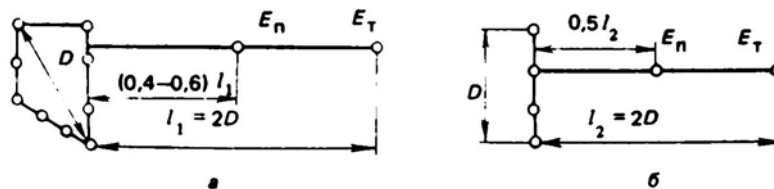


Рис.18. Размещение электродов при измерении сопротивления сложного заземлителя

Сопротивление заземляющего устройства надо проводить в условиях, когда сопротивление верхних слоев грунта наибольшее (наибольшее иссушение почвы, ее промерзание и др.)

3.4. Типы заземляющих устройств

Различают два типа заземляющих устройств: контурное и выносное.

Контурное заземление. Заземлители располагаются по контуру вокруг заземленного оборудования на небольшом (несколько метров) расстоянии друг от друга. Поля растекания накладываются (см. рис.15). Вследствие этого коэффициент α_1 намного меньше 1 (обычно 0,1-0,3). Таким образом, при таком заземлении

безопасность обеспечивается и за счет выравнивания потенциала, что уменьшает напряжение прикосновения. В общем случае ток через человека для таких заземляющих устройств меньше, чем для выносных.

Выносное заземление. Заземлители располагаются на некотором удалении от заземляемого оборудования (рис.19). Поэтому, как правило, заземленные корпуса находятся вне поля растекания (см. рис.19а), и человек, касаясь корпуса, оказывается под полным напряжением относительно земли $U_{пр} = U_3$ (т.е. коэффициент $\alpha_1=1$).

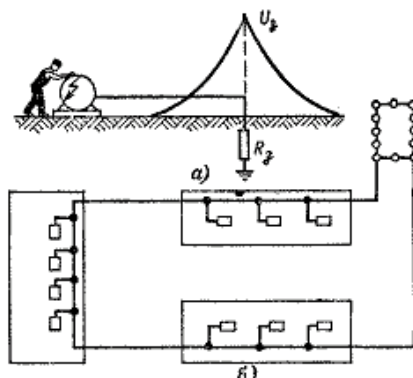


Рис. 19. Выносное заземление

Таким образом, выносное заземление защищает только за счет малого сопротивления заземления.

Достоинством выносного заземления является возможность выбора места размещения электродов с наименьшим сопротивлением грунта. Необходимость в таких устройствах возникает при невозможности размещения электродов на защищаемой территории, при высоком удельном сопротивлении грунта, при сильно рассредоточенном расположении оборудования.

3.5. Выполнение заземляющих устройств.

При устройстве защитных заземлений необходимо в первую очередь использовать естественные заземлители. При невозможности обеспечения требуемого сопротивления у естественных заземлителей необходимо сооружение искусственных заземлителей.

В качестве естественных заземлителей используются водопроводные и другие металлические трубы (за исключением трубопроводов горючих жидкостей, газов), металлические и железобетонные конструкции сооружений, соединенные с землей, оболочки кабелей и др. Такие заземлители обычно имеют малое сопротивление. Недостатками естественных заземлителей является доступность их неподготовленному персоналу и возможность нарушения при ремонтных работах.

Для искусственных заземлителей обычно используются вертикальные и горизонтальные электроды.

В качестве вертикальных электродов используются стальные трубы с толщиной стенок не менее 3,5 мм и угловая сталь с толщиной полок не менее 4 мм; длина их составляет 2,5-3,0 м. Применяется также пруток диаметром не менее 10 мм длиной до 10 м и более.

Для связи вертикальных электродов применяется полосовая сталь не менее 4х12 мм и пруток диаметром не менее 6 мм.

Для установки вертикальных заземлителей роют траншею глубиной 0,7-0,8 м, после этого забивают вертикальные заземлители (см. рис.20). Верхние их концы соединяют стальной полосой с помощью сварки. Траншею засыпают очищенной землей, которую затем трамбуют, что снижает сопротивление заземлителя.

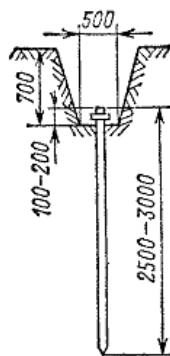


Рис.20. Установка вертикальных заземлителей

От такого группового заземлителя отходит магистральный заземляющий проводник. Размеры стальных полос должны быть : для магистрали 40х3 мм, для ответвлений от нее 20х3 мм. Можно использовать круглую сталь

диаметром 6-10 мм. Внутри здания магистраль заземления прокладывается по контуру вдоль стен. Вводы от заземлителя в помещении к внутреннему контуру для надежности присоединяют в нескольких местах.

Заземление отдельных объектов электрооборудования осуществляют путем параллельного присоединения их к внутреннему контуру. Все соединения элементов заземляющего устройства следует выполнять сваркой, а присоединение к корпусам электрооборудования на болтах. Открытые заземляющие проводники окрашивают в черный цвет.

Наибольшие допустимые величины сопротивлений заземляющих устройств для установок до 1000 В составляют:

- 10 Ом – при суммарной мощности питающих сеть генераторов или трансформаторов не более 100 кВ·А;
- 4 Ом – во всех других случаях.

В процессе эксплуатации заземляющих устройств возможно повышение сопротивления заземлителя сверх расчетного и нарушения целостности заземляющей проводки, поэтому необходимы постоянный надзор за состоянием элементов заземления и периодическое (обычно через 1 год) измерение сопротивления заземляющего устройства.

Глава 4. Зануление

Занулением называется электрическое соединение металлических нетоковедущих частей электроустановок с заземленной нейтралью вторичной обмотки трехфазного понижающего трансформатора или генератора, с заземленным выводом источника однофазного тока или заземленной средней точкой в сетях постоянного тока (см. рис.21).

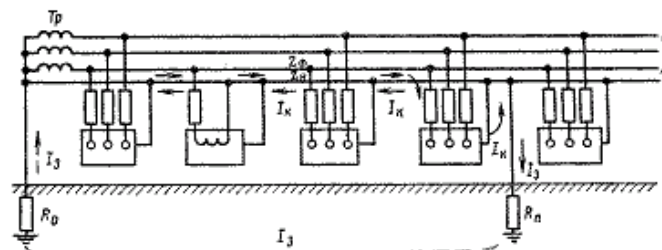


Рис.21. Схема зануления

Нулевым защитным проводником называется проводник, соединяющий зануляемые части с заземленной нейтралью.

Заземление нейтрали источника питания осуществляется непосредственно вблизи него и является рабочим заземлением электроустановки; оно выполняется аналогично защитному заземлению.

В трехфазной четырехпроводной сети четвертый проводник, присоединенный к нейтрали источника питания и используемый в цепи питания электроприемников, называется нулевым рабочим проводником. Одновременно он может выполнять также функцию нулевого защитного проводника.

В цепи нулевых защитных проводников не должно быть аппаратов, разъединяющих эти проводники, в том числе предохранителей.

Принцип действия зануления – превращение замыкания на корпус в однофазное короткое замыкание, ток которого обеспечивает срабатывание защиты (плавкие предохранители, магнитные пускатели и др.), отключающей поврежденную установку. Кроме того, так как нетоковедущие части заземлены через нулевой защитный проводник, до момента автоматического отключения проявляется и защитное свойство заземления.

4.1. Назначение элементов схемы зануления

4.1.1. Назначение нулевого проводника

В случае отсутствия нулевого проводника (рис.22) при замыкании корпуса по цепи будет проходить ток

$$I_3 = U_{\phi} / (r_0 + r_k) \quad (30)$$

и на корпусе возникает напряжение

$$U_k = I_3 \cdot r_k \quad (31)$$

Это напряжение может достигать опасных значений (110 В при $U_{\phi}=220$ В, $r_0=r_k=4$ Ом). Соответствующий ток I_3 может оказаться недостаточным для срабатывания защиты.

Чтобы устранить такую опасность, и вводят нулевой защитный проводник (при этом соответствующая цепь имеет значительно меньшее сопротивление, чем $r_0 + r_k$).

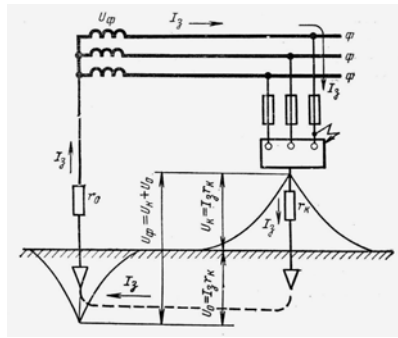


Рис.22. Схема, иллюстрирующая необходимость нулевого проводника

4.1.2. Назначение заземления нейтрали

Зануление могло бы обеспечить отключение установки при замыкании на корпус и в сетях с изолированной нейтралью. Однако в таких сетях опасность остается: при замыкании фазы на землю корпус будет находиться под напряжением, близким к фазному, которое может существовать долго. В сетях с заземленной нейтралью при таком замыкании (рис.23) напряжение на корпусе значительно меньше:

$$U_k = I_z r_0 = U_\phi r_0 / (r_{zm} + r_0). \quad (32)$$

Обычно $r_{zm} \gg r_0$, и в результате U_k снижается до безопасных значений.

Таким образом, заземление нейтрали в сетях до 1000 В служит для снижения напряжения зануленных корпусов относительно земли до безопасных значений при замыкании фазы на землю.

4.1.3. Назначение повторного заземления проводника

Повторное заземление нулевого провода предназначено для снижения напряжения на корпусах оборудования при замыкании фазы на корпус как при исправном, так и при оборванном нулевом проводе.

Его выполняют на концах воздушных линий и ответвлений длиной более 200 м, на вводах от воздушных линий к электроустановкам.

Анализ необходимости такого повторного заземления можно провести, используя рисунки 24, 25.

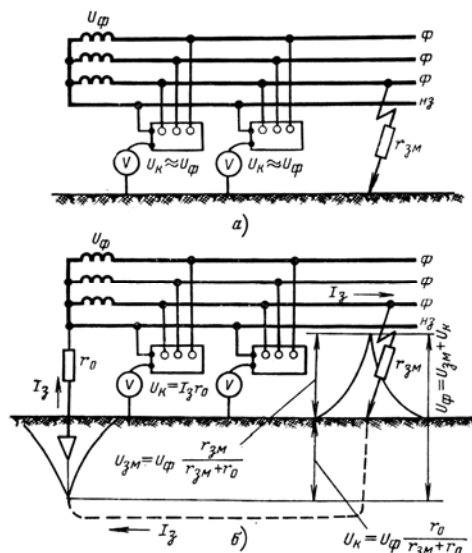


Рис.23. Замыкание фазы на землю для трехфазных четырехпроводных сетей: а) с изолированной нейтралью; б) с заземленной нейтралью

Так, при замыкании на корпус (рис.24) при отсутствии повторного заземления участок нулевого защитного проводника и все корпуса за местом замыкания находятся под напряжением $U_n = U_\phi R_{nz} / (R_\phi + R_{nz})$, где R_ϕ и R_{nz} – соответственно сопротивления фазного провода и участка нулевого провода, обтекаемого током. Обычно $2 R_\phi > R_{nz}$, тогда $U_n < 2 U_\phi / 3$.

При повторном заземлении (рис.24, пункт) значение U_n снижается до $U_n = U_\phi r_n / (r_0 + r_n)$.

В случае обрыва нулевого защитного проводника и замыкании фазы на корпус за местом обрыва при отсутствии повторного заземления напряжение (рис. 25а) будет равно фазному и существовать длительное время. При наличии же повторного заземления (рис. 25б) напряжения на корпусах за местом обрыва уменьшается до

$$U_H = U_{\phi} r_n / (r_0 + r_n). \quad (33)$$

При $r_0 \approx r_n$ $U_H \sim 0,5 U_{\phi}$.

Это означает, что повторное заземление при обрыве нулевого провода уменьшает, но не устраняет полностью опасность поражения. Поэтому на практике необходимо исключить возможность обрыва (разъединения) нулевого защитного проводника (запрещается ставить выключатели, предохранители).

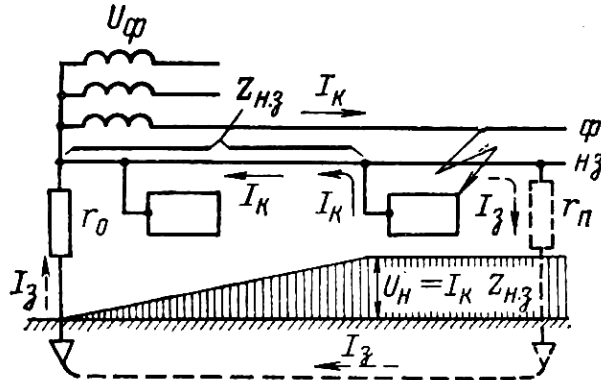


Рис. 24. Случай замыкания фазы на корпус при отсутствии повторного заземления

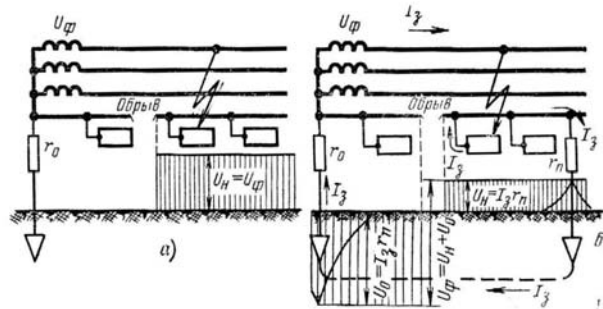


Рис.25. Схемы, иллюстрирующие необходимость повторного заземления

4.2. Расчет зануления

Расчет имеет целью определить следующие параметры:

- сечение нулевого защитного проводника, при котором срабатывает токовая защита (расчет на отключающую способность);
- сопротивление заземления нейтрали;
- сопротивление повторного заземления нулевого защитного проводника.

4.2.1. Расчет на отключающую способность

Расчет на отключающую способность можно провести, пользуясь схемой, представленной на рис.26.

При замыкании установка отключится при токах короткого замыкания $I_k > k I_{ном}$, где $I_{ном}$ – номинальный ток для предохранителя или ток срабатывания автоматического выключателя, k – коэффициент кратности тока. Значения k : 3 – для плавких предохранителей (> 4 во взрывоопасных помещениях); 1,4 – для электромагнитных расцепителей с $I_{ном}$ до 100 А и 1,25 – для расцепителей с $I_{ном} > 100$ А.

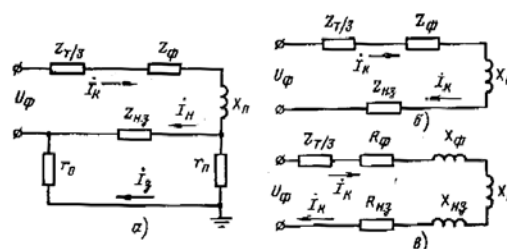


Рис.26. Схемы для расчета зануления

Ток замыкания определяется из выражения

$$I_k = U_{\phi} / (z_T / 3 + z_n), \quad (34)$$

где z_T – модуль полного сопротивления трансформатора, а z_n – модуль полного сопротивления петли "фаза-нуль" – определяется из формулы

$$z_n = [(R_{\phi} + R_{n3})^2 + (X_{\phi} + X_{n3} + X_n)^2]^{1/2}, \quad (35)$$

где R_{ϕ} , R_{n3} – активные сопротивления фазного и нулевого проводников, X_{ϕ} , X_{n3} – внутренние индуктивные сопротивления фазного и нулевого проводников, X_n – внешнее индуктивное сопротивление петли "фаза-нуль".

Величины, входящие в (35) определяют:

- для проводников из меди или алюминия $R_{\phi} = \rho l / s_{\phi}$, $R_{n3} = \rho l / s_{n3}$, $X_{\phi} = 0$, $X_{n3} = 0$, где l и s – длина и сечение проводников, соответственно;
- для стального проводника эти величины определяются из соответствующих таблиц.

Если оказывается, что значение I_k , рассчитанное по (34), больше $kI_{ном}$, то на отключающую способность схема рассчитана правильно. В противном случае выбирают фазный и нулевой защитный проводники большего сечения или уменьшают расстояние между этими проводниками (что уменьшает величину X_n).

4.2.2. Расчет сопротивления заземления нейтрали

Сопротивление заземления нейтрали выбирается таким, чтобы напряжение прикосновения к корпусу в худшем случае (коэффициент прикосновения $\alpha_1 = 1$, в сети отсутствует повторное заземление нейтрали) не превышало допустимого $U_{доп}$ (обычно принимается равным 42 В). Тогда из (33) можно получить значение

$$r_0 < r_{зм} U_{доп} / (U_{\phi} - U_{доп}). \quad (36)$$

Обычно считают, что $r_{зм} \sim 20$ Ом (меньшие значения маловероятны).

4.2.3. Расчет сопротивления повторного заземления

Сопротивление повторного заземления находится из условия, что напряжение на корпусе на участке за ближайшим к месту замыкания фазы не превышало предельно допустимых значений (см. табл.4). Используя соответствующую схему замещения (рис.26), в пренебрежении X_{n3} и X_n и с учетом того, что обычно берут $R_{n3} = 2R_{\phi}$, можно получить выражение

$$r_n \approx r_0 U_{доп} / (2 U_{\phi} / 3 - U_{доп}). \quad (37)$$

Глава 5. Защитное отключение

5.1. Общие сведения об устройствах защитного отключения

В основе действия защитного отключения, как электрозащитного средства, лежит принцип ограничения (за счет быстрого отключения) продолжительности протекания тока через тело человека при непреднамеренном прикосновении его к элементам электроустановки, находящимся под напряжением. Из всех известных электрозащитных средств устройство защитного отключения (УЗО) является единственным, обеспечивающим защиту человека от поражения электрическим током при прямом прикосновении к одной из токоведущих частей. Другим, не менее важным свойством УЗО является его способность осуществлять защиту от возгорания и пожаров, возникающих на объектах вследствие возможных повреждений изоляции, неисправностей электропроводки и электрооборудования.

Защитное отключение – система защиты, обеспечивающая безопасность путем автоматического отключения электроустановки при возникновении аварийной ситуации: замыкании на землю, снижении сопротивления изоляции, неисправности заземления или зануления и самого устройства защитного отключения. Повреждение установки вызывает изменения некоторых параметров цепей, которые могут быть использованы устройствами автоматического отключения. При определенном значении соответствующей входной величины, называемом уставкой, защитное отключение срабатывает и отключает электроустановку. В зависимости от входной величины выделяют следующие схемы: на напряжении корпуса относительно земли; на токе замыкания на землю; на напряжение нулевой последовательности; на напряжении фазы относительно земли; на токе нулевой последовательности; комбинированные и др.

Основные требования, предъявляемые к УЗО: высокая чувствительность, малое время отключения (оно не должно превышать 0,3с), селективность действия (отключение непосредственно аварийной линии), способность осуществлять самоконтроль исправности, высокая надежность.

5.2. Устройства, реагирующие на напряжение корпуса относительно земли

В устройствах, реагирующих на напряжение корпуса относительно земли, основным элементом схемы является защитное реле P_3 (рис.27). При замыкании на корпус одной фазы корпус окажется под напряжением выше допустимого, сердечник реле P_3 втягивается и замыкает цепь питания катушки автоматического выключателя АВ, в результате чего электроустановка отключается.

Достоинством схемы является простота. Недостатки: необходимость иметь вспомогательное заземление R_B ; неселективность отключения в случае присоединения нескольких корпусов к одному заземлению; непостоянство уставки при изменениях сопротивления R_B .

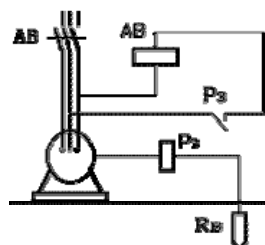


Рис.27. Устройства, реагирующие на напряжение корпуса относительно земли

Напряжение срабатывания реле U_c при $\alpha_1=1$ (худший случай) определяется из соотношения $U_{доп} = U_c + I_p R_B$. Учитывая, что $I_p = U_c / Z_p$, можно получить для U_c выражение

$$U_c = U_{доп} \frac{Z_p}{Z_p + R_B}. \quad (38)$$

5.3. Устройства, реагирующие на дифференциальный ток

В последнее время все большее распространение получают устройства защитного отключения, реагирующие на ток нулевой последовательности (дифференциальный ток), которые можно применять для любых напряжений в сетях как с заземленной, так и с изолированной нейтралью. Схема УЗО такого типа приведена на рис.28.

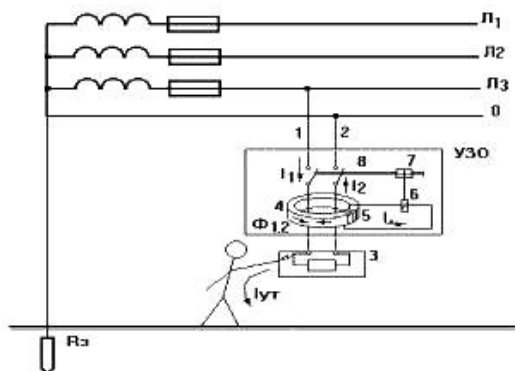


Рис. 28. Устройства, реагирующие на дифференциальный ток

Пока нет пробоя, повреждения изоляции электроприемника или прямого прикосновения человека к токоведущим частям (т.е. отсутствует ток утечки), токи в прямом 1 и обратном 2 проводниках нагрузки 3 равны и наводят в магнитном сердечнике 4 трансформатора тока УЗО равные, но встречно направленные магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , в результате чего ток во вторичной обмотке 5 равен нулю и не вызывает срабатывание чувствительного элемента – магнитоэлектрической защелки 6. При возникновении утечки, например, прикосновение человека к фазному проводнику, баланс токов и магнитных потоков нарушается ($I_1 \neq I_2 + I_{ут}$, $\Phi_1 \neq \Phi_2$), во вторичной обмотке появляется дифференциальный ток I_{Δ} , который вызывает срабатывание защелки 6, воздействующей в свою очередь на механизм расцепителя 7 и контактную систему 8. Электромеханическая система УЗО рассчитывается на срабатывание при определенных значениях – “уставках” тока утечки. Эти токи не должны превышать допустимые. Наиболее широко применяются УЗО с уставками 10, 30 и 100 мА. Время срабатывания типичных УЗО обычно меньше 0,1 с. УЗО с токами срабатывания более 100 мА используют для защиты от пожара.

Выключатель дифференциального тока реагирует только на разницу значений тока и не способен противостоять перегрузкам или коротким замыканиям (во всяком случае, он для этого не предназначен). Поэтому

в схеме всегда последовательно с ним ставят автоматический выключатель. Однако многие фирмы выпускают приборы, объединяющие функции обоих устройств. Формально они называются автоматическими выключателями, управляемыми дифференциальным током, со встроенной защитой от сверхтоков. Конструктивной особенностью УЗО со встроенной защитой от сверхтоков (см. рис.29) является то, что механизм размыкания силовых контактов запускается при воздействии на него любого из трех элементов – катушки с сердечником токовой отсечки, реагирующей на ток короткого замыкания, биметаллической пластины, реагирующей на токи перегрузки и магнитоэлектрического расцепителя, реагирующего на дифференциальный ток.

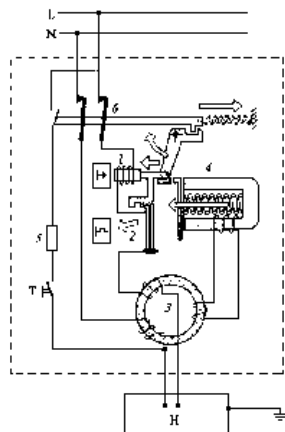


Рис.29. Схема УЗО со встроенной защитой от сверхтоков

Внешний вид одного из современных УЗО дифференциального типа (УЗО-ВАД, выпускаемые в России) приведен на рис.30.



Рис.30. Внешний вид УЗО дифференциального типа УЗО-ВАД

Эти УЗО выполняют следующие функции:

- защита от токов утечки и от токов повреждения на землю;
- защита от токов перегрузки и токов короткого замыкания;
- ограничение грозовых и коммутационных импульсных напряжений;
- индикация (световая) о наличии напряжения в сети;
- выявление аварийного режима повторного заземления нулевого проводника.

УЗО-ВАД реагируют как на синусоидальный переменный дифференциальный ток, так и на пульсирующий постоянный дифференциальный ток, что позволяет без ограничений применять эти УЗО в зданиях и жилых помещениях, насыщенных бытовой техникой (телевизоры, видеоманитофоны, персональные компьютеры, регулируемые источники света, современные стиральные машины и др.).

УЗО встраивают также в розеточные блоки или вилки, через которые подключаются электроинструмент или бытовые электроприборы, эксплуатируемые в особо опасных – влажных, пыльных, с проводящими полами и т.п. помещениях.

Глава 6. Защитные средства, применяемые в электроустановках

6.1. Общая характеристика защитных средств

Защитными средствами в электроустановках называются приборы, аппараты, переносные приспособления и устройства, а также отдельные части приборов, приспособлений, которые служат для защиты персонала от поражения электрическим током, от воздействия электрической дуги и продуктов ее горения и др. По своему назначению они делятся на изолирующие, ограждающие и вспомогательные.

Изолирующие защитные средства служат для:

- изоляции человека от частей оборудования, которые находятся под напряжением;
- изоляции человека от земли, если имеется возможность одновременного прикосновения к токоведущим частям электроустановок или к их металлическим корпусам с поврежденной изоляцией и к земле или заземленным частям оборудования.

К изолирующим защитным средствам относятся изготовленные из изолирующего материала (фарфора, дерева, резины, пластмассы и др.) изолирующие и измерительные штанги, клещи, диэлектрические перчатки, галоши, боты, резиновые коврики и дорожки, подставки на фарфоровых изоляторах, изолирующие лестницы, слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками, указатели напряжения и др.

Ограждающие защитные средства служат для временного ограждения токоведущих частей установок, находящихся под напряжением. К ним относятся переносные ограждения в виде ширм, барьеров, щитов и клеток, временные переносные заземления – закоротки.

Вспомогательные средства служат для защиты персонала от падения с высоты (пояса, канаты), для обеспечения безопасного подъема на высоту (когти, лестницы), и для защиты от световых, тепловых, механических или химических воздействий (очки, противогазы, рукавицы, фартуки, специальные костюмы и др.). К ним можно отнести также плакаты и знаки безопасности.

6.2. Изолирующие средства

Изолирующие средства делятся на основные и дополнительные.

Основными называются такие средства, которые надежно выдерживают рабочее напряжение установки и ими можно прикасаться к токоведущим частям, находящимся под напряжением. Дополнительные средства сами по себе не обеспечивают безопасность и являются дополнительной мерой к основным средствам.

Основные защитные средства испытываются напряжением, зависящим от рабочего напряжения установки, в которой они применяются.

В установках напряжением до 1000 В основными защитными средствами являются изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, указатели напряжения, диэлектрические перчатки, слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками.

Для установок с напряжением свыше 1000 В основные средства это: изолирующие штанги, изолирующие и измерительные клещи, указатели напряжения и специальные средства для работ под напряжением.

К дополнительным относятся:

- при напряжении до 1000 В – диэлектрические галоши и ковры, изолирующие подставки и накладки;
- при напряжении свыше 1000 В – диэлектрические перчатки, боты, ковры, изолирующие подставки.

Изолирующие штанги предназначены для оперативной работы, проведения измерений и наложения заземлений. Они состоят из рабочей и изолирующей частей и рукоятки. Различаются они конструкцией рабочей части в зависимости от назначения (захваты, пальцы, щетка, струбина и др.).

Длина изолирующей части зависит от величины рабочего напряжения: до 15 кВ – не менее 0,7 м, 15-35 кВ – 1 м, 35-110 кВ – 1,4 м.

Длина рукоятки также зависит от напряжения и составляет: при $U < 15$ кВ 0,3 м; при U от 35 кВ до 110 кВ – 0,6 м

Работы со штангой, как правило, надо проводить вдвоем; в этих работах при напряжениях выше 1000 В необходимо применять диэлектрические перчатки.

Внешний вид одной из конструкций изолирующей штанги приведен на рис. 31.



Рис. 31. Внешний вид изолирующей штанги

При работе со штангой необходимо:

- надевать диэлектрические перчатки;
- стоять на изолирующем основании или надевать диэлектрические боты;
- не касаться изолирующей частью других токоведущих или заземленных частей установок;
- не работать штангами, находясь на лестнице или подвесных устройствах.

Изолирующие клещи (см. рис. 32) применяют для операций с предохранителями, установки и снятия изолирующих накладок в сетях с напряжением менее 35 кВ. Они состоят из рабочей, изолирующей частей и рукояток.

Рабочая часть может изготавливаться как из электроизоляционного материала, так и из металла. На металлические губки должны быть надеты маслобензостойкие трубки для исключения повреждения патрона предохранителя.

Размеры изолирующей части и рукояток определяются рабочим напряжением. Так, при $U, 10 \text{ кВ}$ длина изолирующей части должна быть не менее $0,45 \text{ м}$, а длина рукояток – $0,15 \text{ м}$.

При работе с клещами по замене предохранителей в электроустановках напряжением выше 1000 В необходимо применять диэлектрические перчатки и средства защиты глаз и лица. При работе с клещами по замене предохранителей в электроустановках напряжением до 1000 В необходимо применять средства защиты глаз и лица, а клещи необходимо держать в вытянутой руке.

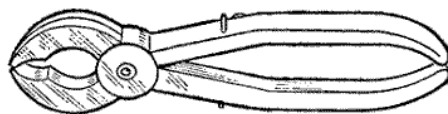


Рис. 32. Изолирующие клещи

Электроизмерительные клещи используют для измерения тока, напряжения и мощности в цепях. Они состоят из рабочей части и корпуса, который одновременно является изолирующей частью с упором и рукояткой. Применяют такие клещи при напряжениях до 10 кВ .

Рабочая часть электроизмерительных частей состоит из трансформатора тока с разъемным магнитопроводом и одной вторичной обмоткой и измерительного прибора (амперметра). Первичной обмоткой трансформатора является токоведущий проводник (голый или в изоляции), охватываемый магнитопроводом при измерениях (см. рис. 33).

При пользовании измерительными клещами необходимо надевать защитные очки, а при $U > 1000 \text{ В}$ работать в диэлектрических перчатках и находиться на изолирующей подставке. При этом расстояние между проводниками разных фаз должно быть не менее 25 см .

Как правило, измерительный прибор должен устанавливаться непосредственно на клещах; при напряжениях до 1000 В разрешается применять выносные измерительные приборы.



Рис. 33. Внешний вид одного из типов электроизмерительных клещей с выносным измерительным прибором

Штанги и клещи должны применяться в закрытых установках, а на открытом воздухе их применение допускается только в сухую погоду.

Указатели напряжения – электронные устройства, относящиеся к основным электрозащитным средствам, применение которых обеспечивает безопасные условия труда на рабочем месте. Указатели напряжения предназначены для проверки наличия или отсутствия фазного или наведенного напряжения на обслуживаемых или проверяемых токоведущих частях электроустановки перед началом наладочных или ремонтных работ. Время срабатывания указателя напряжения при номинальном напряжении электроустановки не должно превышать $1,5 \text{ с}$ для любого типа указателя.

Указатели напряжения подразделяются, на собственно указатели напряжения и сигнализаторы напряжения. Сигнализаторы напряжения отличаются от указателей напряжения тем, что, как правило, функционируют в следующем режиме и не требуют вмешательства работающего.

Основная классификация указателей напряжения производится по классу рабочего напряжения. Указатели напряжения до 1 кВ и свыше 1 кВ имеют принципиально различающуюся конструкцию, применяются в соответствии с различными регламентами и тестируются по собственным программам испытаний.

Указатели напряжения до 1 кВ подразделяются на однополюсные и двухполюсные.

Однополюсные указатели до 1 кВ также называются индикаторами напряжения. Конструктивно они выполнены в виде отвертки или аналогичной конструкции с оптическим индикатором на торце в виде газоразрядной лампы. Назначение индикатора – проверка наличия или отсутствия фазного напряжения на проводниках сети переменного тока. Электронная схема индикаторов напряжения работает от емкостного тока, протекающего через тело человека, величина которого ограничена $0,6 \text{ мА}$ и не представляет опасности поражения электротоком. В последнее время, появились однополюсные индикаторы-указатели напряжения до 1 кВ со ступенчатой индикацией уровня напряжения; некоторые образцы снабжены звуковой сигнализацией.

Поскольку однополюсные индикаторы функционируют за счет протекания емкостного тока, их показания, в принципе, зависят от покрытия пола, влажности кожи человека и т. д., иными словами, в некоторых условиях могут быть неверными.

При пользовании однополюсными указателями должен быть обеспечен контакт между электродом на торцевой (боковой) части корпуса и рукой оператора. Применение диэлектрических перчаток не допускается.

Двухполюсные указатели напряжения до 1 кВ выполняются в виде двух корпусов, изготовленных из полимерных материалов с устойчивыми диэлектрическими свойствами, соединенных гибким проводом (рис. 34).

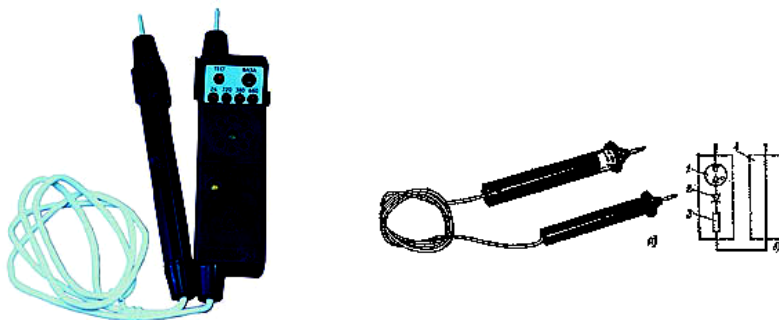


Рис. 34. Двухполюсные индикаторы напряжения

Для удобства и повышения безопасности работы на воздушных линиях (ВЛ) некоторые типы указателей комплектуются щупами-удлинителями, которые крепятся на контакты-наконечники. Конструкция таких щупов удлинителей исключает межфазное перекрытие ВЛ. Для работы на ВЛ 0,4 кВ в распределительных устройствах указатели напряжения могут комплектоваться изолирующими разъемами типа «крокодил» или специализированными контактами-переходниками.

Электронная схема двухполюсных низковольтных указателей работает за счет разности потенциалов между участками электросети с которыми соприкасаются контакты-наконечники, поэтому, система сигнализации в таких указателях работает по принципу «нет напряжения – нет сигнала».

Для исключения влияния указателя на проверяемый участок электросети и в целях электробезопасности, максимальное значение тока, протекающего через двухполюсный указатель при максимальном рабочем напряжении указателя, не должно превышать 10 мА. Как правило, простейшие двухполюсные указатели имеют одно-двухступенчатую световую индикацию и звуковую сигнализацию наличия напряжения.

Указатели высокого напряжения – это, как правило, однополюсные электронные приспособления, состоящие из рабочей части, изолирующей части и рукоятки. Рабочая часть содержит контакт-наконечник и электронный блок, рабочая часть также может содержать щуп для переноса потенциала. Изолирующая часть и рукоятка, разделенные ограничительным кольцом, могут быть выполнены с рабочей частью заодно или иметь стандартизированное разъемное соединение.

Указатели напряжения выше 1 кВ применяются перед началом работ на токоведущих частях электроустановок. Высокие рабочие напряжения предъявляют жесткие требования к надежности конструкции в целом.

При проектировании, изготовлении и эксплуатации высоковольтных указателей, особое внимание уделяется изолирующим свойствам элементов конструкции. Для различных классов напряжения (но выше 1 кВ) установлены минимальные размеры изолирующих частей и рукояток высоковольтных указателей напряжения. Так, для напряжений от 1 кВ до 10 кВ размеры изолирующей части должны составлять не менее 230 мм, а размеры рукоятки – 110 мм. Изолирующие части высоковольтных указателей испытывают повышенным напряжением в течение 1 минуты.

По принципу работы, указатели делятся на контактные и бесконтактные. Контактные указатели имеют конструкцию, предусматривающую обязательное соприкосновение контакта-наконечника с тестируемым токоведущим элементом электроустановки для проверки наличия или отсутствия на нем высокого напряжения. Электронная схема контактных указателей работает на принципе протекания емкостного тока через указатель и тело работающего. Контактные указатели должны полностью функционировать без заземления рабочей части при работе с деревянных опор или изолированных подъемников.

Современные контактные указатели могут иметь встроенный источник электропитания для генерации оптического и акустического сигнала достаточной мощности, которого хватало бы для надежного распознавания режима «напряжение присутствует» в любых условиях освещенности и зашумленности рабочего места. В устройствах сигнализации высоковольтных указателей для оптической индикации применяются ультраяркие светодиоды, а для акустического канала сигнализации – пьезокерамические излучатели.

По действующим отечественным правилам, в условиях атмосферных осадков проведение работ в электроустановках запрещено. Однако, за рубежом существует целый класс контактных указателей напряжения, предназначенных для работ в пограничных условиях – в условиях сильного тумана, редкого дождя или снега. Рабочая и изолирующие части таких указателей снабжены изолирующими навесами, по аналогии с полимерными изоляторами, для создания сухих зон и уменьшения проводимости.

Для проверки работоспособности контактных указателей до недавнего времени использовались действующие электроустановки, заведомо находящиеся под напряжением, в полевых условиях – система зажигания автомобиля.

В настоящее время, производителями освоены устройства проверки исправности высоковольтных указателей, которые представляют собой генератор переменного напряжения, работающий от встроенного аккумулятора. Контактные указатели просты, надежны, универсальны и долговечны. Подавляющая часть указателей высокого напряжения, эксплуатирующихся на предприятиях энергетики и служб электроснабжения – контактные указатели.

Бесконтактные указатели состоят из рабочей, изолирующей части и рукоятки. Изолирующая часть бесконтактного указателя должна отвечать тем же требованиям, что и изолирующая часть контактных указателей. Электронный блок, входящий в состав рабочей части бесконтактного указателя функционирует на принципе срабатывания оптической и акустической сигнализации по превышению порога наведенного напряжения на чувствительном элементе-антенне. При приближении к токоведущим частям электроустановки, находящейся под напряжением, возрастает напряженность Е-составляющей электромагнитного поля, что приводит к наведению потенциала на чувствительном элементе указателя. Как правило, бесконтактные указатели предназначены для определения отсутствия или наличия напряжения на воздушных линиях с земли.

Режим работы сигнализации современных бесконтактных указателей напряжения, как правило, строится по пороговой схеме. При включении указателя напряжения, сигнализация после прогона теста самопроверки переходит в следящий режим, при этом акустическая сигнализация генерирует короткие звуковые импульсы метрономного типа, подтверждающие работоспособность указателя, при возрастании напряженности электромагнитного поля до опасного предела, срабатывает световая сигнализация, звуковой тракт меняет характер генерируемого сигнала со следящего на предупреждающий. Существуют более функциональные модели, в которых следящий режим индикации является более информативным: в следящем режиме, характер звуковых импульсов, генерируемых указателем (частота следования или тональность) пропорционален изменению напряженности электромагнитного поля, что позволяет работающему непрерывно контролировать свое положение относительно частей электроустановки, находящихся под напряжением. Кроме того, такой режим позволяет отслеживать наведенное напряжение, которое тоже может представлять опасность.

Однако, бесконтактные указатели напряжения не применяются в распределительных устройствах, т.к. близкорасположенные электроустановки различных классов напряжения создают нерегулярную напряженность электромагнитного поля, что приводит к случайным срабатываниям сигнализации или, что опаснее, сигнализация бесконтактного указателя может не сработать в локальной тени напряженности электроустановки. Кроме того, существует серьезная проблема применения бесконтактных указателей на воздушных линиях с изолированной нейтралью (ВЛ 6-10 кВ). При замыкании на землю фазы, расположенной на нижнем проводе, напряженность электромагнитного поля в проекции на землю резко снижается, что приведет к отсутствию срабатывания сигнализации указателя на уровне земли при наличии напряжения на проводах ВЛ. Существуют бесконтактные указатели напряжения, имеющие низкую чувствительность и устанавливающиеся на длинную изолирующую штангу так, что рабочая часть подносится прямо к проводам ВЛ, однако такой указатель по функциональности сопоставим с контактными указателями для работы с землей при более высокой стоимости.

Сигнализаторы опасного напряжения предназначены для предупреждения (без участия человека) работающих в электроустановках об опасности поражения электротоком при приближении к токоведущим частям. Сигнализаторы напряжения делятся на бесконтактные и контактные стационарные.

Самыми распространенными бесконтактными сигнализаторами напряжения являются касочные сигнализаторы, которые выпускаются многими производителями. Основными функциями таких сигнализаторов является обеспечение режима самопроверки, ждущего рабочего режима и режима сигнализации приближения на опасное расстояние к токоведущим частям электроустановки, находящимся под напряжением. Алгоритм работы касочных и других бесконтактных сигнализаторов напряжения аналогичен режимам работы сигнализации бесконтактных указателей напряжения.

Стационарные сигнализаторы напряжения устанавливаются на токоведущих частях распределительных устройств и являются постоянно функционирующими. Как правило, это простейшие устройства с большим ресурсом, работающие на емкостном токе и использующие газоразрядные лампы в качестве элементов оптической индикации.

Диэлектрические перчатки. В электроустановках напряжением до 1000 В включительно в качестве основного, а в электроустановках напряжением выше 1000 В в качестве дополнительного электрозащитного средства для защиты от прикосновения руками к частям электроустановки, находящимся под напряжением, необходимо применять следующие диэлектрические перчатки: бесшовные, изготовленные из натурального латекса (ревультекса), или со швом, изготовленные из листовой резины, пятипалые или двухпалые. Длина диэлектрических перчаток должна быть не менее 350 мм, а их размер должен позволять одевать под них шерстяные или хлопчатобумажные перчатки – для защиты рук от холода. Ширина диэлектрических перчаток по нижнему краю должна позволять натягивать их на рукава верхней одежды. Толщина резины не менее 0,7 мм при применении на установках до 1000 В и 1,2 мм – выше 1000 В. На каждой перчатке ставится штамп с указанием толщины и номера перчаток.

Специальная диэлектрическая обувь. При выполнении работ в закрытых, а в случае отсутствия осадков – в открытых электроустановках в качестве дополнительного электро-защитного средства необходимо применять специальную диэлектрическую обувь, а также диэлектрические галоши. По защитным свойствам диэлектрическая обувь должна иметь следующую маркировку:

- Эн – резиновые клеенные галоши, сапоги резиновые и из поливинилхлорида – для защиты от напряжения до 1000 В;

- Эв – резиновые клеенные формовые боты и резиновые формовые галоши – для защиты от напряжения выше 1000 В.

Конструктивно специальная диэлектрическая обувь состоит из резинового верха, резиновой рифленой подошвы, текстильной подкладки и внутренних усилительных деталей. Боты должны иметь отвороты. Формовые боты могут быть без подкладки. Высота бот должна быть не менее 160 мм.

Резиновые диэлектрические ковры и изолирующие подставки. В электроустановках напряжением до 1000 В и выше в качестве дополнительного электрозащитного средства необходимо применять резиновые диэлектрические ковры и изолирующие подставки. Резиновые диэлектрические ковры необходимо использовать в закрытых электроустановках всех классов напряжений, кроме электроустановок, размещенных в сырых помещениях, а также таких, которые подвержены влиянию загрязнения, а в электроустановках, размещенных на открытом воздухе, – только в сухую погоду. Изолирующие подставки необходимо использовать в сырых и загрязненных помещениях.

Резиновые диэлектрические ковры должны изготавливаться, в зависимости от назначения и условий эксплуатации, следующих двух групп:

- первая группа – обычного исполнения – для выполнения работ при температуре от минус 15 °С до плюс 40 °С;
- вторая группа – маслбензостойкие – для выполнения работ при температуре от минус 50 °С до плюс 80 °С.

Рекомендуется применять одноцветные резиновые диэлектрические ковры с рифленой лицевой поверхностью размерами не менее 500 х 500 мм.

В электроустановках рекомендуется применять изолирующие подставки, состоящие из настила, укрепленного на опорных изоляторах высотой не менее 70 мм. Рекомендуется применять изоляторы, которые выпускаются специально для изготовления таких подставок. Настилы размерами не менее 500 х 500 мм необходимо изготавливать из деревянных планок без сучков, выстроганных из хорошо высушенного дерева или электроизоляционных материалов с аналогичными механическими свойствами. Зазоры между планками не должны превышать 30 мм. Не рекомендуется использовать сплошные настилы, поскольку они препятствуют проверке случайного шунтирования изоляторов. Настилы необходимо красить со всех сторон.

Изолирующие подставки должны быть прочными и устойчивыми. В случае применения съемных изоляторов соединение их с настилом должно исключать возможность соскальзывания настила. Края настила не должны выступать за опорную поверхность изоляторов для предотвращения опрокидывания изолирующей подставки.

Инструмент с изолирующими рукоятками. При выполнении работ в электроустановках до 1000 В в качестве основного электрозащитного средства следует применять слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками, в состав которого входят: гаечные, рожковые и разводные ключи, плоскогубцы, пассатижи, боковые и торцевые кусачки, отвертки, монтерские складные ножи.

Такой инструмент должен изготавливаться с соблюдением следующих требований:

- изолирующие рукоятки инструмента должны изготавливаться в виде диэлектрических чехлов, насаживаемых на ручки инструмента, или несъемного одно-двухслойного покрытия из материала, наносимого способом литья под давлением, окунанием и т. п.;
- изоляция инструмента должна быть влагостойкой, маслбензостойкой, нехрупкой и нескользкой;
- форма и рифление поверхности изолирующих рукояток должны обеспечивать удобство пользования инструментом;
- соединение изоляции с инструментом должно быть прочным, а также исключая возможность взаимного продольного перемещения и проворачивания изоляции и инструмента при выполнении работ;
- изоляция инструмента должна покрывать всю рукоятку и иметь длину не менее 100 мм до середины ограничительного упора; для инструментов, применяемых только в цепях вторичной коммутации, допускается длина рукоятки, обеспечивающая удобство в пользовании;
- упор инструмента не должен иметь острых кромок и краев, и его высота должна быть не менее 10 мм, толщина – не менее 3 мм; высота упора ручек отверток – не менее 5 мм; толщина первого слоя (в том числе в случае однослойной изоляции) – не менее 1 мм. Максимальная толщина (в том числе и в случае двухслойной изоляции) должна быть 2 мм;
- изоляция стрижней отверток должна заканчиваться в начале лопатки.

6.3. Ограждающие защитные средства

В электроустановках для предотвращения случайного приближения и прикосновения к токоведущим частям, находящимся под напряжением и расположенным вблизи места выполнения работ, необходимо применять защитные ограждения следующих типов:

- щиты (ширмы) – для временного ограждения токоведущих частей, находящихся под напряжением до 1000 В и выше
- изолирующие накладки – в случае невозможности ограждения рабочего места щитами; для предотвращения случайного прикосновения к токоведущим частям – в электроустановках до 20 кВ включительно; для предотвращения ошибочного включения рубильников – в электроустановках до 1000 В;
- изолирующие колпаки – в электроустановках до 10 кВ, конструкция которых по условиям электробезопасности делает невозможным наложение переносных защитных заземлений при проведении ремонтов, испытаний, определении мест повреждения;

Щиты должны изготавливаться с соблюдением следующих требований:

- материалом щитов должно служить сухое дерево, пропитанное олифой и окрашенное бесцветным лаком, или электроизоляционный материал; металлические крепежные детали не применяются;
- поверхность щитов должна быть: сплошной – для ограждения работников от случайного приближения к токоведущим частям, находящимся под напряжением; или решетчатой – для ограждения входа в ячейки, камеры, проходы и т. п.;
- конструкция щитов должна быть прочной и удобной, исключающей возможность коробления и опрокидывания их, а масса такой, чтобы щит мог переносить один работник;
- высота щита должна быть не менее 1,7 м, а расстояние от нижнего ребра до пола – не более 10 см.

Изолирующие накладки должны изготавливаться с соблюдением следующих требований:

- материал накладок, в зависимости от назначения и класса напряжения, должен быть: твердым электроизоляционным (стеклопластик, гетинакс и т. п.) – для накладок, применяемых в электроустановках до 20 кВ включительно; гибким (диэлектрическая резина и т. п.) – для накладок, применяемых в электроустановках до 1000 В включительно для закрывания токоведущих частей при выполнении работ без снятия напряжения;
- конструкция и размеры накладок должны быть такими, чтобы токоведущие части закрывались ими полностью.

Изолирующие колпаки должны удовлетворять следующим требованиям:

- материал изолирующих колпаков должен иметь стойкие диэлектрические свойства (диэлектрическая резина, пластик, стеклопластик или другие подобные электроизоляционные материалы);
- конструкция колпаков должна предусматривать на торцевой стороне хомут для фиксации колпака на рабочей части оперативной штанги при его установке (снятии).

Переносные заземления. В электроустановках при выполнении работ на отключенных токоведущих частях для защиты работников от ошибочно поданного напряжения необходимо применять переносные заземления, состоящие из: штанги; проводников – для заземления и закорачивания между собой токоведущих частей всех фаз электроустановки; зажимов – для закрепления заземляющих проводников на токоведущих частях, а также наконечника или трубины – для присоединения к заземляющим проводникам или к конструкциям.

Благодаря защитным заземлениям на участке сети в случае его включения напряжение токоведущих частей относительно друг друга и земли окажется незначительным и, как правило, безопасным для человека, а короткое замыкание вызовет быстрое отключение установки.

Допускается использование переносного заземления без штанги. В этом случае изолирующий гибкий элемент заземления бесштанговой конструкции должен изготавливаться из синтетических материалов (капрона и т. п.). Провода для заземления и закорачивания должны изготавливаться из голых гибких медных жил и иметь поперечное сечение, удовлетворяющее требованиям термической стойкости при трехфазных коротких замыканиях, но не менее: -25 мм^2 – в электроустановках напряжением выше 1000 В; -16 мм^2 – в электроустановках напряжением до 1000 В. В электрических сетях с заземленной нейтралью поперечное сечение проводов должно удовлетворять требованиям термической стойкости в случае однофазного короткого замыкания.

Зажимы для присоединения закорачивающих проводов к шинам должны иметь такую конструкцию, чтобы, в случае протекания тока короткого замыкания, динамические силы не могли сорвать переносное заземление с места присоединения. Зажимы должны иметь устройство, обеспечивающее их наложение, надежное закрепление, а также удобное снятие с шин при помощи штанги для наложения заземления. Гибкий медный провод необходимо присоединять к зажиму непосредственно или с помощью надежно спрессованного медного наконечника. Для защиты провода от переламывания в местах присоединения рекомендуется помещать его в оболочку в виде пружин из гибкого стального провода. Для защиты жил провода от механических повреждений его разрешается помещать в прозрачную гибкую оболочку. Наконечник на проводе для заземления должен изготавливаться в виде трубины или специального зажима для присоединения к заземляющему проводу или конструкции.

На каждом переносном заземлении необходимо обозначить его номер и сечение заземляющих проводов. Эти данные необходимо выбивать на бирке, закрепленной на заземлении, или на трубине (наконечнике).

Наложение заземления на токоведущие части производится сразу после проверки отсутствия напряжения. Вначале присоединяется к земле заземляющий проводник, затем зажимы закорачивающих проводников накладываются на токоведущие части и закрепляются на них (штангой или руками в диэлектрических перчатках, в зависимости от напряжения). Снятие заземления производится в обратном порядке.

6.4. Вспомогательные защитные средства

Плакаты и знаки безопасности предназначены:- для запрещения действий с коммутационными аппаратами, при ошибочном включении которых может быть подано напряжение на место работы (запрещающие плакаты);- для предупреждения об опасности приближения к токоведущим частям, находящимся под напряжением, и передвижения без средств защиты в устройствах 330 кВ и выше с напряженностью электрического поля выше допустимой (предупреждающие знаки и плакаты);- для разрешения конкретных действий только при выполнении определенных требований безопасности (предписывающие плакаты);- для указания местонахождения различных объектов и устройств (указательный плакат). По характеру применения плакаты могут быть постоянными и переносными, а знаки – постоянными. Постоянные плакаты и знаки рекомендуется изготавливать из электроизоляционных материалов, а знаки на бетонные и металлические поверхности наносить красками с помощью трафаретов. Переносные плакаты следует изготавливать только из электроизоляционных

материалов. Применение постоянных плакатов и знаков из металла допускается только вдали от токоведущих частей.

Формы плакатов по электробезопасности, которые введены в Украине, представлены на рис.35.

Гибкие изолирующие лестницы предназначены для подъема электромонтера к токоведущим частям ВЛ. Тетивы лестниц изготавливаются из полипропиленового каната, а ступени - из стеклопластикового профиля. При работах на ВЛ 220 кВ и выше возможно применение лестниц, состоящих из нескольких секций. Соединение секций между собой, а также крепление лестниц к металлоконструкциям опор осуществляется с помощью специальных карабинов или цепной арматуры. Номинальная рабочая механическая нагрузка гибкой лестницы

1000 Н.

Жесткие изолирующие лестницы предназначены для подъема электромонтера к токоведущим частям ВЛ. Тетивы и ступени лестниц изготавливаются из стеклопластика различного профиля, но при этом для изготовления ступеней стеклопластик круглого профиля не применяется.

Лестница состоит из нескольких секций, верхняя секция снабжена специальной площадкой с поручнями и металлическими захватами в виде крюков. Секции лестницы соединены между собой узлами крепления, обеспечивающими необходимую прочность и жесткость лестниц. Для предотвращения расхождения тетив каждая секция снабжена двумя стеклопластиковыми болтами.

Изолирующие приставные лестницы и стремянки предназначены для проведения строительных, монтажных, ремонтных и эксплуатационных работ в электроустановках или электротехнологических установках. Тетивы и ступеньки лестниц и стремянок должны изготавливаться из стеклопластика электроизоляционного, поверхность которого должна быть покрыта атмосферостойкими электроизоляционными эмалью или лаком.



Рис.35. Формы плакатов по электробезопасности

Тетивы приставных лестниц и стремянок для обеспечения устойчивости должны расходиться книзу. Ширина приставной лестницы и стремянки сверху должна быть не менее 300 мм, внизу - не менее 400 мм. Общая длина одноколенной приставной лестницы не должна превышать 5 метров.

Каски предназначены для защиты головы работающего от механических повреждений, от воды и агрессивных жидкостей, а также от поражения электрическим током при случайном касании токоведущих частей, находящихся под напряжением до 1000 В. В зависимости от условий применения каска может комплектоваться утепленным подшлемником и водозащитной пелериной, противошумными наушниками, щитками для сварщиков, головными светильниками. Для изготовления касок должны применяться нетоксичные материалы, устойчивые к действию кислот, минеральных масел, бензина и дезинфицирующих средств.

Очки и щитки защитные предназначены для защиты глаз и лица от слепящего света электрической дуги, ультрафиолетового и инфракрасного излучения, твердых частиц и пыли, искр, брызг агрессивных жидкостей и расплавленного металла. Рекомендуется применять очки закрытого типа с непрямой вентиляцией и светофильтрами и щитки наголовные со светофильтрующим, ударостойким, химически стойким и сетчатым корпусом, а также наголовные, ручные и универсальные для сварщиков. Очки герметичные для защиты глаз от вредного воздействия различных газов, паров, дыма, брызг агрессивных жидкостей должны полностью изолировать подочковое пространство от окружающей среды и комплектоваться незапотевающей пленкой.

Конструкция щитков должна обеспечивать как надежную фиксацию стекол в стеклодержателе, так и возможность их замены без применения специального инструмента. Корпуса щитков для сварщиков должны быть непрозрачными и выполнены из нетокопроводящего материала, стойкого к искрам и брызгам расплавленного металла. На корпусе крепится стеклодержатель со светофильтрами. Рукавицы предназначены для защиты рук работающего от механических травм, повышенных и пониженных температур, от искр и брызг расплавленного металла, масел, мастик, воды, агрессивных жидкостей. Рукавицы могут иметь специальное назначение, например, для работы с кислотами и щелочами, с нагретыми поверхностями, специальные рукавицы для сварщиков и т.п. Рукавицы могут быть с усилительными защитными накладками, обычной длины или удлиненные с крагами. Длина рукавиц обычно не превышает 300 мм, а длина рукавиц с крагами должна быть не менее 420 мм. Комплекты для защиты от электрической дуги предназначены для защиты тела работающего от воздействия электрической дуги, которая может возникнуть при оперативных переключениях в действующих электроустановках всех классов напряжений. Комплекты для защиты от электрической дуги. В комплект входят каска термостойкая с защитным экраном для лица, подшлемник термостойкий, перчатки термостойкие. В комплект дополнительно могут входить белье нательное хлопчатобумажное или термостойкое и дополнительная куртка-накидка. Набор компонентов комплекта определяется в зависимости от конкретных условий эксплуатации: значения тока короткого замыкания, напряжения электроустановки, времени воздействия дуги, расстояния до источника дуги, расстояния между электродами, вида распределительного устройства.

Термостойкие перчатки надеваются под диэлектрические. Зимний костюм можно надевать поверх летнего для усиления защитных свойств.

Список использованной литературы

1. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 424 с.
2. Долин П.А. Справочник по технике безопасности. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 823 с.
3. Дулицкий Г.А., Комаревцев А.П. Электробезопасность при эксплуатации электроустановок напряжением до 1000 В. – М.: Военное издательство, 1988. – 128 с.
4. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 640 с.
5. Дьяков В.И. Безопасность жизнедеятельности. – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т, 2000. – 88 с.
6. Правила эксплуатации электрозащитных средств. ДНАОП 1.1.10-1.07.01. Україна.
7. Манойлов В.Е. Основы электробезопасности. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 384 с.

8. Князевский Б.А. Охрана труда в электроустановках.- М.: Энергоатомиздат, 1983. – 336 с.
9. Охрана труда / Под ред. А.Б. Князевского. - М.: Высш. школа, 1982. – 311 с.
10. Кобевник В.Ф. Охрана труда. - К.: Выща шк., 1990. – 286 с.

Содержание

Предисловие	3
Введение	4
Глава 1. Воздействие электрического тока на человека	6
1.1. Виды воздействия	6
1.2. Электротравмы	7
1.2.1. Местные электротравмы	7
1.2.2. Электрический удар	9
1.3. Факторы, влияющие на исход поражения электрическим током	10
1.3.1. Характерные значения тока	10
1.3.2. Длительность прохождения тока	12
1.3.3. Влияние пути тока	13
1.3.4. Частота и род тока	13
1.4. Электрическое сопротивление тела человека	14
1.4.1. Электрическое сопротивление различных тканей	14
1.4.2. Зависимость сопротивления тела человека от различных факторов	17
Глава 2. Опасность поражения человека электротоком в различных электрических сетях	19
2.1. Возможные случаи поражения человека током	19
2.2. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, протекающих через человека	20
2.3. Опасность однофазных двухпроводных электрических цепей.	22
2.3.1. Электрические сети с заземленным проводом	22
2.3.2. Электрические сети с изолированными от земли проводами	24
2.4. Анализ опасности в трехфазных сетях	25
2.4.1. Общие сведения о трехфазных системах	25
2.4.2. Трехфазная четырехпроводная сеть с нейтралью, заземленной через активное и индуктивное сопротивления	27
2.4.3. Трехфазная четырехпроводная сеть с глухозаземленной нейтралью	29
2.4.4. Трехфазная трехпроводная сеть с изолированной нейтралью	29
2.4.5. Выбор схемы сети и режима нейтрали	31
Глава 3. Защитное заземление	33
3.1. Заземление и принцип его действия	33
3.2. Потенциал заземлителя	35
3.3. Сопротивление заземлителя растеканию тока	37
3.3.1. Влияние свойств грунта на его удельное сопротивление	37
3.3.2. Измерение сопротивления заземлителя	39
3.4. Типы заземляющих устройств	40
3.5. Выполнение заземляющих устройств	41

Глава 4. Зануление	43
4.1. Назначение элементов схемы зануления	44
4.1.1. Назначение нулевого проводника	44
4.1.2. Назначение заземления нейтрали	44
4.1.3. Назначение повторного заземления проводника	45
4.2. Расчет зануления	47
4.2.1. Расчет на отключающую способность	47
4.2.2. Расчет сопротивления заземления нейтрали	48
4.2.3. Расчет сопротивления повторного заземления	48
Глава 5. Защитное отключение	49
5.1. Общие сведения об устройствах защитного отключения	49
5.2. Устройства, реагирующие на напряжение корпуса относительно земли	50
5.3. Устройства, реагирующие на дифференциальный ток	50
Глава 6. Защитные средства, применяемые в электроустановках	53
6.1. Общая характеристика защитных средств	53
6.2. Изолирующие средства	54
6.3. Ограждающие защитные средства	64
6.4. Вспомогательные защитные средства	66
Список использованной литературы	71

Навчальне видання

Цимбал Анатолій Михайлович

Електробезпека

*Навчальний посібник
для студентів фізичних спеціальностей*

Російською мовою

610077, Харків, майдан Свободи, 4, Харківський національний університет
імені В.Н. Каразіна

Підписано до друку 23.05.05. Формат 60х84/16. Папір офсетний. Друк ризографічний.
Обл.-вид. арк. . Умов.-друк. арк. Наклад прим. Ціна договірна.

Надруковано ПП Азамасв В.Р.
61114, м. Харків, вул. Героїв праці, 17