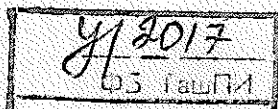


П. А. Долин

ОСНОВЫ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ В ЭЛЕКТРО- УСТАНОВКАХ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ
И ДОПОЛНЕННОЕ

Допущено Министерством высшего
и среднего специального образова-
ния СССР в качестве учебного посо-
бия для студентов энергетических
специальностей вузов



Москва · Энергоатомиздат · 1984

ББК 31.29

Д64

УДК 658.382.3:621.31(075.8)

Рецензент канд. техн. наук Ю. Г. Сибаров

Долин П. А.

Д 64 Основы техники безопасности в электроустановках:
Учеб. пособие для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.:
Энергоатомиздат, 1984. — 448 с., ил.

В пер.: 1 р. 150 000 экз.

Рассматриваются действие тока на человека, способы оказания доврачебной помощи пострадавшим от тока, требования к основным устройствам защиты от поражения током; излагаются вопросы организации безопасной эксплуатации электроустановок. Первое издание вышло в 1979 г. Второе издание переработано и дополнено новыми материалами по защите от поражения током и безопасной эксплуатации электроустановок.

Для студентов электроэнергетических специальностей вузов. Может быть полезна специалистам промышленных предприятий.

Д — 2302050000-046 149-84
051(01)-84

ББК 31.29

6П2.1.064

© «Энергия», 1979

© Энергоатомиздат, 1984

ПРЕДИСЛОВИЕ

Широкое использование электроэнергии во всех отраслях народного хозяйства, в том числе в сельском хозяйстве, привело к значительному расширению круга лиц, связанных с эксплуатацией электрооборудования.

В связи с этим вопросы безопасности труда при эксплуатации электрооборудования приобретают особое значение. Обеспечению безопасных условий труда на производстве в СССР уделяется большое внимание. Проблемы повышения электробезопасности решаются повседневным улучшением условий труда, совершенствованием мер защиты персонала и других лиц, занимающихся эксплуатацией электроустановок, от опасности поражения током. Создаются новые средства защиты с учетом достижений в области электробезопасности.

Советское правительство ассигнует большие средства и материальные ресурсы на мероприятия по улучшению условий труда. В результате уровень травматизма в нашей стране, в том числе электротравматизма, ниже, чем в зарубежных странах, и из года в год понижается.

Анализ несчастных случаев в промышленности, сопровождающихся временной утратой трудоспособности пострадавшими, показывает, что количество травм, вызванных электрическим током, сравнительно невелико и составляет 0,5–1% общего количества несчастных случаев на производстве. В электроэнергетике, где большая часть работающих связана с эксплуатацией электрооборудования, удельный вес электротравм в общем количестве несчастных случаев несколько выше – 3–3,5%, но также невелик.

Совершенно иная картина будет, если рассматривать только смертельные несчастные случаи. Оказывается, из общего количества несчастных случаев со смертельным исходом на производстве 20–40% (а в энергетике до 60%) происходит в результате поражения электрическим током, что, как правило, больше, чем по какой-либо иной причине, причем 75–80% смертельных поражений током происходит в электроустанов-

ках напряжением до 1000 В. Последнее обстоятельство объясняется очень большим распространением таких электроустановок и тем, что с ними имеют дело практически все лица, работающие на производстве, в то время как электроустановки напряжением выше 1000 В обслуживает сравнительно малочисленный высококвалифицированный персонал.

Приведенное соотношение характерно для большинства стран мира, хотя абсолютное количество несчастных случаев в разных странах различно.

Большой вклад в изучение сложнейших явлений воздействия электрического тока на организм человека внесли советские ученые — физиологи и электротехники Н. Л. Гурвич, А. П. Киселев, В. Е. Манойлов, И. Р. Петров, Ю. Г. Сибаров, Г. С. Солодовников, В. Я. Табак, В. И. Щуцкий и др.

В создании новых и совершенствовании существующих принципов и устройств защиты от поражения электрическим током, а также разработке правил, норм и стандартов в области электробезопасности огромную роль сыграли ученые Л. В. Гладилин, П. Г. Грудинский, А. М. Каландадзе, Б. А. Князевский, Б. И. Косарев, С. И. Коструба, Б. Г. Меньшов, Л. О. Петри, А. И. Ревякин, Н. П. Симочатов, Н. В. Шипунов, Б. М. Ягудаев, А. И. Якобс, а также инженеры Р. А. Гаджиев, Л. И. Вайнштейн, И. А. Серебрянников, М. Д. Столяров и др.

При подготовке настоящего, второго издания книги были использованы новые стандарты, правила и другие литературные источники, а также материалы исследований, выполненных при участии автора. Внесены изменения и дополнения, учитывающие достижения в области электробезопасности, требования системы стандартов по безопасности труда, «Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок» (1982 г.), «Правил устройства электроустановок» (1976—1982 гг.).

Первая глава книги посвящена анализу действия электрического тока на человека (виды поражений током, сопротивление тела человека, влияние различных факторов на исход поражения током).

Во второй главе рассмотрены меры по оказанию доврачебной помощи человеку, подвергнутому воздействию тока.

В третьей и четвертой главах описаны явления при стекании тока в землю и опасности поражения током в электрических сетях.

Главы пятая, шестая, седьмая посвящены соответственно защитным заземлениям, занулению, защитным отключениям.

Показаны их назначение, принципы действия, область применения, типы и способы выполнения.

В восьмой — двенадцатой главах рассматриваются средства защиты от поражения током, меры защиты от вредного воздействия на человека электромагнитного поля промышленной частоты в электроустановках сверхвысокого напряжения, способы обеспечения безопасности при ремонтных работах на линиях электропередачи под напряжением, описана организация безопасной эксплуатации электроустановок.

Книга соответствует «Типовой программе курса «Охрана труда» для электроэнергетических специальностей».

Книга предназначена для студентов электроэнергетических специальностей вузов в качестве учебного пособия курса «Охрана труда». Она может быть полезна инженерно-техническим работникам промышленных предприятий и проектных организаций, а также аспирантам, работающим в области электробезопасности.

Автор признателен рецензенту канд. техн. наук, доц. Ю. Г. Сибарову за большую работу, проделанную при подготовке рукописи к печати.

Все пожелания и замечания просьба посылать по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

Автор

Глава 1

ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

1.1. ВИДЫ ПОРАЖЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

а) Особенности действия тока на живую ткань

Действие электрического тока на живую ткань в отличие от действия других материальных факторов (пара, химических веществ, излучения и т. п.) носит своеобразный и разносторонний характер. В самом деле, проходя через организм человека, электрический ток производит термическое, электрическое и механическое (динамическое) действия, являющиеся обычными физико-химическими процессами, присущими как живой, так и неживой материи; одновременно электрический ток производит и биологическое действие, которое является специфическим процессом, свойственным лишь живой ткани.

Термическое действие тока проявляется в ожогах отдельных участков тела, нагреве до высокой температуры кровеносных сосудов, нервов, сердца, мозга и других органов, находящихся на пути тока, что вызывает в них серьезные функциональные расстройства.

Электролитическое действие тока выражается в разложении органической жидкости, в том числе и крови, что сопровождается значительными нарушениями их физико-химического состава.

Механическое (динамическое) действие тока выражается в расслоении, разрыве и других подобных повреждениях различных тканей организма, в том числе мышечной ткани, стенок кровеносных сосудов, сосудов легочной ткани и др., в результате электродинамического эффекта, а также мгновенного взрывоподобного образования пара от перегретой током тканевой жидкости и крови.

Биологическое действие тока проявляется в раздражении и возбуждении живых тканей организма, а также

в нарушении внутренних биоэлектрических процессов, протекающих в нормально действующем организме и теснейшим образом связанных с его жизненными функциями.

Электрический ток, проходя через организм, раздражает живые ткани, вызывая в них ответную реакцию — возбуждение, являющееся одним из основных физиологических процессов и характеризующееся тем, что живые образования переходят из состояния относительного физиологического покоя в состояние специфической для них деятельности.

Так, если электрический ток проходит непосредственно через мышечную ткань, то возбуждение, обусловленное раздражающим действием тока, проявляется в виде непроизвольного сокращения мышц. Это так называемое прямое, или непосредственное, раздражающее действие тока на ткани, по которым он проходит.

Однако действие тока может быть не только прямым, но и рефлекторным, т. е. через центральную нервную систему. Иначе говоря, ток может вызывать возбуждение и тех тканей, которые не находятся на его пути. Дело в том, что электрический ток, проходя через тело человека, 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 к возбуждению находящихся 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 (т. е. в спинной и головной мозг).

Центральная нервная система перерабатывает нервный импульс и передает его подобно исполнительной команде к рабочим органам — мышцам, железам, сосудам, которые могут находиться вне зоны прохождения тока.

При обычных, естественных раздражениях рецепторов центральная нервная система обеспечивает целесообразную ответную деятельность соответствующих органов тела. Например, при случайном прикосновении к горячему предмету человек непроизвольно отдернет от него руку, чем избавится от опасного воздействия. В случае же чрезмерного или необычного для организма раздражающего действия, например 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, даже если эти органы не лежат на пути тока. Правда, подобное явление бывает редко.

Как известно, в живой ткани, и в первую очередь в мышцах, в том числе и сердечной мышце, а также в центральной и периферической нервной системе постоянно возникают электрические потенциалы — биопотенциалы, которые связаны с возникновением и распространением

процесса возбуждения, т. е. с переходом живой ткани в состояние активной деятельности.

Внешний ток, взаимодействуя с биотоками, значения которых весьма малы, может нарушить нормальный характер их воздействия на ткани и органы человека, подавить биотоки и тем самым вызвать специфические расстройства в организме вплоть до его гибели.

Два вида электрических травм. Указанное многообразие действий электрического тока на организм нередко приводит к различным электротравмам*, которые условно можно свести к двум видам: местным электротравмам, когда возникает местное повреждение организма, и общим электротравмам, так называемым электрическим ударам, когда поражается (или создается угроза поражения) весь организм из-за нарушения нормальной деятельности жизненно важных органов и систем.

Примерное распределение несчастных случаев от электрического тока в промышленности по указанным видам травм: 20% — местные электротравмы; 25% — электрические удары; 55% — смешанные травмы, т. е. одновременно местные электротравмы и удары**.

Оба вида травм часто сопутствуют друг другу. Тем не менее они различны и должны рассматриваться отдельно.

б) Местные электротравмы

Местная электротравма — ярко выраженное местное нарушение целостности тканей тела, в том числе костных тканей, вызванное воздействием электрического тока или электрической дуги. Чаще всего это поверхностные повреждения, т. е. поражения кожи, а иногда других мягких тканей, а также связок и костей.

Опасность местных травм и сложность их лечения зависят от места, характера и степени повреждения тканей, а также от реакции организма на это повреждение. Как правило, местные травмы излечиваются и работоспособность по-

* Электротравма — травма, вызванная воздействием электрического тока или электрической дуги. Травма в переводе с греческого — повреждение, рана.

** В данном случае за 100% приняты лишь те случаи поражения электрическим током, которые подлежат официальному учету, т. е. вызвавшие утрату трудоспособности более чем на 3 рабочих дня, а также приведшие к инвалидности или смертельному исходу.

страдавшего восстанавливается полностью или частично. В редких случаях (обычно при тяжелых ожогах) человек погибает. При этом непосредственной причиной смерти является не электрический ток, а местное повреждение организма, вызванное током.

Характерные местные электротравмы — электрические ожоги, электрические знаки, металлизация кожи, механические повреждения и электроофтальмия.

Как указывалось, примерно 75% случаев поражения людей током сопровождается возникновением местных электротравм. По видам травм эти случаи распределяются следующим образом, %:

Электрические ожоги	40
Электрические знаки	7
Металлизация кожи	3
Механические повреждения	0,5
Электроофтальмия	1,5
Смешанные травмы, т. е. ожоги с другими местными травмами	23
Всего	75

Электрический ожог — самая распространенная электротравма: ожоги возникают у большей части (63%) пострадавших от электрического тока, причем треть их (23%) сопровождается другими травмами — знаками, металлизацией кожи и офтальмией.

Около 85% всех электрических ожогов приходится на электромонтеров, обслуживающих действующие электроустановки.

В зависимости от условий возникновения различают два основных вида ожога: токовый (или контактный), возникающий при прохождении тока непосредственно через тело человека в результате его контакта с токоведущей частью, и дуговой, обусловленный воздействием на тело человека электрической дуги.

Токовый (контактный) ожог возникает в электроустановках относительно небольшого напряжения — не выше 2 кВ. При более высоких напряжениях, как правило, образуется электрическая дуга или искра, которые и обуславливают возникновение ожога другого вида — дугового.

Контактный ожог участка тела является следствием преобразования энергии электрического тока, проходящего через него, в тепловую. Поэтому такой ожог тем опаснее, чем больше ток, время его прохождения и электрическое сопротивление участка тела, подвергшегося

воздействию тока. Поскольку при таких ожогах напряжение, приложенное к телу человека, сравнительно невелико, ток, проходящий через человека, также невелик: доли ампера или в худшем случае несколько ампер. Однако в месте контакта тела с токоведущей частью плотность тока может достигать больших значений, так как площадь соприкосновения тела с токоведущей частью обычно невелика. Здесь же ток встречает и наибольшее сопротивление, а именно сопротивление кожи, которое во много раз больше сопротивления внутренних тканей. Поэтому максимальное количество теплоты выделяется в месте контакта проводника с кожей, а точнее, в том участке кожи, который находится в контакте с токоведущей частью.

Этим и объясняется, что токовый ожог является, как правило, ожогом кожи. Лишь в редких случаях, когда через тело человека проходит большой ток, при контактом ожоге могут быть поражены и подкожные ткани. Кроме того, тяжелые повреждения внутренних тканей могут возникнуть при контактных ожогах, вызванных токами высокой частоты. При этом кожа может иметь незначительные повреждения.

Токовые ожоги образуются примерно у 38% пострадавших от электрического тока, в большинстве случаев они являются ожогами I и II степеней; при напряжениях выше 380 В возникают и более тяжелые ожоги — III и IV степеней*.

На рис. 1.1 показан тяжелый токовый ожог пальцев и ладони правой руки человека, взявшегося за оголенный шнур квартирной проводки 220 В. При этом пострадавший коснулся обоих проводов шнура: одного — пальцами, а другого — участком ладони вблизи большого пальца.

Дуговой ожог наблюдается в электроустановках различных напряжений. При этом в установках до 6 кВ ожоги являются следствием случайных коротких замыканий, например при работах под напряжением на щитах и сборках до 1000 В, измерениях переносными приборами (электроизмерительными клещами) в установках выше 1000 В (до 6 кВ) и т. п.

В качестве примера можно привести следующий случай. При ремонте щита 380 В под напряжением электромонтер, стоя на деревянном полу, случайно замкнул проводом ножи рубильника. Возникшая электрическая дуга вызвала ожоги I и II степеней лица, шеи и правой руки монтера (рис. 1.2). При этом ток через него не проходил. Ожоги предплечья и плеча возникли от загоревшейся одежды.

* Различают следующие четыре степени ожогов: I — покраснение кожи; II — образование пузырей; III — омертвление всей толщи кожи и IV — обугливание тканей. Обычно тяжесть повреждения организма при ожогах обуславливается не степенью ожога, а площадью поверхности тела, пораженной ожогом.

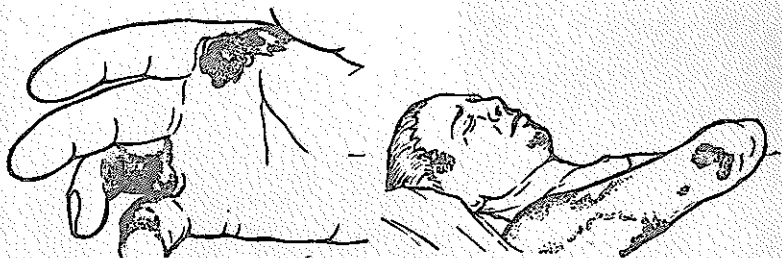
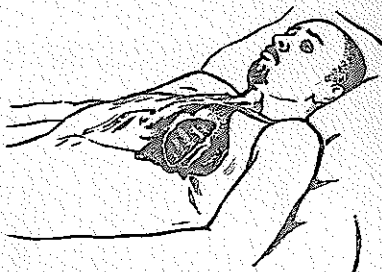


Рис. 1.1. Контактный ожог IV степени переменным током 220 В

Рис. 1.2. Дуговой ожог лица, шеи и руки I и II степеней в результате короткого замыкания между ножами рубильника 380 В

Рис. 1.3. Тяжелый ожог грудной клетки в результате включения пострадавшего в цепь тока через электрическую дугу



В установках более высоких напряжений дуга возникает при случайном приближении человека к токоведущим частям, находящимся под напряжением, на расстояние, при котором происходит пробой воздушного промежутка между ними; при повреждении изолирующих защитных средств (штанг, указателей напряжения и т. п.), которыми человек касается токоведущих частей, находящихся под напряжением; при ошибочных операциях с коммутационными аппаратами (например, при отключении разъединителя под нагрузкой с помощью штанги), когда дуга нередко перебрасывается на человека, и т. п. Во всех этих случаях возникает мощная дуга, вызывающая обширные ожоги на теле человека и обуславливающая прохождение через него больших токов — в несколько ампер и даже десятки ампер. Понятно, что в этих случаях поражения носят тяжелый характер и оканчиваются, как правило, смертью пострадавшего, причем тяжесть поражения возрастает обычно с увеличением напряжения электроустановки.

Электрическая дуга может вызвать обширные ожоги тела, выгорание тканей на большую глубину, обугливание и даже бесследное сгорание больших участков тела или конечностей.

Большой ток, проходящий через человека, вызывает тяжелые ожоги в месте входа и выхода. Ткани тела, находящиеся на пути тока, претерпевают серьезные изменения, а в случае большого количества теплоты, выделяющейся в них, высушиваются и обугливаются.

Вместе с тем большой ток, проходящий через человека, обычно не вызывает фибрилляции сердца. Объяснения этого парадоксального явления еще не найдено. Смерть в таких случаях наступает, как правило, от паралича дыхания или в результате обширных ожогов поверхности тела человека.

На рис. 1.3 показан тяжелый случай дугового ожога, вызвавшего сквозной дефект грудной клетки и сопровождавшегося прохождением тока непосредственно через сердце. Длительное и сложное лечение пострадавшего окончилось его выздоровлением.

Из общего числа учитываемых несчастных случаев от воздействия электрического тока дуговые ожоги составляют примерно 25%.

Электрические знаки, именуемые также знаками тока или электрическими метками, представляют собой резко очерченные пятна серого или бледно-желтого цвета на поверхности тела человека, подвергшегося действию тока. Обычно знаки имеют круглую или овальную форму и размеры 1–5 мм с углублением в центре (рис. 1.4). Встречаются знаки и в виде царапин, небольших ран, бородавок, кровоизлияний в кожу, мозолей и мелкоточечной татуировки. Иногда форма знака соответствует форме участка токоведущей части, которого коснулся пострадавший, а при воздействии грозового разряда — напоминает фигуру молнии (рис. 1.5).

Пораженный участок кожи затвердевает подобно мозоли. Происходит как бы омертвление верхнего слоя кожи. Поверхность знака сухая, не воспалена.

Обычно электрические знаки безболезненны и лечение их заканчивается благополучно: с течением времени верхний слой кожи сходит и пораженное место приобретает первоначальный цвет, эластичность и чувствительность. Эти знаки появляются примерно у 11% пострадавших от тока.

Металлизация кожи — проникновение в верхние слои кожи мельчайших частичек металла, расплавившегося под действием электрической дуги. Такое явление встречается при коротких замыканиях, отключениях разъединителей и рубильников под нагрузкой и т. п. При этом мельчайшие брызги расплавленного металла под влиянием возникших динамических сил и теплового потока разлетаются во все стороны с большой скоростью. Каждая из этих частичек имеет высокую температуру, но

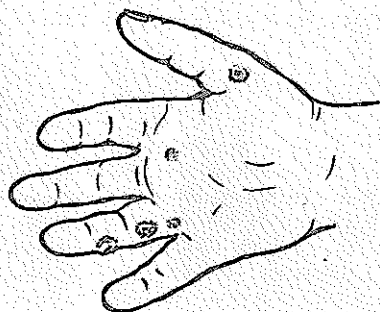


Рис. 1.4. Типичные электрические знаки



Рис. 1.5. Электрический знак, возникший при поражении человека молнией

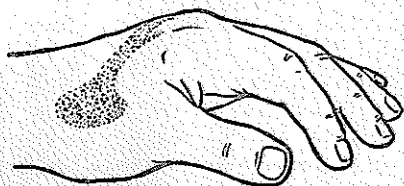


Рис. 1.6. Металлизация кожи

малый запас теплоты и, как правило, не способна прожечь одежду. Поэтому поражаются обычно открытые части тела — руки и лицо (рис. 1.6). Пораженный участок кожи имеет шероховатую поверхность. Пострадавший ощущает на пораженном участке боль от ожогов под действием теплоты занесенного в кожу металла и испытывает напряжение кожи от присутствия в ней инородного тела.

Обычно с течением времени больная кожа сходит, пораженный участок приобретает нормальный вид и эластичность, исчезают и все болезненные ощущения, связанные с этой травмой. Лишь при поражении глаз лечение может оказаться длительным и сложным, а в некоторых случаях и безрезультатным, т. е. пострадавший может лишиться зрения. Поэтому работы, при которых возможно возникновение электрической дуги (например, работы под напряжением на щитах и сборках, при снятии и установке предохранителей и т. п.), должны выполняться в защитных очках. Вместе с тем одежда работающего должна быть застегнута на все пуговицы, ворот закрыт, а рукава опущены и застегнуты у запястьев рук.

Металлизация кожи наблюдается у 10% пострадавших от электрического тока. В большинстве случаев одновременно

с металлизацией возникает дуговой ожог, который почти всегда вызывает более тяжелые поражения, чем металлизация.

При постоянном токе металлизация кожи возможна и в результате электролиза, который возникает при плотном и относительно длительном контакте тела с токоведущей частью, находящейся под напряжением. В этом случае частички металла заносятся в кожу электрическим током, который одновременно разлагает органическую жидкость в тканях, образуя в ней основные и кислотные ионы. Металл, соединяясь с кислотными ионами, образует соответствующие соли, которые придают пораженному участку кожи специфическую окраску. Так, зеленый цвет свидетельствует о том, что в кожу занесена красная медь, сине-зеленый — латунь, а серо-желтый — свинец. Этот вид металлизации излечивается успешно.

Механические повреждения являются в большинстве случаев следствием резких непроизвольных судорожных сокращений мышц под действием тока, проходящего через тело человека. В результате могут произойти разрывы сухожилий, кожи, кровеносных сосудов и нервной ткани; могут иметь место вывихи суставов и даже переломы костей. Разумеется, электротравмами не считаются аналогичные травмы, вызванные падением человека с высоты, ушибами о предметы и т. п. в результате воздействия тока.

Механические повреждения происходят при работе в основном в установках до 1000 В при относительно длительном нахождении человека под напряжением. Это, как правило, серьезные травмы, требующие длительного лечения. К счастью, механические повреждения возникают довольно редко — примерно у 1,0% лиц, пострадавших от тока. Такие повреждения всегда сопутствуют электрическим ударам, поскольку их вызывает ток, проходящий через тело человека. Некоторые из них сопровождаются, кроме того, контактными ожогами тела.

В качестве примера можно привести следующий случай.

При монтаже подстанции рабочий взял рукой за смонтированную шину, идущую по стене сверху вниз и оказавшуюся под напряжением 220 В относительно земли в результате случайного контакта с временной электропроводкой. Рабочий, испытывая сильные судорожные сокращения мышц, сознания не потерял, но не мог разжать руку и позвать на помощь. Под действием тока он пробыл несколько секунд, пока его не освободили товарищи по работе, увидевшие, что он сидит на корточках в неудобном положении и держится вытянутой рукой за шину.

Медицинское обследование пострадавшего, который жаловался на боли в плече, показало, что у него произошел вывих плеча и перелом шейки лопатки руки. Кроме того, у пострадавшего, как и у большин-

ства лиц, подвергшихся воздействию тока, были отмечены различные расстройства в организме, в том числе сердечно-сосудистой системы. Этому больному потребовалось длительное и сложное лечение.

Электроофтальмия* — воспаление наружных оболочек глаз — роговицы и конъюнктивы (слизистой оболочки, покрывающей глазное яблоко), возникающее в результате воздействия мощного потока ультрафиолетовых лучей, которые энергично поглощаются клетками организма и вызывают в них химические изменения. Такое облучение возможно при наличии электрической дуги, которая является источником интенсивного излучения не только видимого света, но и ультрафиолетовых и инфракрасных лучей. Электроофтальмия наблюдается примерно у 3% пострадавших от тока.

Инфракрасные (тепловые) лучи также вредны для глаз, но лишь на близком расстоянии или при интенсивном и длительном облучении. В случае же кратковременной дуги основным фактором, действующим на глаза, являются ультрафиолетовые лучи, хотя и в этом случае не исключена опасность поражения глаз инфракрасными лучами, а также мощным потоком света и брызгами расплавленного металла.

Электроофтальмия развивается через 4–8 ч после ультрафиолетового облучения. При этом имеют место покраснение и воспаление кожи и слизистых оболочек век, слезотечение, гнойные выделения из глаз, спазмы век и частичная потеря зрения. Пострадавший испытывает головную боль и резкую боль в глазах, усиливающуюся на свету, т. е. у него возникает так называемая светобоязнь. В тяжелых случаях нарушается прозрачность роговой оболочки, сужается зрачок.

Обычно болезнь продолжается несколько дней. В случае поражения роговой оболочки лечение оказывается более сложным и длительным.

Предупреждение электроофтальмии при обслуживании электроустановок обеспечивается применением защитных очков с обычными стеклами, которые почти не пропускают ультрафиолетовых лучей и одновременно защищают глаза от инфракрасного облучения и брызг расплавленного металла при возникновении электрической дуги.

в) Электрический удар

Под электрическим ударом следует понимать возбуждение живых тканей организма протекающим через него электрическим током, проявляющееся в непроизвольных судорожных сокращениях различных мышц тела.

* От греческого *ophthalmós* — глаз.

Электрический удар является следствием протекания тока через тело человека; при этом под угрозой поражения оказывается весь организм из-за нарушения нормальной работы различных его органов и систем, в том числе сердца, легких, центральной нервной системы и пр.

Степень отрицательного воздействия на организм электрических ударов различна. Самый слабый электрический удар вызывает едва ощутимое сокращение мышц вблизи места входа или выхода тока; в худшем случае он приводит к нарушению и даже полному прекращению деятельности легких и сердца, т. е. к гибели организма. При этом внешних местных повреждений человек может и не иметь.

В зависимости от исхода поражения электрические удары можно условно разделить на следующие пять степеней:

I — судорожное едва ощутимое сокращение мышц;

II — судорожное сокращение мышц, сопровождающееся сильными, едва переносимыми болями, без потери сознания;

III — судорожное сокращение мышц с потерей сознания, но с сохранившимся дыханием и работой сердца;

IV — потеря сознания и нарушение сердечной деятельности или дыхания (или того и другого вместе);

V — клиническая смерть, т. е. отсутствие дыхания и кровообращения.

Исход воздействия электрического тока на организм человека зависит от ряда факторов, в том числе от значения и длительности прохождения тока через его тело, рода и частоты тока, а также от индивидуальных свойств человека. Роль этих факторов рассматривается в следующих параграфах. Сопротивление тела человека и приложенное к нему напряжение также влияют на исход поражения, но лишь постольку, поскольку они определяют значение тока, проходящего через человека.

Электрический удар, даже если он не приводит к смерти, может вызвать серьезные расстройства в организме, которые проявляются сразу после воздействия тока или через несколько часов, дней и даже месяцев.

Так, в результате электрического удара, т. е. прохождения тока через тело человека, сопровождающегося непроизвольными судорожными сокращениями мышц, могут возникнуть или обостриться сердечно-сосудистые заболевания — аритмия сердца, стенокардия, повышение или понижение артериального давления и др., а также нервные болезни — невроз, эндокринные нарушения и пр. Нередко у пострадавших

появляется рассеянность, ослабевают память и внимание. Если подобных ярко выраженных заболеваний не наступает, то и в этом случае считается, что электрический удар резко ослабляет сопротивляемость организма к болезням, в первую очередь к сердечно-сосудистым и нервным, которые могут возникнуть у человека впоследствии по другим причинам.

Электрическим ударам подвергается обычно более 80% пострадавших от тока из числа учитываемых случаев поражения током (т. е. с утратой трудоспособности более 3 дней). При этом большая часть их (55%) сопровождается местными электротравмами, в первую очередь ожогами. Около 25% случаев поражения током — это удары без местных травм, хотя на теле пострадавших можно обнаружить места входа и выхода тока — весьма незначительные участки поврежденной кожи, которые за их малостью травмами не считаются.

Электрические удары являются грозной опасностью для жизни пострадавшего: они вызывают 85–87% смертельных поражений (считая за 100% все случаи со смертельным исходом от действия тока). Правда, большая часть смертельных случаев (60–62%) является результатом смешанных поражений, т. е. одновременного действия электрических ударов и местных электротравм (ожогов), однако и в этих случаях смертельный исход является, как правило, следствием электрического удара.

г) Механизм смерти от электрического тока

Смерть — это полная утрата взаимосвязи организма с окружающей средой: прекращение основных физиологических процессов — сознания, дыхания и сердцебиения, отсутствие реакций на внешние раздражители и т. п.

В более широком смысле смерть — необратимое прекращение обмена веществ в организме, сопровождающееся разложением белковых тел.

Различают два основных этапа смерти: клиническую и биологическую смерть.

Клиническая (или «минимая») смерть — кратковременное переходное состояние от жизни к смерти, наступающее с момента прекращения деятельности сердца и легких.

У человека, находящегося в состоянии клинической смерти, отсутствуют все признаки жизни: он не дышит, сердце его не работает, болевые раздражения не вызывают у него никаких реакций, зрачки глаз резко расширены и не реагируют на свет.

Однако в этот период жизнь в организме еще полностью не угасла, ибо ткани его не сразу подвергаются распаду и в известной степени сохраняют жизнеспособность.

Функции различных органов также угасают постепенно. В первый момент почти во всех тканях и клетках продолжают-ся обменные процессы, хотя и на очень низком уровне и резко отличающиеся от обычных, но достаточные для поддержания минимальной жизнедеятельности. Эти обстоятельства позволяют, воздействуя на более стойкие жизненные функции организма, восстановить угасающие или только что угасшие функции, т. е. оживить умирающий организм.

Первыми начинают погибать очень чувствительные к кислородному голоданию клетки коры головного мозга (нейроны), с деятельностью которых связаны сознание и мышление. В последующие моменты происходит множественный распад этих клеток, что приводит к необратимому разрушению коры головного мозга и практически исключает возможность оживления организма. Если даже при этом удастся восстановить у пострадавшего дыхание и сердечную деятельность, все-таки через некоторое время он, как правило, погибает или становится психически неполноценным.

Длительность клинической смерти определяется временем с момента прекращения сердечной деятельности и дыхания до начала гибели клеток коры головного мозга; в большинстве случаев она составляет 4–6 мин. При гибели здорового человека от случайной причины, например от электрического тока, длительность клинической смерти может достигать 7–8 мин, а в случае смерти человека в результате тяжелых болезней сердца, легких и т. п. (т. е. когда организм исчерпал значительную часть своих жизненных сил в борьбе с болезнью) клиническая смерть может длиться лишь несколько секунд. Однако если в этот период начать оказывать пострадавшему соответствующую помощь, т. е. путем искусственного дыхания обеспечить обогащение его крови кислородом, а путем массажа сердца наладить в организме искусственное кровообращение и тем самым снабжение клеток организма кислородом, то развитие смерти может быть приостановлено и жизнь сохранена.

Биологическая (или истинная) смерть — необратимое явление, характеризующееся прекращением биологических процессов в клетках и тканях и распадом белковых структур. Она наступает по истечении периода клинической смерти.

Причинами смерти от электрического тока могут быть прекращение работы сердца, остановка дыхания и электрический шок. Возможно также одновременное действие двух или даже всех трех этих причин.

Прекращение сердечной деятельности от электрического тока наиболее опасно, поскольку возвращение пострадавшего к жизни в этом случае оказывается, как правило, более сложной задачей, чем при остановке дыхания или шоке.

Воздействие тока на мышцу сердца может быть прямым, когда ток проходит непосредственно в области сердца, и рефлекторным, т. е. через центральную нервную систему, когда путь тока лежит вне этой области. В обоих случаях может произойти остановка сердца, а также возникнуть его фибрилляция. Фибрилляция может быть и результатом рефлекторного спазма артерий, питающих сердце кровью. При поражении током фибрилляция сердца наступает значительно чаще, чем полная его остановка.

Фибрилляция сердца — хаотические разновременные сокращения волокон сердечной мышцы (фибрилл), при которых сердце не в состоянии гнать кровь по сосудам.

При нормальной работе сердца происходит ритмичное чередование периодов покоя, в течение которых оно заполняется кровью, и периодов сокращения, при которых оно выталкивает кровь в артериальные сосуды. Такая работа сердца обусловливается расслаблением, а затем сокращением одновременно всех волокон сердечной мышцы — фибрилл. В свою очередь сокращение этих волокон является ответом на первый импульс, возникающий в особом нервно-мышечном аппарате сердца, так называемом синусовом узле, причем каждому импульсу соответствует одно сокращение.

Если сердцу нанести добавочное раздражение, то оно ответит внеочередным сокращением. При множественных раздражениях сердца под действием тока могут нарушаться одновременность и ритмичность сокращения фибрилл, т. е. возникнет фибрилляция сердца.

Фибрилляция сердца может наступить в результате прохождения через тело человека по пути рука — рука или рука — ноги переменного тока более 50 мА частотой 50 Гц в течение нескольких секунд. Токи меньше 50 мА и больше 5 А той же частоты фибрилляции сердца у человека, как правило, не вызывают.

При фибрилляции сердца, возникшей в результате кратковременного действия тока, дыхание может продолжаться еще 2—3 мин. Человек, быстро освобожденный от тока, иногда может до момента потери сознания сказать несколько слов и проявить другие явные признаки жизни, хотя в это время сердце его уже не работает как насос, находясь в стадии фибрилляции. Поскольку вместе с кровообращением прекращается и снабжение организма кислородом, у этого человека наступает быстрое резкое ухудшение общего состояния и дыхание прекращается. В итоге наступает клиническая смерть.

Фибрилляция продолжается обычно короткое время, сменяясь вскоре полной остановкой сердца.

Прекращение дыхания происходит обычно в результате непосредственного воздействия тока на мышцы грудной клетки, участвующие в процессе дыхания.

Человек начинает испытывать затруднение дыхания вследствие судорожного сокращения указанных мышц уже при токе 20–25 мА частотой 50 Гц, проходящем через его тело. При большем токе это действие усиливается. В случае длительного прохождения через человека такого тока наступает так называемая асфиксия — удушье — болезненное состояние в результате недостатка кислорода и избытка углекислоты в организме.

При асфиксии последовательно утрачиваются сознание, чувствительность, рефлексы, затем прекращается дыхание, а через некоторое время останавливается сердце или возникает его фибрилляция, т. е. наступает клиническая смерть.

Прекращение сердечной деятельности в данном случае обусловлено не воздействием тока на сердце (поскольку ток до 50 мА не вызывает фибрилляции или остановки сердца), а прекращением подачи кислорода в организм, в том числе к клеткам сердечной мышцы, из-за остановки дыхания.

Очевидно, прекращение дыхания может быть вызвано относительно небольшим током (от 20 до 50 мА), если он длительно (несколько минут) проходит через человека. Большие токи (от 50 мА до 5 А), которые вызывают остановку или фибрилляцию сердца, способны вызвать также и остановку дыхания. Однако при этих токах в большинстве случаев первичным является прекращение деятельности сердца, поскольку остановка сердца или его фибрилляция наступает значительно раньше, чем паралич дыхания. При токах более 5 А обычно сначала прекращается дыхание.

Электрический шок — своеобразная тяжелая нервно-рефлекторная реакция организма в ответ на чрезмерное раздражение электрическим током, сопровождающаяся глубокими расстройствами кровообращения, дыхания, обмена веществ и т. п.

При шоке непосредственно после воздействия тока наступает кратковременная фаза возбуждения, когда пострадавший реагирует на возникшие боли, у него повышается кровяное давление и т. п. Вслед за этим проходит фаза торможения и истощения нервной системы, когда резко снижается кровяное давление, падает и учащается пульс, ослабевает дыхание, возникает депрессия — угнетенное состояние и полная безучастность к окружающему при сохранившемся сознании.

Шоковое состояние длится от нескольких десятков минут до суток. После этого может наступить или гибель человека в ре-

зультате полного угасания жизненно важных функций, или выздоровление как результат своевременного активного лечебного вмешательства.

1.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА

а) Живая ткань как проводник электрического тока

Тело человека является проводником электрического тока. Однако проводимость живой ткани в отличие от обычных проводников обусловлена не только ее физическими свойствами, но и сложнейшими биохимическими и биофизическими процессами, присущими лишь живой материи.

В результате сопротивление тела человека является переменной величиной, имеющей нелинейную зависимость от множества факторов, в том числе от состояния кожи, параметров электрической цепи, физиологических факторов и состояния окружающей среды.

В живой ткани нет свободных электронов, и поэтому она не может быть уподоблена металлическому проводнику, электрический ток в котором представляет собой упорядоченное движение свободных электронов.

Большинство тканей тела человека содержит значительное количество воды (до 65% массы). Поэтому живую ткань можно рассматривать как электролит, т. е. раствор, разлагающийся химически при прохождении по нему тока, и, таким образом, считать, что она обладает ионной проводимостью. Иначе говоря, можно полагать, что перенос электрических зарядов в живой ткани осуществляется не свободными электронами, как в металлических проводниках, а заряженными атомами или группами атомов — ионами подобно тому, как это происходит в электролитах.

В живой ткани наблюдается явление межклеточной миграции (перемещения) энергии, т. е. резонансный перенос энергии электронного возбуждения между возбужденной и невозбужденной клетками. Поэтому можно предположить, что живая ткань обладает также электронно-дырочной проводимостью, свойственной полупроводникам, в которых перенос зарядов осуществляется электронами проводимости и дырками.

Таким образом, тело человека можно рассматривать как проводник особого рода, имеющий переменное сопротивление и обладающий в какой-то мере свойствами проводников первого рода (полупроводники) и второго рода (электролиты).

6) Электрическое сопротивление тела человека

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. Например, при токе 50 Гц удельное объемное сопротивление составляет, Ом·м:

Кожи сухой	$3 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4$
Кости (без надкостницы)	$10^4 - 2 \cdot 10^6$
Жировой ткани	30—60
Мышечной ткани	1,5—3
Крови	1—2
Спинномозговой жидкости	0,5—0,6

Из этих данных следует, что по сравнению с другими тканями кожа обладает очень большим удельным сопротивлением, которое является главным фактором, определяющим сопротивление тела человека в целом.

Строение кожи весьма сложно. Кожа состоит из двух основных слоев: наружного, называемого эпидермисом, и внутреннего, являющегося собственно кожей и носящего название дермы (рис. 1.7).

Наружный слой кожи — эпидермис — в свою очередь состоит из пяти слоев, из которых самый верхний является, как правило, более толстым, чем все остальные слои вместе взятые, и называется роговым.

Роговой слой включает в себя несколько десятков рядов мертвых ороговевших клеток, имеющих вид чешуек, плотно прилегающих одна к другой. Каждая такая чешуйка представляет собой плотную роговую оболочку, как бы сплюснутую маленькую подушечку, содержащую небольшое количество воздуха.

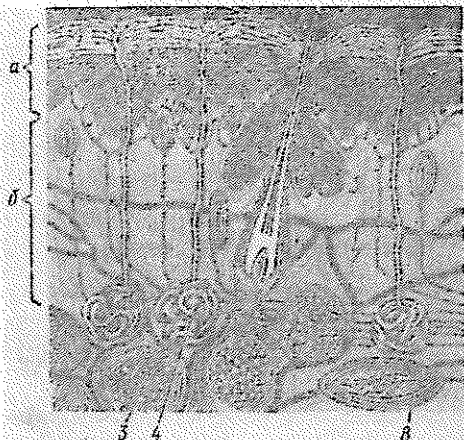
Роговой слой лишен кровеносных сосудов и нервов и поэтому является слоем неживой ткани. Толщина его на разных участках тела различна и колеблется в пределах 0,05 — 0,2 мм. Наибольшей толщины он достигает в местах, подвергающихся постоянным механическим воздействиям, в первую очередь на подошвах и ладонях, где, утолщаясь, он может образовывать мозоли.

Роговой слой обладает относительно высокой механической прочностью, плохо проводит теплоту и электричество и является как бы защитной оболочкой, покрывающей все тело человека. В сухом и незагрязненном состоянии этот слой можно рассматривать как диэлектрик: его удельное сопротивление достигает $10^5 - 10^6$ Ом·м, т. е. в сотни и тысячи раз превышает сопротивление других слоев кожи и внутренних тканей организма.

Другие слои эпидермиса, лежащие под роговым слоем и образованные в основном из живых клеток, можно условно объеди-

Рис. 1.7. Строение кожи (в разрезе):

a — наружный слой кожи — эпидермис; *b* — внутренний слой кожи — дерма; 1 — роговой слой; 2 — ростковый слой; 3 — подкожная жировая клетчатка; 4 — потовые железы; 5 — сальные железы; 6 — волос; 7 — кровеносные сосуды; 8 — чувствительные нервные окончания



нить в один так называемый **ростковый слой**. В основании этого слоя непрерывно происходят деление и развитие новых живых клеток, а вверху — ороговение и отмирание клеток, которые при этом изменяют свою форму, уплотняются, пропитываются особым белковым веществом и становятся клетками рогового слоя, восполняя постоянно слущивающиеся с поверхности кожи мертвые клетки.

Электрическое сопротивление росткового слоя благодаря наличию в нем отмирающих и находящихся в стадии ороговения клеток может в несколько раз превышать сопротивление внутреннего слоя кожи (дермы) и подкожных (внутренних) тканей организма, хотя по сравнению с сопротивлением рогового слоя оно невелико.

Внутренний слой кожи — дерма — состоит из прочных волокон соединительной и эластической ткани, переплетающихся между собой и образующих густую прочную сетку, которая и служит основой всей кожи. Между этими волокнами находятся кровеносные и лимфатические сосуды, нервные окончания и корни волос. Здесь же расположены потовые и сальные железы, выводные протоки которых выходят на поверхность кожи, пронизывая эпидермис.

Дерма является живой тканью; электрическое сопротивление ее незначительно: оно во много раз меньше сопротивления эпидермиса.

Сопротивление тела человека, т. е. сопротивление между двумя электродами, наложенными на поверхность тела, у разных людей различно. Неодинаковым оказывается оно и у одного и того же человека в разное время и в разных условиях измерения. При сухой, чистой и неповрежденной коже сопротивление тела, измеренное при напряжении до 15–20 В, колеблется в пределах примерно $(3 \div 100) \cdot 10^3$ Ом, а иногда и в более ши-

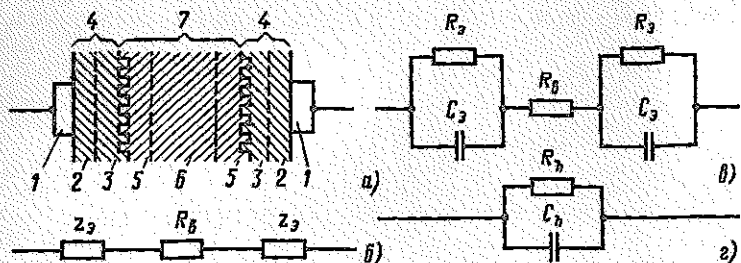


Рис. 1.8. К определению электрического сопротивления тела человека:

а — схема измерения сопротивления; б, в — эквивалентные схемы сопротивления тела человека; 1 — электроды; 2 — роговой слой кожи; 3 — ростковый слой кожи; 4 — наружный слой кожи — эпидермис (роговой и ростковый слои); 5 — внутренний слой кожи (дерма); 6 — подкожные ткани тела; 7 — внутренние ткани тела (внутренние слои кожи и подкожные ткани); Z_3 — полное сопротивление эпидермиса; R_b — сопротивление внутренних тканей; R_3 — активное сопротивление эпидермиса; C_3 — емкость образовавшегося конденсатора; R_h — активное сопротивление тела; C_h — емкость тела

роких пределах. Если на участках кожи, где прикладываются электроды, соскоблить роговой слой, сопротивление тела упадет до $(1 \div 5) \cdot 10^3$ Ом, а при удалении всего наружного слоя кожи (эпидермиса) — до 500 — 700 Ом. Если же под электродами полностью удалить кожу, то будет измерено сопротивление подкожных тканей тела, которое у всех людей практически одинаково и составляет лишь 300 — 500 Ом.

Сопротивление тела человека можно условно считать состоящим из трех последовательно включенных сопротивлений (рис. 1.8, а и б): двух одинаковых сопротивлений наружного слоя кожи, т. е. эпидермиса, $2Z_3$ и одного сопротивления внутренних тканей тела R_b (которое включает в себя два сопротивления — внутренних слоев кожи, т. е. дермы, и подкожных тканей тела).

Сопротивление эпидермиса Z_3 состоит из активного R_3 и емкостного $X_c = 1/\omega C$, сопротивлений, включенных параллельно, где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота, 1/с. Емкостное сопротивление обусловлено тем, что в месте прикосновения электрода к телу человека образуется как бы конденсатор, обкладками которого являются электрод и хорошо проводящие ток ткани тела человека, лежащие под наружным слоем кожи, а диэлектриком, разделяющим обкладки, — этот слой (эпидермис) (рис. 1.8, в).

Обычно это плоский конденсатор, емкость которого зависит от площади электрода S , m^2 , толщины эпидермиса d_3 , m , и его диэлектрической проницаемости ϵ , которая в свою очередь

зависит от многих факторов: частоты приложенного напряжения, температуры кожи, наличия в коже влаги и др. При токе 50 Гц значения ϵ находятся в пределах 100 – 200.

Емкость конденсатора, Ф,

$$C_3 = \epsilon \epsilon_0 S / d_3, \quad (1.1)$$

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

Как показывают опыты, C_3 колеблется от нескольких сотен пикофард до нескольких микрофард.

Активное сопротивление эпидермиса R_3 , Ом, зависит от его удельного сопротивления ρ_3 , значения которого находятся в пределах $10^4 - 10^5$ Ом·м, а также от S и d :

$$R_3 = \rho_3 d_3 / S. \quad (1.2)$$

Полное сопротивление эпидермиса z_3 при площади контактов в несколько квадратных сантиметров достигает очень больших значений – десятков тысяч ом.

Сопротивление внутренних тканей тела R_b считается чисто активным, хотя, строго говоря, оно также обладает емкостной составляющей.

Живую клетку можно представить себе как оболочку с весьма малой проводимостью, заполненную жидкостью, хорошо проводящей ток. Эта клетка окружена такой же жидкостью. Очевидно, что в этом случае образуется элементарный конденсатор, который и обуславливает емкостную проводимость клетки. Однако эта проводимость оказывается незначительной по сравнению с довольно большой ионной проводимостью клетки, и ею без особой погрешности можно пренебречь.

Значение внутреннего сопротивления зависит от длины и поперечного сечения участка тела, по которому проходит ток, а также от удельного сопротивления внутренних тканей организма ρ_b , усредненное значение которого при токе частотой до 1000 Гц составляет 1,5 – 2,0 Ом·м. Значение R_b практически не зависит от площади электродов, частоты тока, а также от приложенного напряжения и равно примерно 500 – 700 Ом.

Эквивалентная схема сопротивления тела человека, показанная на рис. 1.8,а, позволяет написать выражение полного сопротивления тела человека в комплексной форме, Ом:

$$Z_h = 2Z_3 + R_b = 2/(1/R_3 + j\omega C_3) + R_b$$

или после соответствующих преобразований — в действительной форме, Ом:

$$z_h = \sqrt{\frac{4R_z(R_z + R_b)}{1 + R_z^2\omega^2 C_z^2}} + R_b^2, \quad (1.3)$$

где Z_z — сопротивление эпидермиса в комплексной форме, Ом.

Эту схему можно упростить, представив сопротивление тела человека как параллельное соединение сопротивления $R_h = 2R_z + R_b$ и емкости $C_h = 0,5C_z^*$, которые назовем соответственно активным сопротивлением и емкостью тела человека (рис. 1.8, з). В этом случае выражение полного сопротивления, Ом, тела человека в действительной форме будет

$$z_h = R_h / \sqrt{1 + \omega^2 C_h^2 R_h^2}. \quad (1.4)$$

Из (1.3) и (1.4) видно, что при малой емкости C_h (когда ее можно принять равной нулю) полное сопротивление тела человека, Ом, оказывается равным сумме активных сопротивлений обоих слоев эпидермиса и сопротивления внутренних тканей тела:

$$z_h = 2R_z + R_b = R_h. \quad (1.5)$$

в) Зависимость сопротивления тела человека от состояния кожи

Сопротивление кожи, а следовательно, и тела в целом резко уменьшается при повреждении ее рогового слоя, наличии влаги на ее поверхности, интенсивном потоотделении и загрязнении.

Повреждения рогового слоя — порезы, царапины, ссадины и другие микротравмы — могут снизить сопротивление тела человека до значения, близкого к значению сопротивления его внутренних тканей (500 — 700 Ом), что, безусловно, увеличивает опасность поражения человека током.

Увлажнение кожи понижает ее сопротивление даже в том случае, если влага обладает большим удельным сопротивлением. Так, увлажнение сухих рук сильно подсоленной водой снижает сопротивление тела на 30 — 50, а дистиллированной водой — на 15 — 35%. Объясняется это тем, что влага, попавшая на кожу, растворяет находящиеся на ее поверхности мине-

* Приравняв (1.3) к (1.4), можно получить значение C_h , выраженное через C_z . При этом C_h оказывается несколько меньше $0,5C_z$. Если же принять $R_b = 0$, то получим, что $C_h \approx 0,5C_z$.

ральные вещества и жирные кислоты, выведенные из организма вместе с потом и кожным салом, и становится более электропроводной.

При длительном увлажнении кожи роговой слой ее разрыхляется, насыщается влагой, в результате чего его сопротивление почти полностью утрачивается.

Таким образом, работа сырыми руками или в условиях, вызывающих увлажнение каких-либо участков кожи, создает предпосылки для тяжелого исхода в случае попадания человека под напряжение.

Потовыделение обусловлено деятельностью потовых желез, находящихся в нижнем (внутреннем) слое кожи (см. рис. 1.7). У человека около 500 потовых желез на 1 см^2 кожи.

Пот хорошо проводит электрический ток, поскольку в его состав входят вода и растворенные в ней минеральные соли, а также некоторые продукты обмена веществ. Он выделяется на поверхность кожи по выводным протокам — тонким трубочкам, пронизывающим всю толщу кожи.

Выделение пота происходит непрерывно, даже на холоде, но особенно обильно при высокой температуре окружающего воздуха, усиленной физической работе, местном нагреве кожи, заболевании человека и т. п.

Следовательно, в коже всегда имеются токопроводящие каналы — протоки, содержащие то или иное количество пота. В обычных условиях проводимость их незначительна, но при интенсивном потовыделении, когда протоки расширяются и по ним перемещается непрерывная струя пота, сопротивление кожи резко падает. Этому способствует также смачивание потом поверхности кожи и отложение на ней продуктов потовыделения.

Следовательно, работа в условиях, вызывающих усиленное потовыделение, усугубляет опасность поражения человека током.

Загрязнение кожи различными веществами, в особенности хорошо проводящими ток (металлическая или угольная пыль, окалина и т. п.), сопровождается снижением ее сопротивления, подобно тому как это наблюдается при поверхностном увлажнении кожи. Кроме того, токопроводящие вещества, проникая в выводные протоки потовых и сальных желез, создают в коже длительно существующие токопроводящие каналы, резко понижающие ее сопротивление.

Таким образом, токарь по металлу, шахтер и лица других специальностей, у которых руки загрязняются токопроводящими веществами, подвержены большей опасности поражения током, чем лица, работающие чистыми сухими руками.

г) Зависимость сопротивления тела человека от параметров электрической цепи

Электрическое сопротивление зависит также от места приложения электродов к телу человека, значений тока и приложенного напряжения, рода и частоты тока, площади электродов, длительности прохождения тока и некоторых других факторов.

Место приложения электродов оказывает влияние потому, что сопротивление кожи у одного и того же человека на разных участках тела неодинаковое. Кроме того, различным (хотя и в незначительных пределах) оказывается и внутреннее сопротивление при изменении длины пути тока по внутренним тканям организма.

Разница в значениях сопротивления кожи на разных участках тела объясняется рядом факторов, в том числе:

различной толщиной рогового слоя кожи;

неравномерным распределением потовых желез на поверхности тела;

неодинаковой степенью наполнения кровью сосудов кожи.

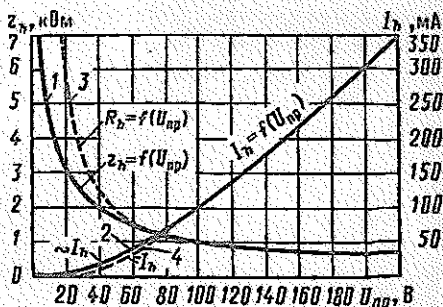
Наименьшим сопротивлением обладает кожа лица, шеи, рук на участке выше ладоней, в особенности на стороне, обращенной к туловищу, подмышечных впадин, тыльной стороны кистей рук.

Увеличение тока, проходящего через тело человека, сопровождается усилением местного нагрева кожи и раздражающего действия на ткани. Это в свою очередь вызывает рефлекторно, т. е. через центральную нервную систему, быструю ответную реакцию организма в виде расширения сосудов кожи, а следовательно, усиление снабжения ее кровью и повышение потоотделения, что и приводит к снижению электрического сопротивления кожи в этом месте.

Повышение напряжения, приложенного к телу человека, $U_{пр}$ вызывает уменьшение в десятки раз его полного сопротивления Z_n , которое в пределе приближается к наименьшему значению сопротивления подкожных тканей тела (примерно 300 Ом). Многочисленные опыты подтверждают характер этой зависимости, хотя значения сопротивлений, полученные при замерах разными авторами, обычно сильно различаются. Объясняется это главным образом разными условиями опытов (которые производились с животными и трупами людей и лишь в пределах безопасных токов — с живыми людьми), а также индивидуальными особенностями испытуемых.

Рис. 1.9. Зависимость сопротивления тела человека и тока, протекающего через него, от приложенного напряжения:

1 и 2 — переменный ток 50 Гц;
3 и 4 — постоянный ток



На рис. 1.9 кривая 1 показывает зависимость z_h от $U_{пр}$ при токе 50 Гц, а кривая 3 — при постоянном токе.

Эти кривые совпадают в основном с результатами исследований ряда советских и зарубежных ученых (А. П. Киселева, В. Е. Манойлова, В. Б. Коувенховена, Ч. Ф. Дальзиела и др.) и определяют наименьшие значения сопротивления тела человека при длительном (несколько секунд) приложении напряжения на участках рука — рука, а также с некоторым приближением рука — нога и нога — нога. Для напряжений 5 В и выше при переменном токе 50 Гц эта зависимость, кОм, выражается формулой, предложенной автором,

$$z_h = 77 / (U_{пр} + 10) + 0.3, \quad (1.6)$$

где $U_{пр}$ — в вольтах.

Из (1.6) нетрудно получить выражение для вычисления приближенных наибольших значений тока, проходящего через человека, I_h , мА, в зависимости от напряжения $U_{пр}$, В, приложенного к его телу (при $U_{пр} \geq 5$ В), а также от z_h (при $0.3 < z_h \leq 6.0$ кОм):

$$I_h = \frac{U_{пр}(U_{пр} + 10)}{0.3U_{пр} + 80}, \quad (1.7)$$

$$I_h = \frac{80 - 10z_h}{z_h(0.3)}. \quad (1.8)$$

Как видно из рис. 1.9 и выражения (1.6), резкое уменьшение сопротивления наблюдается при напряжениях до 50 В, когда при токе 50 Гц z_h оказывается равным примерно 2.0 — 1.6 кОм. Затем z_h незначительно снижается и составляет примерно 950 Ом при 110 В, 600 Ом при 220 В, 500 Ом при 380 В, 400 Ом при 1000 В и т. д.

При больших напряжениях сопротивление приближается к наименьшему пределу 300 Ом.

Замеры, произведенные в США во время казней на электрическом стуле*, подтверждают, что с ростом напряжения сопротивление тела

* Electrical World, apr. 1922, p. 273.

быстро падает. Так, во время одной казни при напряжении в несколько вольт сопротивление составляло 40 кОм, при 110 В — 10 кОм и, наконец, при 2000 В — 200 Ом.

Международная электротехническая комиссия (МЭК) рекомендовала следующие наименьшие значения сопротивления тела человека R_h в зависимости от приложенного к телу напряжения $U_{пр}$ (рука — ноги) при 50 Гц:

$U_{пр}$, В	25	50	250	Выше 250
R_h , Ом	2500	2000	1000	650

В нашей стране приняты в качестве расчетных $R_h = 1000$ Ом при $U_{пр} = 50$ В и выше и $R_h = 6000$ Ом при $U_{пр} = 36$ В.

Уменьшение z_h с ростом приложенного напряжения происходит в основном за счет уменьшения сопротивления кожи и объясняется влиянием ряда факторов, в том числе увеличением тока, проходящего через кожу, и пробоем рогового слоя кожи под влиянием приложенного напряжения.

Рост тока, проходящего через кожу, обусловлен в первую очередь повышением напряжения, приложенного к телу человека. Влияние роста тока на сопротивление кожи рассмотрено ранее.

Пробой рогового слоя кожи возможен, если напряженность возникшего в нем электрического поля превысит его пробивную напряженность $E_{прб}$, равную, как показывают опыты, 500 — 2000 В/мм.

Поскольку сопротивление рогового слоя резко преобладает над сопротивлением всей остальной цепи тока в теле человека, с некоторым приближением можно считать, что напряжение, подведенное к телу человека, практически целиком прикладывается к роговому слою (точнее, к двум последовательно включенным роговым слоям). При этом допущении нетрудно определить напряжение, которое, будучи приложено к телу человека, вызывает пробой рогового слоя, т. е. пробивное напряжение, В,

$$U_{прб} = 2d_p E_{прб},$$

где d_p — толщина рогового слоя, мм.

Так, при $d_p = 0,05$ мм и $E_{прб} = 500 \div 2000$ В/м получим $U_{прб} = 50 \div 200$ В.

Следовательно, пробой рогового слоя кожи возможен при напряжении около 50 В и выше. Исследования подтверждают это предположение. В частности, опыты, проведенные над тру-

пами людей*, показали, что напряжение около 200 В всегда вызывает пробой наружного слоя кожи.

Род и частота тока. Опыты показывают, что сопротивление тела человека постоянному току больше, чем переменному любой частоты. Это подтверждается также (1.3) и (1.4): при $f = 0$, что соответствует постоянному току, сопротивление имеет наибольшее значение ($z_h = 2R_3 + R_B = R_h$); с ростом частоты тока z_h уменьшается (в результате уменьшения емкостного сопротивления) и в пределе, когда $f = \infty$, становится согласно (1.3) равным внутреннему сопротивлению тела R_B .

Разница в значениях сопротивлений постоянному и переменному (50 Гц) токам особенно велика при малых напряжениях — до 10 В. С ростом приложенного напряжения эта разница уменьшается, и начиная с 40–50 В сопротивление тела человека как постоянному, так и переменному току промышленной частоты становится практически одинаковым (кривые 1 и 3 на рис. 1.9).

На рис. 1.10 приведена кривая зависимости полного сопротивления тела человека z_h и тока I_h , проходящего через него, от частоты приложенного напряжения. Измерения проводились по пути рука — рука с помощью цилиндрических электродов диаметром 40 мм при неизменном напряжении 5 В. 50 Гц.

Площадь электродов S оказывает непосредственное влияние на полное сопротивление тела человека: чем больше S , тем меньше z_h . Графики на рис. 1.11 подтверждают эту зависимость. Вместе с тем они показывают, что с ростом частоты тока зависимость z_h от S уменьшается и при 10–20 кГц влияние площади электродов прекращается полностью.

Это следует и из (1.3). Так, если в это уравнение подставить значения C , и R_B из (1.1) и (1.2), то мы получим выражение, определяющее зависимость z_h от S :

$$z_h = \sqrt{\frac{4\rho_3 d_3 (\rho_3 d_3 + SR_B)}{S^2 (1 + \rho_3^2 \omega^2 \epsilon^2 \epsilon_0^2)}} + R_B^2 \quad (1.9)$$

или, если для упрощения принять $R_B = 0$,

$$z_h = \frac{1}{S} \frac{2\rho_3 d_3}{\sqrt{1 + \rho_3^2 \omega^2 \epsilon^2 \epsilon_0^2}} \quad (1.10)$$

Из (1.9) видно также, что при больших частотах тока, например 10–20 кГц, первое слагаемое под корнем приобретает значение, близкое к нулю, а z_h становится равным R_B .

* Frieberger H. Der elektrische Widerstand des menschlichen Körpers gegen technischen Gleich- und Wechselstrom. — Elektrizitätswirtschaft, 1933, Bd. 32, S. 373, 422.

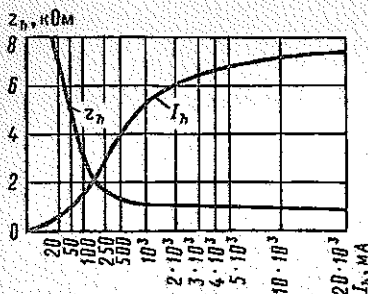


Рис. 1.10. Зависимость полного сопротивления тела человека z_h и тока, проходящего через него, I_h , от частоты приложенного напряжения

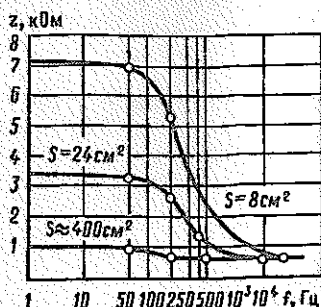


Рис. 1.1. Зависимость полного сопротивления тела человека на участке рука — рука от частоты приложенного напряжения и площади электродов (по А. П. Киселеву)

Длительность протекания тока заметно влияет на сопротивление кожи, а следовательно, на z_h в целом, вследствие усиления с течением времени кровоснабжения участков кожи под электродами, потовыделения и т. п. Опыты показывают, что при небольших напряжениях (20–30 В) за 1–2 мин сопротивление понижается обычно на 10–40% (в среднем на 25%), а иногда и больше.

При большем напряжении, а следовательно, при большем токе, сопротивление тела снижается быстрее, что объясняется, по-видимому, более интенсивным воздействием на кожу тока большего значения.

Например, замеры, произведенные в США во время одной казни на электрическом стуле*, показали, что сопротивление тела человека, равное 800 Ом в момент включения напряжения 1600 В, через 50 с снизилось до 516 Ом, т. е. на 35%.

д) Зависимость сопротивления тела человека от физиологических факторов и окружающей среды

На значение z_h кроме рассмотренных влияют и другие факторы, хотя и в значительно меньшей степени.

Пол и возраст. У женщин, как правило, сопротивление тела меньше, чем у мужчин, а у детей — меньше, чем у взрослых, у молодых людей меньше, чем у пожилых. Объясняется это, очевидно, тем, что у одних людей кожа тоньше и нежнее, у других — толще и грубее.

* Alvensleben K. Electriche Unfälle. — ETZ, 1926, № 34.

Физические раздражения, возникающие неожиданно для человека болевые (уколы и удары), звуковые, световые и пр. — могут вызвать на несколько минут снижение сопротивления тела на 20–50%.

Уменьшение или увеличение парциального давления кислорода в воздухе по сравнению с нормой соответственно снижает или повышает сопротивление тела человека. Следовательно, в закрытых помещениях, где парциальное давление кислорода, как правило, меньше, опасность поражения током при прочих равных условиях выше, чем на открытом воздухе.

Повышенная температура окружающего воздуха (30–45 °С), или тепловое облучение человека, вызывает некоторое понижение z_n , даже если человек в этих условиях находится кратковременно (несколько минут) и у него не наблюдается усиления потовыделения. Одной из причин этого может быть усиление снабжения сосудов кожи кровью в результате их расширения, что является ответной реакцией организма на тепловое воздействие.

1.3. ВЛИЯНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ТОКА НА ИСХОД ПОРАЖЕНИЯ

а) Поражающий фактор

При поражении человека электрическим током *основным поражающим фактором является ток, проходящий через его тело*. При этом степень отрицательного воздействия тока на организм человека увеличивается с ростом тока. Вместе с тем исход поражения определяется длительностью прохождения тока, его частотой, а также некоторыми другими факторами.

б) Характер воздействия на человека токов разного значения

Рассмотрим подробнее, как изменяется опасность воздействия на человека тока в зависимости от его значения. При этом будем считать, что ток через человека проходит по наиболее типичным путям, а именно от руки к руке или от руки к ногам.

Ощутимый ток. Человек начинает ощущать воздействие проходящего через него малого тока: в среднем около 1,1 мА при переменном токе частотой 50 Гц и около 6 мА при постоянном токе. Это воздействие ограничивается при переменном токе слабым зудом и легким пощипыванием (покалыванием), а при постоянном токе — ощущением нагрева кожи на участке, касающемся токоведущей части.

Электрический ток, вызывающий при прохождении через организм ощутимые раздражения, называется **ощутимым током**, а наименьшее значение этого тока называется **пороговым ощутимым током**.

Значения пороговых ощутимых токов у разных людей различны.

Вероятность возникновения ощущения и наименьшие токи частотой 50 Гц, вызывающие эти ощущения, т. е. пороговые ощутимые токи, имеют следующие значения:

Вероятность возникновения ощущения, %	99,9	50	10	5	1	0,1
Пороговый ощутимый ток, мА	1,59	1,11	0,91	0,86	0,76	0,63

Таким образом, воздействие переменного тока 0,63 мА частотой 50 Гц будет ощущать лишь 1 чел. из тысячи, а тока 1,59 мА — 999 чел. из тысячи.

Следует подчеркнуть, что указанные значения пороговых ощутимых токов справедливы лишь при прохождении тока по пути рука — рука или рука — ноги. Если же контакт создается другими частями тела, имеющими более нежный кожный покров, в том числе тыльной стороной руки, лицом и т. п., то человек начинает ощущать еще меньший ток. Наименьший ток 40 мкА при постоянном напряжении ощущается языком.

Пороговый ощутимый ток не может вызвать поражения человека, и в этом смысле он не опасен. Однако длительное (в течение нескольких минут) прохождение этого тока через человека может отрицательно сказаться на состоянии его здоровья и поэтому недопустимо.

Кроме того, ощутимый ток может стать косвенной причиной несчастного случая, поскольку человек, почувствовав воздействие тока, теряет уверенность в своей безопасности и может произвести неправильные действия. Особенно опасно неожиданное воздействие ощутимого тока, что вызывает произвольные ошибочные действия человека, усугубляющие опасность для него при работах вблизи токоведущих частей, на высоте и в других аналогичных условиях.

Безопасный ток, который длительно (в течение нескольких часов) может проходить через человека, не нанося ему вреда и не вызывая никаких ощущений, очевидно, во много раз меньше порогового ощутимого тока. Точные значения безопасного тока не установлены, однако для практических целей его наибольшие значения можно, по видимому, принимать равными 50—75 мкА при 50 Гц и 100—125 мкА при постоянном токе.

Неотпускающий ток. Увеличение тока сверх порогового ощутимого вызывает у человека судороги мышц и болезненные ощущения, которые с ростом тока усиливаются и распространяются на все большие участки тела.

Так, при 3–5 мА (50 Гц) действие тока ощущается всей кистью руки, касающейся токоведущей части; при 8–10 мА боль резко усиливается и охватывает всю руку, сопровождаясь произвольными сокращениями мышц руки и предплечья.

При токе в среднем около 15 мА (50 Гц) боль становится едва переносимой, а судороги мышц рук оказываются настолько значительными, что человек не в состоянии их преодолеть. В результате он не может разжать руку, в которой зажата токоведущая часть, и оказывается как бы прикованным к ней. Такой же эффект неотпускания наблюдается и при воздействии больших токов.

Электрический ток, вызывающий при прохождении через человека непреодолимые судорожные сокращения мышц руки, в которой зажат проводник, называется **неотпускающим током**, а наименьшее его значение — **пороговым неотпускающим током**. Пороговый неотпускающий ток условно можно считать безопасным для человека, поскольку он не вызывает немедленного его поражения. Однако при длительном прохождении ток растет вследствие уменьшения сопротивления тела, в результате чего усиливаются боли и могут возникнуть серьезные нарушения работы легких и сердца, а в некоторых случаях наступает смерть.

При постоянном токе неотпускающих токов, строго говоря, нет, т. е. человек при любых значениях тока может самостоятельно разжать руку, в которой зажат проводник, и таким образом оторваться от токоведущей части. Однако в момент отрыва возникают болезненные сокращения мышц, аналогичные по характеру и болевым ощущениям тем, которые наблюдаются примерно при таком же значении переменного (50 Гц) тока.

Опыты, проводившиеся с людьми, показали, что наибольший постоянный ток, при котором человек еще в состоянии выдержать боль, возникающую в момент отрыва рук от электродов, составляет примерно 50–80 мА. Этот ток и принят условно за порог неотпускающих токов при постоянном напряжении.

Значения пороговых неотпускающих токов, как и ощутимых токов, у разных людей различны. Вероятность возникновения эффекта неотпускания и наименьшие токи частотой 50 Гц, вызы-

вающие этот эффект, т. е. пороговые неотпускающие токи, имеют следующие значения:

Вероятность возникновения эффекта неотпускания, % . . .	99,9	50	10	5	1	0,1
Пороговый неотпускающий ток, мА	24,6	14,9	10,9	9,8	7,7	5,3

Таким образом, переменный ток 5,3 мА частотой 50 Гц является неотпускающим лишь для 1 чел. из тысячи, а ток 24,6 мА — для 999 чел. из тысячи.

Пороговые неотпускающие токи различны также у мужчин, женщин и детей. Приближенные средние значения их составляют: для мужчин — 16 мА при 50 Гц и 80 мА при постоянном токе, для женщин — соответственно 11 и 50 мА, для детей — 8 и 40 мА.

Ток, превышающий пороговый неотпускающий, усиливает судорожные сокращения мышц и болевые ощущения, которые распространяются на более обширную область тела человека, чем при пороговом неотпускающем токе.

Ток 25—50 мА при 50 Гц воздействует на мышцы не только рук, но и туловища, в том числе на мышцы грудной клетки. В результате дыхательные движения грудной клетки сильно затрудняются. В случае длительного воздействия этого тока дыхание может оказаться невозможным, после чего через несколько минут наступит смерть от удушья. Этот ток одновременно вызывает сужение кровеносных сосудов, что приводит к повышению артериального давления крови и затруднению работы сердца. Длительное воздействие этого тока вызывает ослабления деятельности сердца и как итог этого — потерю сознания, а иногда и остановку сердца.

Фибрилляционный ток. Ток 50 мА и более при 50 Гц, проходя через тело человека по тому же пути (рука — рука или рука — ноги), распространяет свое раздражающее действие на мышцу сердца, расположенную глубоко в груди. Это обстоятельство опасно для жизни, поскольку через малый промежуток времени, обычно через 1—3 с с момента замыкания цепи тока через человека, может наступить фибрилляция или остановка сердца. При этом прекращается кровообращение и, следовательно, в организме возникает недостаток кислорода; это в свою очередь быстро приводит к прекращению дыхания, т. е. наступает смерть.

Электрический ток, вызывающий при прохождении через организм фибрилляцию сердца, называется **фибрилля**

ционным током, а наименьшее его значение — пороговым фибрилляционным током.

При частоте 50 Гц фибрилляционными являются токи в пределах от 50 мА до 5 А, а среднее значение порогового фибрилляционного тока — примерно 100 мА. При постоянном токе средним значением порогового фибрилляционного тока можно считать 300 мА, а верхним пределом — 5 А.

Значение порогового фибрилляционного тока колеблется в широких пределах, поскольку оно зависит от ряда факторов и в первую очередь от массы тела человека, рода и частоты тока, а также длительности его воздействия. При вероятности возникновения фибрилляции сердца 50% пороговый фибрилляционный ток $I_{п.ф.}$ мА, может быть определен из следующего выражения:

$$I_{п.ф.} = a\sqrt{m},$$

где a — эмпирический коэффициент, зависящий от рода и частоты, а также длительности воздействия тока t ; значения a находятся в пределах от 18,75 при $t = 1 \div 3$ с до 323,4 при $t = 0,1$ с для переменного тока 50 Гц и от 91,7 при $t = 1 \div 3$ с до 255,7 при $t = 0,1$ с для постоянного тока; m — масса тела человека, кг. В данном случае при расчетах принимается среднее значение массы тела взрослого человека низкого роста, равная 50 кг, что соответствует меньшему значению $I_{п.ф.}$ т. е. обеспечивает большую безопасность в смысле поражения током.

Вероятность возникновения фибрилляции сердца и наименьшие токи, вызывающие ее, т. е. пороговые фибрилляционные токи, имеют следующие значения при $t = 1 \div 3$ с и $m = 50$ кг:

Вероятность возникновения фибрилляции сердца, %	99,9	50	10	5	1,0	0,1
Пороговый фибрилляционный ток, мА:						
переменный, 50 Гц	367	157	111	100	83	67
постоянный	1600	681	428	432	358	290

Следует подчеркнуть, что указанные значения пороговых фибрилляционных токов справедливы при условии длительно-го прохождения тока через человека (не менее 1—3 с) по пути рука — рука или рука — ноги. Если же ток проходит через тело человека в течение меньшего промежутка времени, то значение порогового фибрилляционного тока возрастает (см. § 1.4).

При ином пути тока в теле человека пороговый фибрилляционный ток может иметь большие или меньшие значения. Так, в случае прикосновения к токоведущей части непосредственно грудью фибрилляция сердца может наступить при токе

значительно меньше 100 мА, поскольку в этом случае значительная часть его будет проходить через сердце.

Интересно отметить, что в медицинской практике зарегистрировано несколько случаев возникновения фибрилляции сердца, вызванных очень малыми токами, стекающими с введенного в сердце электрода или катетера. Исследования показали, что в этих условиях (когда электрод касается непосредственно сердца) фибрилляция наступает при токах 40–300 мкА, т. е. примерно в 1000 раз меньших, чем при обычных условиях.

Ток больше 5 А как переменный при 50 Гц, так и постоянный, вызывает немедленную остановку сердца, минуя состояние фибрилляции. Если действие тока было кратковременным (1–2 с) и не вызвало повреждения сердца (в результате нагрева, ожога и т. п.), после отключения тока оно, как правило, самостоятельно возобновляет нормальную деятельность.

В практике наблюдались случаи выживания людей после того, как через них проходил ток в несколько ампер и даже в несколько десятков ампер. Правда, все эти люди стали инвалидами.

При больших токах, даже в случае их кратковременного воздействия, наряду с остановкой сердца происходит и паралич дыхания, причем после отключения тока дыхание, как правило, самостоятельно не восстанавливается и требуется немедленная помощь пострадавшему в виде искусственного дыхания.

Из сказанного следует, что при больших токах смертельные поражения являются обычно следствием прекращения дыхания, как и при токах до 50 мА.

Длительное (несколько секунд) действие большого тока сопровождается не только остановкой сердца и прекращением дыхания, но и обширными и глубокими ожогами тела, разрушением внутренней структуры тканей организма и другими тяжелыми повреждениями отдельных органов, в том числе сердца, которые, как правило, приводят к гибели организма.

1.4. ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПРОХОЖДЕНИЯ ТОКА НА ИСХОД ПОРАЖЕНИЯ

Анализ несчастных случаев с людьми от воздействия электрического тока и данные опытов над животными показывает, что длительность прохождения тока через организм существенно влияет на исход поражения: чем продолжительнее действие тока, тем больше вероятность тяжелого или смертельного исхода. Такая зависимость объясняется тем, что с увеличением

времени воздействия тока на живую ткань повышается его значение, растут (накапливаются) последствия воздействия тока на организм и, наконец, повышается вероятность совпадения момента прохождения тока через сердце с уязвимой фазой T сердечного цикла (кардиоцикла).

Рост тока с увеличением времени его действия объясняется уменьшением сопротивления тела человека, что подробно рассмотрено в § 1.2, 2.

Последствия воздействия тока на организм выражаются в нарушении функций центральной нервной системы, изменении состава крови, местном разрушении тканей организма под влиянием выделяющейся теплоты, нарушении работы сердца и легких и т. п.

Очевидно, что с увеличением времени воздействия тока эти отрицательные факторы накапливаются, а губительное влияние их на состояние организма усиливается.

Опасность совпадения момента прохождения тока через сердце с фазой T кардиоцикла заключается в следующем.

Каждый цикл сердечной деятельности состоит из двух периодов: одного, называемого диастолой, когда желудочки сердца, находясь в расслабленном состоянии, заполняются кровью, и другого, именуемого систолой, когда сердце, сокращаясь, выталкивает кровь в артериальные сосуды (рис. 1.12, а).

На кардиограмме выделяются отдельные участки, соответствующие различным фазам работы сердца. Так, зубец P возникает при сокращении предсердий (что обеспечивает заполнение расслабленных желудочков кровью), пик QRS — при сокращении желудочков сердца, благодаря чему кровь выталкивается в аорты, зубец T — период, когда заканчивается сокращение желудочков и они переходят в расслабленное состояние.

Установлено, что чувствительность сердца к электрическому току неодинакова в разные фазы его деятельности. Наиболее уязвимым сердце оказывается в фазе T , продолжительность которой около 0,2 с. Поэтому, если во время фазы T через сердце проходит ток, то при некотором его значении возникает фибрилляция сердца; если же время прохождения этого тока не совпадает с фазой T , то вероятность возникновения фибрилляции резко уменьшается. Например, опыты над животными показали, что ток промышленной частоты разного значения (вплоть до 10 А) и длительностью 0,2 с, как правило, не вызывает фибрилляции сердца, если время прохождения его совпадает с периодом сокращения предсердий (пик P) или желудочков (пик QRS). При совпадении же тока с фазой T смертельное

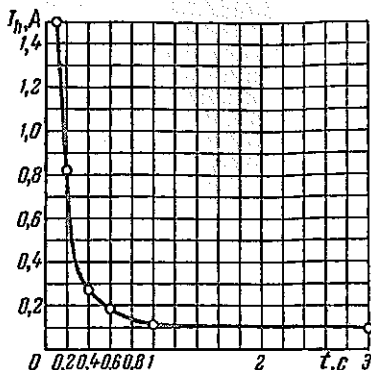
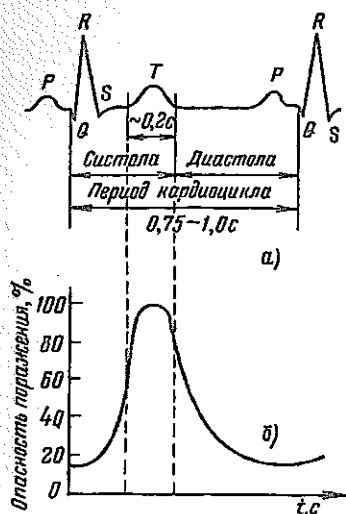


Рис. 1.13. Зависимость порогового фибрилляционного тока 50 Гц от длительности его прохождения через человека.

Во всех случаях время воздействия тока совпадает с наиболее уязвимой фазой T кардиацикла

Рис. 1.12. К вопросу об опасности совпадения времени протекания тока через сердце с фазой T кардиацикла:

а — электрокардиограмма здорового человека (в схематизированном виде); б — кривая, выражающая общий характер зависимости опасности поражения током (т. е. вероятности возникновения фибрилляции сердца) от момента протекания тока через сердце

поражение наступает при значительно меньшем токе — 0,6—0,7 А той же длительности.

Следовательно, вероятность возникновения фибрилляции сердца, т. е. опасность смертельного поражения, зависит не только от значения тока, но и от того, с какой фазой сердечного цикла совпадает период прохождения тока через область сердца. Общий характер этой зависимости выражается кривой, приведенной на рис. 1.12, б.

При длительности прохождения тока, равной времени кардиацикла (0,75—1 с) или превышающей его ток «встречается» со всеми фазами работы сердца, в том числе с наиболее уязвимой фазой T; это весьма опасно для организма. Если же время воздействия тока меньше продолжительности кардиацикла на 0,2 с или более, то вероятность совпадения момента прохождения тока с фазой T, а следовательно, и опасность поражения резко уменьшаются.

Необходимо отметить еще одно немаловажное обстоятельство, влияющее на исход поражения. Дело в том, что если время прохождения тока совпадает с фазой T, то и в этом случае вероятность возникновения фибрилляции сердца зависит от длительности воздействия то-

ка. На рис. 1.13 показана зависимость порогового фибрилляционного тока 50 Гц от длительности его прохождения через человека. Время прохождения тока во всех случаях совпадает с фазой *T*. Эта кривая получена путем соответствующей обработки результатов опытов над животными.

Опыты с импульсными токами, а также токами, обусловленными разрядом конденсатора и отличающимися кратковременностью действия, убедительно подтверждают зависимость поражения от времени действия тока. Так, опыты с собаками и обезьянами показали, что импульсный ток длительностью 1 мкс с амплитудой 30–75 А в большинстве случаев не вызывает смертельного исхода.

Однако импульсы большей длительности или с большим током приводят к остановке сердца или параличу дыхания.

В практике зарегистрирован ряд несчастных случаев без смертельного исхода, когда через человека проходил ток разряда конденсатора, значение которого в первоначальный момент достигало 30–40 А. В то же время известно немало примеров смертельного поражения людей током молнии, который также является импульсным током малой длительности – 40–100 мкс. Правда, в этих случаях ток обычно очень велик. Зарегистрированы также случаи смертельных поражений импульсным током испытательных генераторов импульсных напряжений при длительности импульса 40 мкс, амплитуде напряжения 50–500 кВ и энергии разряда, равной нескольким киловатт-секундам.

Предполагается, что при импульсных токах очень большое влияние на исход поражения оказывает путь тока в теле человека. При непосредственном воздействии импульсного тока на сердце, легкие и спинной мозг смерть наступает при относительно небольших значениях тока.

1.5. ВЛИЯНИЕ ПУТИ ТОКА НА ИСХОД ПОРАЖЕНИЯ

Практикой и опытами установлено, что путь прохождения тока в теле человека играет существенную роль в исходе поражения. Так, если на пути тока оказываются жизненно важные органы – сердце, легкие, головной мозг, то опасность поражения весьма велика, поскольку ток воздействует непосредственно на эти органы.

Если же ток проходит иными путями, то воздействие его на жизненно важные органы может быть лишь рефлекторным, а не непосредственным. При этом опасность тяжелого поражения хотя и сохраняется, но вероятность ее резко снижается. Кроме того, поскольку путь тока определяется местом приложения токоведущих частей (электродов) к телу пострадавшего, его влияние на исход поражения обуславливается еще и различным сопротивлением кожи на разных участках тела. Об этом подробнее сказано в § 1.2, г.

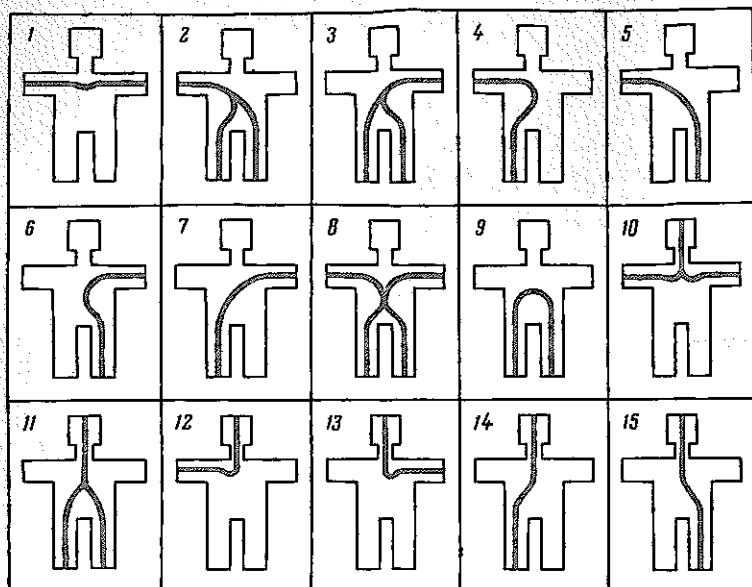


Рис. 1.14. Характерные пути тока в теле человека (петли тока):

1 — рука — рука; 2 — правая рука — ноги; 3 — левая рука — ноги; 4 — правая рука — правая нога; 5 — правая рука — левая нога; 6 — левая рука — левая нога; 7 — левая рука — правая нога; 8 — обе руки — обе ноги; 9 — нога — нога; 10 — голова — руки; 11 — голова — ноги; 12 — голова — правая рука; 13 — голова — левая рука; 14 — голова — правая нога; 15 — голова — левая нога.

Возможных путей тока в теле человека, которые именуются также петлями тока, очень много. Однако характерными, обычно встречающимися в практике являются не более 15 петель, показанных на рис. 1.14, самые распространенные из них (6 петель) приведены в табл. 1.1.

Наиболее часто цепь тока через человека возникает по пути правая рука — ноги. Однако если рассматривать лишь те случаи прохождения тока через человека, которые вызывают утрату трудоспособности более чем на 3 рабочих дня (т. е. учитываемые несчастные случаи), то, как это видно из данных табл. 1.1, наиболее распространенным окажется путь рука — рука, который возникает примерно в 40% случаев. Путь правая рука — ноги занимает второе место — 20%. Другие петли возникают еще реже.

Опасность различных петель тока можно оценить, пользуясь данными табл. 1.1, по относительному количеству случаев потери сознания во время воздействия тока (третья графа таблицы). Опасность петли можно оценить также по значению тока, проходяще-

Таблица 1.1. Характеристика наиболее распространенных путей тока в теле человека

Путь тока	Частота возникновения данного пути тока, %	Доля потерявших сознание во время воздействия тока, %	Значение тока, проходящего через область сердца, % общего тока, проходящего через тело
Рука — рука	40	83	3,3
Правая рука — ноги	20	87	6,7
Левая рука — ноги	17	80	3,7
Нога — нога	6	15	0,4
Голова — ноги	5	88	6,8
Голова — руки	4	92	7,0
Прочие	8	65	—

Примечания: 1. Во второй графе за 100% приняты все несчастные случаи поражения током, повлекшие за собой утрату трудоспособности более чем на 3 рабочих дня.

2. Предполагается, что при воздействии шагового напряжения (путь тока нога — нога) пострадавшие теряли сознание (15%) после падения на землю, т. е. когда возникал новый путь тока.

го через область сердца: чем больше этот ток, тем опаснее петля. Предполагается, что при наиболее распространенных путях в теле человека через сердце протекает 0,4—7% общего тока. В табл. 1.1 эти токи указаны для каждой из рассматриваемых петель (четвертая графа).

Наиболее опасными являются петли голова — руки и голова — ноги, когда ток может проходить через головной и спинной мозг. К счастью, эти петли возникают относительно редко.

Следующий по опасности путь правая рука — ноги, который по частоте образования занимает второе место.

Наименее опасен путь нога — нога, который именуется нижней петлей и возникает при воздействии на человека так называемого напряжения шага. В этом случае через сердце проходит, очевидно, небольшой ток. Опыты, проводившиеся с животными, подтвердили меньшую опасность этой петли. Например, собаки оставались живыми при прохождении тока от одной задней ноги к другой, к которым было приложено напряжение 900 В в течение 12 с; в другом случае напряжение 6000 В прикладывалось кратковременно дважды. Опытам подвергались и кролики, к задним ногам которых подводилось напряжение 180—400 В на 0,5—12,5 с. Кролики также оставались живыми. Здесь уместно еще раз напомнить, что при меньшем токе, протекающем через сердце, снижается лишь одна, хотя и самая грозная, опасность поражения током, а именно опасность непосредственного воздействия тока на сердце. Опасность же непрямого (рефлекторного) действия тока на сердце и другие жизненно важные органы сохраняется. Отсюда следует, что в случае нижней петли, т. е. при небольшом токе, проходящем через сердце, возможен смертельный исход вследствие рефлектор-

ного действия тока. Эти выводы также подтверждены опытами над животными. Правда, вероятность поражения в этом случае невелика. В практике не зарегистрировано также ни одного случая смертельного поражения человека током при воздействии на него напряжения шага. Объясняется это не только малым значением тока, проходящего через сердце, но и тем, что человек не может долго находиться под опасным напряжением шага, благодаря чему рефлекторное действие тока, обусловленного напряжением шага, обычно не успевает проявиться.

Напряжение шага даже небольшого значения (50–80 В) вызывает непроизвольные судорожные сокращения мышц ног и как следствие падение человека на землю. В этот момент прекращается действие на человека напряжения шага и возникает иная, более тяжелая ситуация: вместо нижней петли в теле человека образуется новый, более опасный путь тока — обычно от рук к ногам. Поскольку в таком положении человек касается одновременно точек земли, удаленных одна от другой на расстояние, превышающее длину шага, напряжение, действующее на него, оказывается, как правило, больше напряжения шага. В результате создается реальная угроза смертельного поражения током.

В качестве иллюстрации может служить следующий случай. На воздушной линии электропередачи 10 кВ с металлическими опорами возникло замыкание на землю одновременно двух фаз, вызвавшее прохождение тока через землю 200 А (рис. 1.15). Человек, находясь

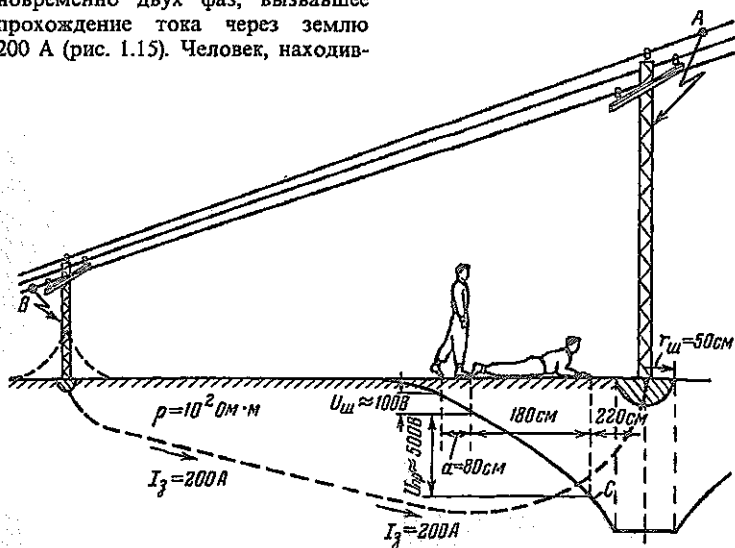


Рис. 1.15. Случай поражения человека током при воздействии на него шагового напряжения:

А и В — точки замыкания разных проводов ВЛ на металлические опоры

шийся в этот момент на расстоянии 4 м от опоры, на которую замкнулась одна из фаз, оказался под напряжением шага, равным, как показали расчеты, 95—100 В. В результате судорог мышц ног он упал на землю и был смертельно поражен током. Напряжение, под которым он оказался, упав на землю, составило немногим более 500 В. Время воздействия тока равнялось 4 с. Причиной этого несчастного случая явились неисправность изоляторов на опорах и отказ быстродействующей защиты от замыкания на землю (которая должна была отключить линию еще при замыкании на землю одного провода)*, что в свою очередь было следствием плохой организации эксплуатации электроустановок на данном предприятии.

1.6. ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ И РОДА ТОКА НА ИСХОД ПОРАЖЕНИЯ

Переменный ток. Известно, что из-за наличия в сопротивлении тела человека емкостной составляющей увеличение частоты приложенного напряжения сопровождается уменьшением полного сопротивления тела и ростом тока, проходящего через человека (см. рис. 1.10). Известно также, что опасность поражения растет вместе с ростом тока, проходящего через человека.

Следовало бы ожидать, что увеличение частоты приведет к повышению этой опасности. В действительности оказалось, что это предположение справедливо лишь в диапазоне частот 0—50 Гц; дальнейшее же повышение частоты, несмотря на рост тока, проходящего через человека, сопровождается снижением опасности поражения, которая полностью исчезает при частоте 450—500 кГц. Иначе говоря, ток частотой 450—500 кГц и более не может вызвать смертельного поражения вследствие прекращения работы сердца или легких, а также других жизненно важных органов.

Правда, эти токи сохраняют опасность ожогов как при возникновении электрической дуги, так и при прохождении их непосредственно через человека.

* В сетях напряжением выше 1000 В с изолированной нейтралью, к которым, в частности, относятся сети 10 кВ, защита от замыкания на землю выполняется обычно с действием на сигнал, а не на отключение. Однако когда вероятность перехода однофазного замыкания на землю в двойное замыкание велика, что сопряжено с опасностью для людей (например, сети торфопредприятий и т. п.), такие сети снабжаются быстродействующей высокочувствительной защитой от замыкания на землю с действием на отключение.

Как показывают опыты над животными, значения фибрилляционного тока при частотах 50–100 Гц практически одинаковы; при частоте 200 Гц фибрилляционный ток возрастает примерно в 2 раза против его значения при 50–100 Гц, а при частоте 400 Гц – более чем в 3 раза [13, с. 184].

Постоянный ток примерно в 4–5 раз безопаснее переменного частотой 50 Гц. Это вытекает из сопоставления значений пороговых неотпускающих токов (50–80 мА для постоянного и 10–15 мА для тока частотой 50 Гц) и предельно выдерживаемых напряжений: человек, удерживая цилиндрические электроды в руках, в состоянии вынести (по болевым ощущениям) приложенное к нему напряжение не более 21–22 В при 50 Гц и не более 100–105 В постоянного тока.

Постоянный ток, проходя через тело человека, вызывает более слабые сокращения мышц и менее неприятные ощущения по сравнению с переменным того же значения. Лишь в момент замыкания и размыкания цепи тока человек испытывает кратковременное болезненное ощущение вследствие внезапного судорожного сокращения мышц, подобное тому, которое возникает при переменном токе примерно того же значения.

Сказанное о сравнительной опасности постоянного и переменного токов справедливо лишь для напряжений до 500 В. Считается, что при более высоких напряжениях постоянный ток становится опаснее переменного частотой 50 Гц.

Причины различной степени опасности токов с разными частотами кроются в характере раздражающего действия этих токов на клетки живой ткани. Вопрос этот весьма сложен и недостаточно изучен. Упрощенно изменение опасности тока с изменением частоты можно объяснить следующим образом.

Если к клетке живой ткани приложить постоянное напряжение, то во внутриклеточном веществе, которое можно рассматривать как электролит, возникнет электролитическая диссоциация, т. е. распад молекул на положительные и отрицательные ионы. Эти ионы начнут перемещаться к оболочке клетки, причем положительные ионы будут сосредотачиваться у отрицательного электрода, а отрицательные – у положительного. Ясно, что это явление вызовет нарушение нормального состояния клетки и протекающих в ней естественных биохимических процессов.

При переменном токе ионы будут перемещаться то в одну, то в другую сторону, следуя за изменением полярности. При небольшой частоте (до 50 Гц) ионы, достигнув оболочки клетки, будут некоторое время, пока не изменится полярность, находиться без движения. Очевидно, что этот процесс приведет к более тяжелым нарушениям в клетке, чем при постоянном токе.

Если частота тока такова, что за полупериод ион успевает пройти все внутриклеточное расстояние, а в течение следующего полупериода — то же расстояние, но в обратном направлении, то этот более сложный процесс, вероятно, способствует более тяжелым нарушениям естественного состояния клетки. Очевидно, что такое положение возникает при частотах до 50 Гц. Можно предположить также, что в интервале этих частот, т. е. от 0 до 50 Гц, большее нарушение вызывает ток, при котором ион делает большее число «полных» пробегов в единицу времени, т. е. ионы находятся в непрерывном движении и пробегают наибольшее расстояние в клетке, а именно ток частотой около 50 Гц.

Поскольку ионы, являясь материальными частицами, обладают некоторой предельной скоростью перемещения в данном электролите, можно полагать, что при частоте тока выше некоторого предела (очевидно, выше 50 Гц) ион не успеет достигнуть оболочки клетки, как произойдет изменение полярности, тогда он будет вынужден двигаться в обратном направлении. Такое явление будет способствовать, вероятно, меньшему нарушению нормального состояния клетки.

При дальнейшем повышении частоты длина пути пробега ионов будет сокращаться и может наступить такой момент, когда движение ионов будет практически отсутствовать, а следовательно, не возникнет опасного нарушения состояния клетки. Это возможно, очевидно, при частотах 450–500 кГц.

1.7. ВЛИЯНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ЧЕЛОВЕКА НА ИСХОД ПОРАЖЕНИЯ

Практикой установлено, что вполне здоровые и физически крепкие люди легче переносят электрические удары, чем больные и слабые. Повышенной восприимчивостью к электрическому току обладают лица, страдающие рядом заболеваний, в первую очередь болезнями кожи, сердечно-сосудистой системы, органов внутренней секреции, легких, нервными болезнями и др.

В западноевропейской и американской литературе нередко встречаются утверждения, что психическое состояние человека в момент поражения имеет если не большее, то по крайней мере такое же значение для исхода поражения, как сопротивление тела человека и другие его физические данные. Многие зарубежные авторы считают, что алкоголики, неврастеники, истерические больные, эпилептики, а также меланхолики могут погибнуть от токов, которые совершенно безопасны для здоровых людей. Такая явно преувеличенная оценка роли психики в исходе поражения током обусловлена в известной мере необходимостью обосновать узаконенный в капиталистических странах ложный тезис о том, что во многих несчастных случаях повинны сами пострадавшие в результате их «неосторожности», «психической неполноцен-

ности» и т. п. Этот тезис, фигурирующий в отчетах и анализах несчастных случаев как одна из причин травматизма, избавляет предпринимателей от ответственности за многие несчастные случаи и больших материальных затрат для их предупреждения.

Однако было бы неправильно полностью отрицать влияние психических факторов на исход поражения. Например, немалое значение имеет психическая подготовленность человека к возможной опасности поражения током. Дело в том, что неожиданный электрический удар даже при относительно небольшом напряжении нередко приводит к тяжелым последствиям; если же человек подготовлен к удару, т. е. ожидает его, то степень опасности резко уменьшается. Имеют значение также моральное состояние, степень внимания и сосредоточенности человека на процессе выполняемой им работы, утомление и т. п.

К в а л и ф и к а ц и я человека также отражается на результатах воздействия тока: человек, далекий от электротехники, в случае попадания под напряжение оказывается, как правило, в более тяжелых условиях, чем опытный электротехник. Дело здесь не в «привычке» к электрическому току, ибо никакая тренировка не вырабатывает в организме иммунитета к нему, а в опыте, умении правильно оценить степень возникшей опасности и применить рациональные приемы освобождения себя от действия тока. Этим, в частности, объясняется то, что в отечественных и зарубежных правилах и нормах требования к устройству и содержанию электроустановок в общепроизводственных цехах значительно более строги, чем в электротехнических цехах, куда имеет доступ лишь квалифицированный электротехнический персонал.

С учетом указанных обстоятельств отечественные правила техники безопасности предусматривают обязательное медицинское освидетельствование персонала, обслуживающего действующие электроустановки, как при поступлении на работу, так и периодически 1 раз в 2 года. Правда, это освидетельствование преследует и другую цель — не допустить к обслуживанию электроустановок людей с недостатками здоровья, которые могут мешать их производственной работе или послужить причиной ошибочных действий, опасных для других лиц (неразличение цветного сигнала из-за порока зрения, невозможность подать четкую команду из-за болезни горла или заикания и т. п.).

1.8. КРИТЕРИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Защитные меры и средства защиты от поражения электрическим током должны создаваться с учетом допустимых для человека значений тока при данной длительности и пути его

прохождения через тело или соответствующих этим токам напряжений прикосновения*.

В настоящее время в СССР действует ГОСТ 12.1.000-82 «ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов», который распространяется на производственные и бытовые электроустановки постоянного и переменных токов частотой 50 и 400 Гц и устанавливает нормы предельно допустимых для человека значений напряжений прикосновения и токов, протекающих через его тело. Эти нормы предназначены для проектирования способов и средств защиты от поражения током людей при их взаимодействии с электроустановками. Они соответствуют прохождению тока через тело человека по пути рука — рука или рука — ноги.

Стандарт предусматривает нормы для электроустановок при нормальном рабочем (неаварийном) режиме их работы (табл. 1.2), а также при аварийных режимах производственных (табл. 1.3 и 1.4) и бытовых (табл. 1.5) электроустановок.

Таблица 1.2. Наибольшие допустимые напряжения прикосновения $U_{пр}$ и токи I_h , проходящие через человека, при нормальном (неаварийном) режиме работы электроустановки

Род и частота тока	Наибольшие допустимые значения	
	$U_{пр}$, В	I_h , мА
Переменный, 50 Гц	2	0,3
Переменный, 400 Гц	3	0,4
Постоянный	8	1,0

Примечания: 1. В таблице приведены предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека по пути от одной руки к другой или от руки к ногам, предназначенные для проектирования способов и средств защиты людей при взаимодействии с электроустановками производственного и бытового назначения постоянного и переменного тока частотой 50 и 400 Гц.

2. Бытовой электроустановкой называется электроустановка, используемая в жилых, коммунальных и общественных зданиях всех типов, например в театрах, кинотеатрах, клубах, школах, детских садах, магазинах, больницах и т. п., с которой могут взаимодействовать как взрослые, так и дети.

3. Настоящие нормы установлены исходя из реакции ощущения и соответствуют продолжительности воздействия тока на человека не более 10 мин в сутки.

4. Для лиц, выполняющих работу в условиях высоких температуры (выше 25 °C) и влажности (относительная влажность более 75 %), приведенные нормы должны быть уменьшены в 3 раза.

* Напряжением прикосновения называется напряжение между двумя точками цепи тока, которых одновременно касается человек, или, иначе говоря, напряжение, приложенное непосредственно к телу человека.

Таблица 1.3. Наибольшие допустимые напряжения прикосновения $U_{пр}$ и токи I_h , проходящие через человека, при аварийном режиме производственных электроустановок напряжением до 1000 В с глухозаземленной или изолированной нейтралью и выше 1000 В с изолированной нейтралью

Род и частота тока	Нормируемая величина	Продолжительность воздействия t , с											
		0,01 – 0,03	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Более 1,0
Переменный, 50 Гц	$U_{пр}$, В	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	36
	I_h , мА	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	6
Переменный, 400 Гц	$U_{пр}$, В	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	36
	I_h , мА	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	8
Постоянный	$U_{пр}$, В	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	40
	I_h , мА	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	15
Выпрямленный двухполупериодный	$U_{пр}$, ампл, В	650	500	400	300	270	230	220	210	200	190	180	—
	I_h , ампл, мА	650	500	400	300	270	230	220	210	200	190	180	—
Выпрямленный однополупериодный	$U_{пр}$, ампл, В	650	500	400	300	250	200	190	180	170	160	150	—
	I_h , ампл, мА	650	500	400	300	250	200	190	180	170	160	150	—

Примечания: 1. В таблице приведены предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека, при взаимодействии с электроустановками производственного назначения при аварийном режиме. Аварийный режим электроустановки — это работа неисправной электроустановки, при которой могут возникнуть опасные ситуации, приводящие к электротравмированию людей, воздействию с электроустановкой.

2. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов установлены для путей тока в теле человека от одной руки к другой и от руки к ногам.

3. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, протекающих через человека в течение более 1 с, соответствуют отпускным (перемешным) и неболсам (постоянным) токам. Отпускающим током называется электрический ток, не вызывающий при прохождении через тело человека непреодолимых судорожных сокращений мышц руки, в которой зажат проводник.

4. Для перемешных токов в таблице указаны действительные (эффективные) значения нормируемых величин, а для выпрямленных — амплитудные.

Таблица 1.4. Наибольшие допустимые напряжения прикосновения $U_{пр}$ при аварийном режиме производственных электроустановок переменного тока 50 Гц напряжением выше 1000 В с глухим заземлением нейтрали

Продолжительность воздействия тока, с Наибольшее допустимое значение $U_{пр}$, В	До 0,1	0,2	0,5	0,7	1,0	Более 1,0 до 5,0
	500	400	200	130	100	65

Примечание. См. примечания 1–3 к табл. 1.3.

Таблица 1.5. Наибольшие допустимые напряжения прикосновения $U_{пр}$ и токи I_h , проходящие через человека, при аварийном режиме бытовых электроустановок напряжением до 1000 В и частотой 50 Гц

Нормируемая величина	Продолжительность воздействия t , с										
	0,01 – 0,03	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$U_{пр}$, В	220	200	100	70	55	50	40	35	30	27	25
I_h , мА	220	200	100	70	55	50	40	35	30	27	25

Примечания: 1. В таблице приведены предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека, при взаимодействии с электроустановками бытового назначения при аварийном режиме.

2. См. примечание 2 к табл. 1.2 и примечания 2 и 3 к табл. 1.3.

3. Значения напряжений прикосновения и токов установлены для людей с массой тела 15 кг.

Контроль предельно допустимых уровней напряжения прикосновения и тока должен осуществляться измерением этих величин в местах, где может произойти замыкание электрической цепи через тело человека.

За рубежом в ряде стран действуют аналогичные нормы.

Например, в Германской Демократической Республике при расчетах защитных заземлений допустимые напряжения прикосновения и шага в зависимости от длительности прохождения тока определяются кривой, которая в билогарифмических координатах представляет собой прямую, проведенную между точками с координатами 1 с, 65 В и 0,15 с, 500 В; при длительности более 1 с допустимые напряжения прикосновения и шага равны 65 В.

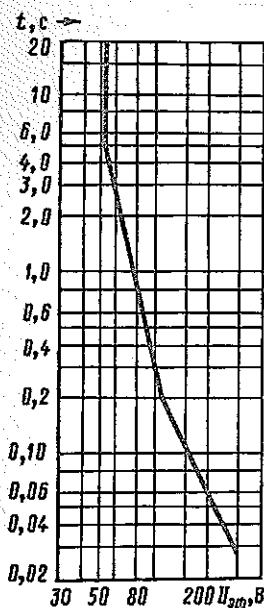


Рис. 1.16. График предельно допустимых напряжений прикосновения (рекомендация МЭК)

В Польской Народной Республике установлены следующие предельно допустимые напряжения прикосновения $U_{пр}$ в зависимости от продолжительности t воздействия на человека переменного тока:

t , с . . .	Менее 0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0	и более
$U_{пр}$, В . .	205	145	118	92	73	65	

В Италии приняты следующие значения $U_{пр}$ при переменном токе в зависимости от t :

t , с . . .	0,03	0,05	0,1	0,2	0,4	0,5	1,0	5,0
$U_{пр}$, В . .	280	220	150	110	80	70	50	25

Комиссией CENELEC (Электротехническая комиссия стран — членов Общего рынка) рекомендованы следующие значения $U_{пр}$ переменного тока и соответствующее им предельно допустимое время отключения t защищаемого участка при замыкании фазы на корпус:

t , с	0,03	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	5,0	и более
$U_{пр}$, В	280	220	150	110	90	75	50	

График предельно допустимых напряжений прикосновения для переменного тока (50—60 Гц), рекомендованный Международной электротехнической комиссией (МЭК), приведен на рис. 1.16.

Глава 2

ПЕРВАЯ ПОМОЩЬ ПОСТРАДАВШИМ ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Первая помощь при поражении электрическим током состоит из двух этапов: освобождения пострадавшего от действия тока и оказания ему доврачебной медицинской помощи.

Поскольку исход поражения током зависит от длительности прохождения его через тело человека, очень важно как можно быстрее освободить пострадавшего от тока и сразу же присту-

пить к оказанию ему медицинской помощи. Это требование относится и к случаю смертельного поражения током, поскольку период клинической смерти продолжается всего несколько минут. Во всех случаях поражения человека током необходимо, не прерывая оказания ему первой помощи, вызвать врача.

2.1. ОСВОБОЖДЕНИЕ ЧЕЛОВЕКА ОТ ДЕЙСТВИЯ ТОКА

При поражениях электрическим током нередко оказывается, что пострадавший продолжает находиться в контакте с токоведущей частью и не может самостоятельно нарушить этот контакт, т. е. прервать проходящий через него ток, что резко усугубляет тяжесть поражения.

Такое положение может возникнуть в ряде случаев: при непроизвольном судорожном сокращении мышц руки, которое пострадавший не в состоянии преодолеть и поэтому не может разжать руку с находящимся в ней проводом; при параличе конечностей или иных участков тела, т. е. при длительной утрате всех или части двигательных функций вследствие поражения нервной системы (а не вследствие кратковременного судорожного сокращения мышц), когда человек не способен покинуть опасное место или выполнить необходимые движения; при тяжелой механической травме; при потере сознания и т. п.

Выключение человека из цепи протекания тока, или, как принято говорить, освобождение пострадавшего от воздействия тока, можно осуществить несколькими способами. Однако *первое действие для освобождения пострадавшего от тока — быстрое отключение той части электроустановки, которой он касается.*

Отключение электроустановки производится с помощью ближайшего рубильника, выключателя или иного отключающего аппарата, а также путем снятия или вывертывания предохранителей (пробок), разъема штепсельного соединения (рис. 2.1) и т. п.

При этом надо иметь в виду, что если пострадавший находится на высоте, то отключение напряжения может вызвать его падение. В таком случае принимают меры, предупреждающие падение или обеспечивающие его безопасность.

Кроме того, при отключении установки может одновременно погаснуть электрический свет, поэтому при отсутствии дневного освещения необходимо иметь на-



Рис. 2.1. Освобождение пострадавшего от действия тока — отключение электроустановки (плакат)

готовые другой источник света — фонарь, свечу, факел и т. п., а при наличии аварийного освещения — включить его.

При невозможности быстрого отключения установки (например, из-за удаленности или недоступности выключателя и т. п.) необходимо принять иные меры освобождения пострадавшего от действия тока. Так, в некоторых случаях можно прервать цепь тока через пострадавшего, перерубив провода или вызвав автоматическое отключение электроустановки, отделить пострадавшего от токоведущих частей, которых он касается, и т. п. Меры эти различны. Они зависят от напряжения электроустановки, окружающих условий, наличия подходящих для этой цели приспособлений и предметов и, наконец, от умения и находчивости оказывающего помощь.

Во всех случаях оказывающий помощь должен быстро освободить пострадавшего от тока и следить за тем, чтобы само-

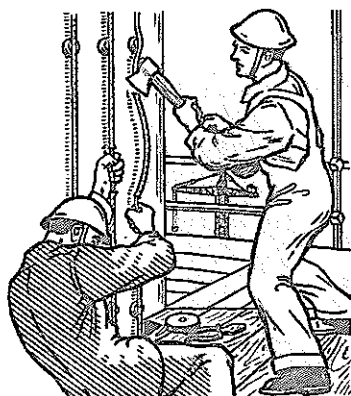


Рис. 2.2. Освобождение пострадавшего от действия тока в установках до 1000 В — перерубание проводов (каждого в отдельности) топором с деревянной сухой рукояткой

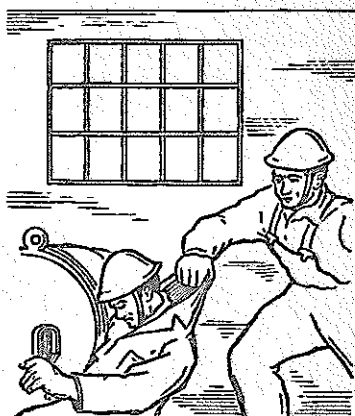


Рис. 2.3. Освобождение пострадавшего от действия тока в установках до 1000 В — оттачивание за сухую одежду

му не оказаться в контакте с токоведущей частью или телом пострадавшего, а также под напряжением шага.

При напряжении до 1000 В в некоторых случаях можно перерубить провода топором с сухой деревянной рукояткой (рис. 2.2) или перекусить их инструментом с изолированными рукоятками — кусачками, пассатижами и т. п. Допустимо использовать и обычный инструмент с металлическими рукоятками, в том числе обыкновенный нож; при этом оказывающий помощь должен надеть диэлектрические перчатки и галоши.

Перерубать (перерезать) следует каждый провод в отдельности, чтобы не вызвать КЗ между ними, в результате которого может возникнуть электрическая дуга, способная причинить оказывающему помощь серьезные ожоги тела и привести к повреждению глаз.

Можно оттянуть пострадавшего от токоведущих частей, взявшись за его одежду, если она сухая и отстает от тела, например за полы пиджака, пальто. При этом нельзя касаться тела пострадавшего, его обуви (которая может оказаться токопроводящей вследствие загрязнения, наличия в ней гвоздей и т. п.), сырой одежды, а также окружаю-

щих заземленных металлических предметов. Рекомендуется действовать одной рукой, держа вторую в кармане или за спиной (рис. 2.3).

При необходимости прикоснуться к участкам тела пострадавшего, не покрытым сухой одеждой, надо надеть на руки

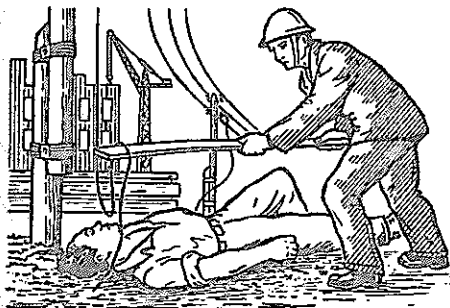


Рис. 2.4. Освобождение пострадавшего от действия тока в установках до 1000 В — отбрасывание провода сухой деревянной доской

диэлектрические перчатки или обмотать их сухой тканью (шарфом и т. п.), натянуть на руки рукава пиджака или пальто и т. п. Для изоляции своих рук можно также накинуть на пострадавшего пиджак, плащ, резиновый коврик или просто сухую ткань. Для большей надежности можно также изолировать себя от земли или токопроводящего пола, надев резиновые галоши или встав на сухую или какую-нибудь другую, не проводящую электрический ток подстилку, сверток сухой одежды и т. п.

Если пострадавший судорожно сжимает рукой провод, находящийся под напряжением, то для освобождения его от действия тока можно разжать его руку, отгибая каждый палец в отдельности. Для этого оказывающий помощь должен иметь на руках диэлектрические перчатки и стоять на изолирующем основании — диэлектрическом коврике, сухой доске и т. п. или быть в галошах.

Можно отбросить провод, которого касается пострадавший, пользуясь сухими деревянной палкой, доской и другими не проводящими электрический ток предметами (рис. 2.4).

В установках выше 1000 В для отделения пострадавшего от токоведущих частей необходимо надеть диэлектрические перчатки и боты и действовать штангой или изолирующими клещами, рассчитанными на напряжение данной электроустановки (рис. 2.5). Применение диэлектрических бот в данном случае необходимо для защиты от возможного шагового напряжения.

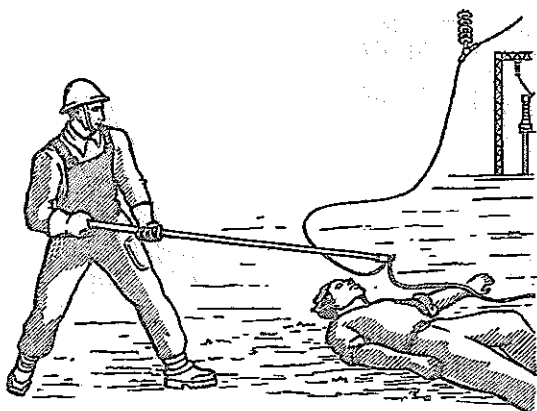


Рис. 2.5. Освобождение пострадавшего от действия тока в установках выше 1000 В

Автоматическое отключение электроустановки для освобождения пострадавшего, находящегося в контакте с токоведущей частью, от действия тока может быть вызвано преднамеренным замыканием накоротко и заземлением фаз электроустановки. Этот способ более эффективен в электроустановках выше 1000 В, поскольку такие установки всегда оснащаются надежной и быстродействующей релейной защитой.

Однако сама операция замыкания накоротко и заземления токоведущих частей, находящихся под напряжением, очень опасна, поэтому данный способ освобождения пострадавшего от тока применяется в исключительных случаях, когда никакие другие способы не могут быть использованы. Таким исключительным случаем является поражение током на воздушной линии электропередачи, когда пострадавший касается проводов линии и эту линию невозможно быстро отключить с пункта питания из-за его удаленности.

Замыкание и заземление проводов воздушной линии можно осуществить путем наброса на них заземленного одним концом неизолированного проводника. В качестве набрасываемого проводника наиболее подходящим является медный неизолированный гибкий провод соответствующей длины. Можно использовать для этой цели и обыкновенный неизолированный провод.

Сечение набрасываемого проводника должно быть достаточным, чтобы он не перегорел при прохождении по нему токов КЗ. Наименьшее сечение его (по меди) во всех случаях дол-

жно быть 16 мм² для линий до 1000 В и 25 мм² для линий выше 1000 В.

Перед набрасыванием один конец проводника надежно заземляют путем присоединения его к имеющемуся поблизости заземляющему устройству подстанции, телу металлической опоры или к специально забитому в землю стержневому заземлителю. Ко второму концу проводника для удобства набрасывания прикрепляют небольшой груз.

Проводник набрасывают так, чтобы он не коснулся никого из людей, в том числе выполняющего эту операцию и пострадавшего.

Если пострадавший касается одного провода, то часто достаточно заземлить только этот провод.

2.2. МЕРЫ ПЕРВОЙ ДОВРАЧЕБНОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ

Современная медицина располагает всеми средствами для оживления человека, смертельно пораженного током. Однако быстрое прибытие медицинских работников с необходимыми средствами оказания первой помощи к месту происшествия маловероятно. Поэтому первую помощь пораженному током должен уметь оказывать каждый работающий в электроустановках. Действующие правила техники безопасности требуют, чтобы весь персонал, обслуживающий электроустановки, был обучен практическим приемам освобождения пострадавшего от тока и способам оказания ему первой доврачебной медицинской помощи.

Первая медицинская помощь пострадавшему от электрического тока оказывается немедленно после освобождения его от действия тока здесь же, на месте. Переносить пострадавшего в другое место можно в тех случаях, когда опасность продолжает угрожать пострадавшему или оказывающему помощь, или при крайне неблагоприятных условиях — темнота, дождь, теснота и т. п.

Меры первой доврачебной медицинской помощи пострадавшему от электрического тока зависят от его состояния.

Для определения состояния пострадавшего необходимо уложить его на спину и проверить наличие дыхания и сердечных сокращений.

Наличие дыхания у пострадавшего определяется по подъему и опусканию грудной клетки во время самостоятельного вдоха и выдоха. Никакой тщательной проверки для обна-

ружения слабого или поверхностного дыхания проводить не требуется, поскольку эти уточнения мало полезны при оказании помощи пострадавшему и в то же время приводят к затратам времени, что совершенно недопустимо в таких условиях.

Нормальное дыхание характеризуется четкими и ритмичными подъемами и опусканиями грудной клетки. В таком состоянии пострадавший не нуждается в искусственном дыхании.

Нарушенное дыхание характеризуется нечеткими или неритмичными подъемами грудной клетки при вдохах, редкими, как бы хватающими воздух вдохами или отсутствием видимых дыхательных движений грудной клетки. Все эти случаи расстройства дыхания приводят к тому, что кровь в легких недостаточно насыщается кислородом, в результате чего наступает кислородное голодание тканей и органов пострадавшего. Поэтому в этих случаях пострадавший нуждается в искусственном дыхании.

Наличие сердечных сокращений свидетельствует о работе сердца, т. е. о наличии в организме кровообращения, его определяют путем выслушивания сердечных тонов, приложив ухо к левой половине груди пострадавшего, или проверкой пульса. Пульс — толчкообразные ритмичные колебания стенок кровеносных сосудов, обусловленные движением по ним крови при работе сердца.

Наличие пульса проверяют, как правило, на крупных артериях, где он более выражен, — на лучевой, бедренной и сонной.

При определении состояния человека, пораженного электрическим током, проверку пульса следует произвести на лучевой артерии на руке примерно у основания большого пальца. Если на лучевой артерии пульс не обнаруживается, его надо проверить на сонной артерии на шее с правой и левой сторон выступа щитовидного хряща — адова ябллка (рис. 2.6).

При слабых сердечных сокращениях пульсовая волна не достигает периферии тела, в том числе и далеко расположенных от сердца лучевых и бедренных артерий, где поэтому пульс может не прощупываться. Сонная же артерия находится в непосредственной близости от сердца и обычно пульсирует даже при

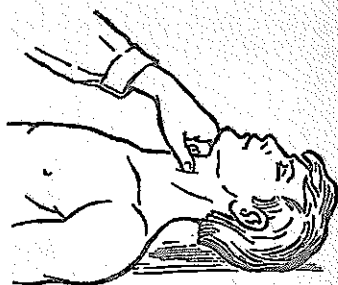


Рис. 2.6. Определение пульса на сонной артерии

весьма слабых его сокращениях. Отсутствие пульса и на сонной артерии свидетельствует, как правило, о прекращении движения крови в организме, т. е. о прекращении работы сердца. Об отсутствии кровообращения в организме можно судить по состоянию глазного зрачка, который в этом случае расширен.

Проверка состояния пострадавшего, включая придание его телу соответствующего положения, проверку дыхания, пульса и состояния зрачка, должна производиться быстро — в течение 15—20 с.

Если пострадавший в сознании, но до этого был в обмороке или продолжительное время находился под током, необходимо его удобно уложить на сухую подстилку, накрыть сверху чем-либо из одежды, удалить из помещения лишних людей и до прибытия врача, который должен быть вызван немедленно, обеспечить ему полный покой, непрерывно наблюдая за его дыханием и пульсом. Ни в коем случае нельзя позволять пострадавшему двигаться, а тем более продолжать работу, даже если он чувствует себя хорошо и не имеет видимых повреждений. Отрицательное воздействие электрического тока на человека может сказаться не сразу, а спустя некоторое время — через несколько минут, часов и даже дней. Так, у человека, подвергшегося воздействию тока, может через несколько минут наступить резкое ухудшение и даже прекращение работы сердца или могут проявиться иные опасные симптомы поражения. Зарегистрированы случаи, когда резкое ухудшение состояния здоровья, приводившее иногда к смерти пострадавшего, наступало через несколько дней после освобождения его от тока, в течение которых он субъективно чувствовал себя хорошо и не имел внешних повреждений. Поэтому только врач может правильно оценить состояние здоровья пострадавшего и решить вопрос о помощи, которую нужно оказать ему на месте, а также о дальнейшем его лечении.

В случае невозможности быстро вызвать врача пострадавшего срочно доставляют в лечебное учреждение на носилках или транспортом.

Если пострадавший находится в бессознательном состоянии, но с сохранившимися устойчивыми дыханием и пульсом, его следует удобно уложить на подстилку, расстегнуть одежду и пояс, чтобы они не затрудняли его дыхания, обеспечить приток свежего воздуха и принять меры к приведению его в сознание — поднести к носу вату, смоченную нашатырным спиртом, обрызгать лицо холодной водой, растереть и согреть тело. По-

страдавшему следует обеспечить полный покой, удалив посторонних людей из помещения, и непрерывное наблюдение за его состоянием до прибытия врача.

Если пострадавший плохо дышит — редко, судорожно, как бы с всхлипыванием или если дыхание пострадавшего постепенно ухудшается, но у него прощупывается пульс, необходимо делать искусственное дыхание.

При отсутствии признаков жизни, т. е. когда у пострадавшего отсутствуют дыхание и пульс, а болевые раздражения не вызывают никаких реакций, зрачки глаз расширены и не реагируют на свет, надо считать пострадавшего находящимся в состоянии клинической смерти и немедленно приступать к его оживлению, т. е. к искусственному дыханию и массажу сердца.

Никогда не следует отказываться от оказания помощи пострадавшему и считать его мертвым из-за отсутствия дыхания, пульса и других признаков жизни. Пораженного электрическим током можно признать мертвым только при явно видимых смертельных повреждениях, например в случае раздробления черепа при падении или при обгорании всего тела. В других случаях констатировать смерть имеет право только врач.

Опыт показывает, что своевременное и правильное оказание первой медицинской помощи человеку, находящемуся в состоянии клинической смерти, как правило, приводит к положительному результату — оживлению мнимоумершего. Здесь еще раз уместно подчеркнуть, что попытки оживления эффективны лишь в том случае, если с момента остановки сердца прошло не более 4—5 мин. Известны случаи, когда лица, пораженные электрическим током и находившиеся в состоянии клинической смерти, после принятия соответствующих мер выздоравливали и возвращались к обычной работе. Часто оживление людей, пораженных электрическим током, достигается в результате своевременной и квалифицированной доврачебной помощи товарищем по работе или другим свидетелем поражения током. В более тяжелых случаях эта помощь обеспечивает сохранение жизнеспособности организма мнимоумершего до прибытия врача, который может применить более эффективные меры оживления. В этих случаях доврачебная медицинская помощь должна оказываться непрерывно, даже тогда, когда время исчисляется часами. Зарегистрировано много случаев оживления людей, пораженных током, после 3—4 ч, а в отдельных случаях после 10—12 ч, в течение которых непрерывно выполнялись искусственное дыхание и массаж сердца.

Решение о бесполезности дальнейших действий по оживлению человека, находящегося в состоянии клинической смерти, и заключение о его истинной (биологической) смерти имеет право вынести только врач.

Достоверными признаками необратимой смерти являются мутная, высохшая роговица глаз; широкие, не реагирующие на свет зрачки; охлаждение тела до температуры окружающей среды; возникновение трупных пятен и трупного окоченения и др. Трупные пятна — посинение отдельных участков поверхности тела — возникают после смерти от застоя крови, стекающей под действием силы тяжести в нижележащие участки тела. У мертвого, лежащего на спине, трупные пятна образуются на лопатках, пояснице и др., а у лежащего на животе — на лице, груди, конечностях. Трупное окоченение — напряженность мышц трупа, в результате чего невозможно повернуть его голову, согнуть или разогнуть конечности в суставах, наступает через 2–4 ч после смерти.

2.3. ИСКУССТВЕННОЕ ДЫХАНИЕ

Назначение искусственного дыхания, как и нормального естественного дыхания, — обеспечить газообмен в организме, т. е. насыщение крови пострадавшего кислородом и удаление из крови углекислого газа. Кроме того, искусственное дыхание, воздействуя рефлекторно на дыхательный центр головного мозга, способствует тем самым восстановлению самостоятельного дыхания пострадавшего.

Газообмен происходит в легких. Воздух, поступающий в них, заполняет множество легочных пузырьков, так называемых альвеол, к стенкам которых притекает кровь, насыщенная углекислым газом. Стенки альвеол очень тонки, и общая площадь их у человека достигает в среднем 90 м². Через эти стенки и осуществляется газообмен, т. е. из воздуха в кровь переходит кислород, а из крови в воздух — углекислый газ.

Кровь, насыщенная кислородом, посылается сердцем ко всем органам, тканям и клеткам, в которых благодаря этому продолжают нормальные окислительные процессы, т. е. нормальная жизнедеятельность.

Воздействие на дыхательный центр мозга осуществляется в результате механического раздражения поступающим воздухом нервных окончаний, находящихся в легких. Возникающие при этом нервные импульсы поступают в центр головного мозга, ведающего дыхательными движениями.

ми легких, стимулируя его нормальную деятельность, т. е. способность посылать импульсы мышцам легких, как это происходит в здоровом организме.

Способы искусственного дыхания. Существует множество различных способов выполнения искусственного дыхания. Все они делятся на две группы: аппаратные и ручные.

Аппаратные способы требуют применения специальных аппаратов, которые обеспечивают вдвухание и удаление воздуха из легких через резиновую трубку, вставленную в дыхательные пути, или через маску, наложенную на лицо пострадавшего. Простейшими из аппаратов являются ручные портативные аппараты РПА-1 и РПА-2 (рис. 2.7), предназначенные для искусственного дыхания и аспирации (отсасывания) жидкости и слизи из дыхательных путей. Основными частями их являются небольшой мех, приводимый в действие рукой, и маска, плотно накладываемая на рот и нос пострадавшего.

Во время сжатия меха происходит активный вдох, т. е. введение под некоторым давлением в легкие пострадавшего атмосферного воздуха в объеме 0,25–1,5 л или воздуха, обогащенного кислородом. В последнем случае ко всасывающему клапану аппарата присоединяется кислородная подушка. Во время растяжения меха происходит пассивный выдох, при этом воздух из аппарата выходит через специальный клапан.

Благодаря портативности и малой массе этот аппарат применяется не только в больничных, но и в полевых условиях.

Примером более совершенных аппаратов с активным вдохом и выдохом, т. е. с положительным давлением на вдохе и отрицательным на выдохе, является портативный аппарат ДП-2 отечественного производства (рис. 2.8). Он работает автоматически, используя энергию сжатого кислорода, содержащегося в баллоне. Пройдя через редуктор, кислород поступает в дыхательную камеру, где смешивается с воздухом и через маску подается в легкие пострадавшего. При этом давление в легких на вдохе составляет 1,7–1,9 кПа (13–14 мм рт. ст.), а разрежение на выдохе 0,7–0,9 кПа (5–6 мм рт. ст.). Этот режим соответствует режиму естественного дыхания.

Аппарат ДП-2 снабжен приспособлением, регулирующим глубину и длительность вдоха и выдоха, частоту дыхания, содержание в смеси кислорода, влажность смеси и пр. Он смонтирован в металлическом футляре (чемоданчике) размером 460 × 310 × 125 мм; масса его 11 кг. Кислорода, содержащегося в одном двухлитровом баллоне при давле-

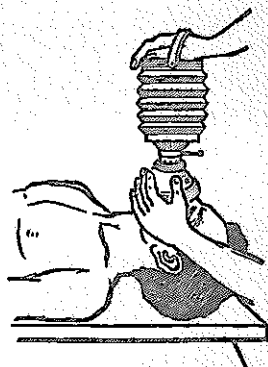


Рис. 2.7. Искусственное дыхание с помощью аппарата РПА-1

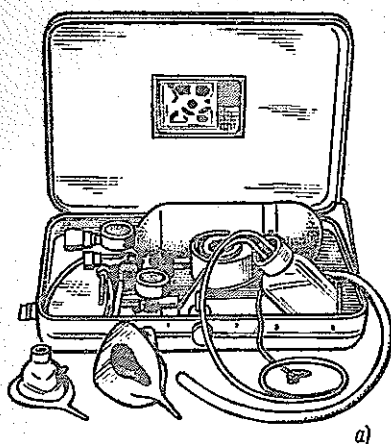
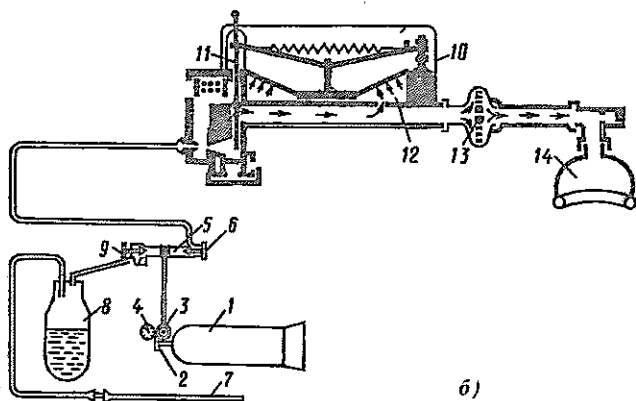


Рис. 2.8. Аппарат ДП-2 для длительного искусственного дыхания с активным вдохом и выдохом:

а – общий вид; б – принципиальная схема (при положении «вдох»); 1 – кислородный баллон; 2 – вентиль; 3 – редуктор; 4 – манометр; 5 – регулятор частоты дыхания; 6 – вентиль регулятора частоты дыхания; 7 – катетер (вводится через нос или рот в трахею для отсасывания жидкости из рта и органов дыхания пострадавшего); 8 – аспирационный стакан; 9 – вентиль для включения и регулирования аспирации; 10 – дыхательный автомат; 11 – кнопка штока клапана дыхательного автомата; 12 – подмембранное пространство автомата; 13 – увлажнитель кислородно-воздушной смеси; 14 – маска



нии 20 МПа (200 кгс/см²), достаточно для производства искусственного дыхания в течение 20 мин.

Аппарат может быть использован для оказания неотложной помощи на месте несчастного случая, при транспортировании пострадавшего в медицинское учреждение, а также в больничных условиях для длительного проведения искусственного дыхания – в течение нескольких часов и даже дней.

Ручные способы значительно менее эффективны и несравненно более трудоемки, чем аппаратные. Они обладают, однако, тем важным достоинством, что могут выполняться без

каких-либо приспособлений и приборов, т. е. немедленно по возникновении нарушений дыхания у пострадавшего.

Среди большого числа существующих ручных способов наиболее эффективным является способ «изо рта в рот». Он заключается в том, что оказывающий помощь вдвухает воздух из своих легких в легкие пострадавшего через его рот или нос.

Установлено, что воздух, выдыхаемый из легких, содержит достаточное для дыхания количество кислорода.

Преимущества способа «изо рта в рот» заключаются в следующем: как показала практика, он более эффективен, чем другие ручные способы; объем воздуха, вдвухаемого в легкие взрослого человека, достигает 1000–1500 мл, т. е. в несколько раз больше, чем при других ручных способах, и вполне достаточен для целей искусственного дыхания; этот способ весьма прост, и им может овладеть за короткое время каждый человек, в том числе не имеющий медицинского образования; при этом способе исключена опасность повреждения органов пострадавшего; этот способ позволяет просто контролировать поступление воздуха в легкие пострадавшего — по расширению грудной клетки; он значительно менее утомителен.

Недостатком способа «изо рта в рот» является то, что он может вызвать взаимное инфицирование (заражение) и чувство брезгливости у оказывающего помощь. В связи с этим вдвухание воздуха производят через марлю, носовой платок и другую неплотную ткань, а также через специальную трубку.

Подготовка к искусственному дыханию. Прежде чем приступить к искусственному дыханию, необходимо быстро выполнить следующие операции:

а) освободить пострадавшего от стесняющей дыхание одежды — расстегнуть ворот, развязать галстук, расстегнуть пояс брюк и т. п.;

б) уложить пострадавшего на спину на горизонтальную поверхность — стол или пол;

в) максимально запрокинуть голову пострадавшего, положив под затылок ладонь одной руки, а второй надавливая на лоб (рис. 2.9, а) до тех пор, пока подбородок пострадавшего не окажется на одной линии с шеей (рис. 2.9, б). При этом положении головы язык отходит от входа в гортань, обеспечивая тем самым свободный проход воздуха в легкие, рот обычно открывается. Для сохранения достигнутого положения головы под лопатки следует подложить валик из свернутой одежды;

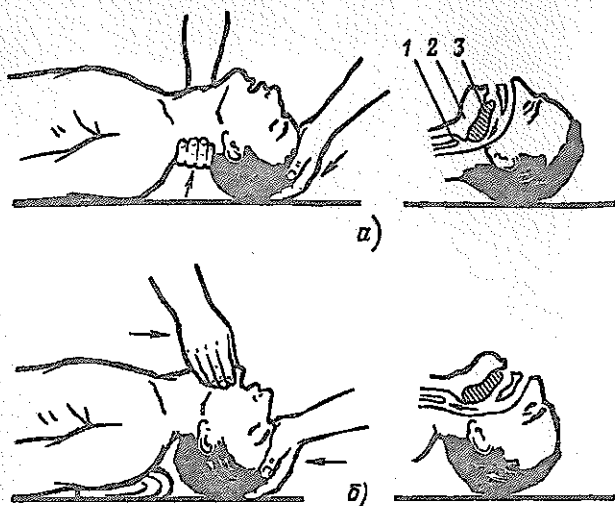


Рис. 2.9. Положение головы пострадавшего перед проведением искусственного дыхания по способу «изо рта в рот»:

а — начальное положение головы: вход в гортань 1 перекрыт надгортанником 2 и запавшим языком 3; *б* — положение головы, при котором начинают искусственное дыхание: голова запрокинута, нижняя челюсть выдвинута (надгортанник приподнялся, и язык отошел от входа в гортань, благодаря чему обеспечен свободный проход воздуха в нее)

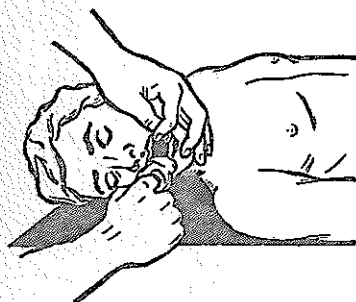


Рис. 2.10. Очистение полости рта и глотки от слизи, крови и т. п.

стить полость рта и глотки (рис. 2.10). После этого следует придать голове первоначальное положение и максимально запрокинуть ее, как указано выше (рис. 2.9).

Выполнение искусственного дыхания. По окончании подготовительных операций оказывающий помощь делает глубокий

г) пальцами обследовать полость рта, и если в нем обнаружится инородное содержимое (кровь, слизь и т. п.), удалить его, вынув одновременно зубные протезы, если они имеются. Для удаления слизи и крови необходимо голову и плечи пострадавшего повернуть в сторону (можно подвести свое колено под плечи пострадавшего), а затем с помощью носового платка или края рубашки, намотанного на указательный палец, очи-

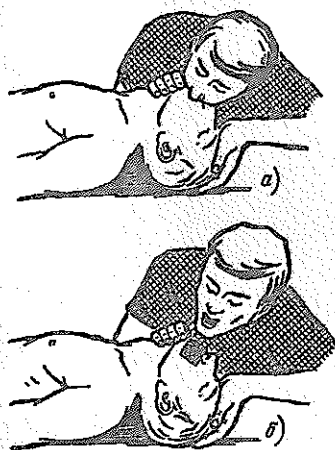


Рис. 2.11. Выполнение искусственного дыхания по способу «изо рта в рот»:

а — вдох; *б* — выдох



Рис. 2.12. Выдвижение нижней челюсти:

а — двумя руками; *б* — одной рукой

вдох и затем с силой выдыхает воздух в рот пострадавшего. При этом он должен охватить своим ртом весь рот пострадавшего, а своей щекой или пальцами зажать ему нос (рис. 2.11, *а*). Затем оказывающий помощь откидывается назад, освобождая рот и нос пострадавшего, и делает новый вдох. В этот период грудная клетка пострадавшего опускается и происходит пассивный выдох (рис. 2.11, *б*).

Маленьким детям вдвухание воздуха можно производить одновременно в рот и нос, при этом оказывающий помощь должен охватить своим ртом рот и нос пострадавшего.

Контроль за поступлением воздуха в легкие пострадавшего осуществляется по расширению грудной клетки при каждом вдвухании. Если после вдвухания воздуха грудная клетка пострадавшего не расправляется, это свидетельствует о непроходимости дыхательных путей. В таком случае необходимо выдвинуть нижнюю челюсть пострадавшего вперед, для чего оказывающий помощь должен поставить четыре пальца каждой руки позади углов нижней челюсти и, упираясь большими пальцами в ее край, выдвинуть нижнюю челюсть вперед так, чтобы нижние зубы стояли впереди верхних (рис. 2.12, *а*). Легче выдвинуть

нижнюю челюсть введенным в рот большим пальцем, как показано на рис. 2.12, б.

Наилучшая проходимость дыхательных путей пострадавшего обеспечивается при трех условиях: максимальном отгибании головы назад, открытии рта, выдвижении вперед нижней челюсти.

Иногда оказывается невозможным открыть рот пострадавшего вследствие судорожного сжатия челюстей. В этом случае искусственное дыхание следует производить по способу «*изо рта в нос*», закрывая рот пострадавшего при вдвухании воздуха в нос.

Взрослому человеку вдухание надо делать резко 10–12 раз в минуту (т. е. через 5–6 с), а ребенку — 15–18 раз (т. е. через 3–4 с). При этом поскольку у ребенка вместимость легких меньше, вдухание должно быть неполным и менее резким.

При появлении у пострадавшего первых слабых вдохов следует приучивать искусственный вдох к началу самостоятельного вдоха.

Искусственное дыхание необходимо проводить до восстановления глубокого ритмичного самостоятельного дыхания.

2.4. МАССАЖ СЕРДЦА

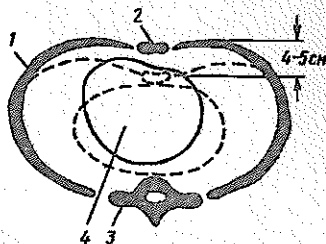
При оказании помощи пораженным током производится так называемый *непрямой или наружный массаж сердца* — ритмичное надавливание на грудь, т. е. на переднюю стенку грудной клетки пострадавшего. В результате этого сердце сжимается между грудиной и позвоночником и выталкивает из своих полостей кровь (рис. 2.13). После прекращения надавливания грудная клетка и сердце распрямляются и сердце заполняется кровью, поступающей из вен. У человека, находящегося в состоянии клинической смерти, грудная клетка из-за потери мышечного напряжения легко смещается (сдавливается) при нажатии на нее, обеспечивая необходимое сжатие сердца.

Цель массажа сердца — искусственное поддержание кровообращения в организме пострадавшего и восстановление нормальных естественных сокращений сердца.

Кровообращение, т. е. движение крови по системе кровеносных сосудов, необходимо для того, чтобы кровь доставляла кислород ко всем органам и тканям организма. Следовательно, кровь должна быть обогащена кислородом, что достигается искусственным дыханием. Таким образом, *одновре-*

Рис. 2.13. Схематическое изображение поперечного сечения грудной клетки:

1 — грудная клетка; 2 — грудинка; 3 — позвоночник; 4 — сердце. Пунктиром показано смещение грудной клетки и сердца при надавливании на грудину



менно с массажем сердца должно производиться искусственное дыхание.

Восстановление нормальных естественных сокращений сердца, т. е. его самостоятельной работы, при массаже происходит в результате механического раздражения сердечной мышцы (миокарда).

Давление крови в артериях, возникающее в результате непрямого массажа сердца, достигает сравнительно большого значения — 10—13 кПа (80—100 мм рт. ст.) и оказывается достаточным, чтобы кровь поступала ко всем органам и тканям тела пострадавшего. Это сохраняет жизнь организма в течение всего времени, пока производится массаж сердца (и искусственное дыхание).

Подготовка к массажу сердца является одновременно подготовкой к искусственному дыханию, поскольку массаж сердца должен производиться совместно с искусственным дыханием.

Для выполнения массажа необходимо уложить пострадавшего на спину на жесткую поверхность (скамью, пол или в крайнем случае подложить под спину доску). Необходимо также обнажить его грудь, расстегнуть стесняющие дыхание предметы одежды.

При производстве массажа сердца оказывающий помощь встает с какой-либо стороны пострадавшего и занимает такое положение, при котором возможен более или менее значительный наклон над ним.

Определив прощупыванием место надавливания (оно должно находиться примерно на два пальца выше мягкого конца грудины) (рис. 2.14), оказывающий помощь должен положить на него нижнюю часть ладони одной руки, а затем поверх первой руки положить под прямым углом вторую и надавливать на грудную клетку пострадавшего, слегка помогая при этом наклоном всего корпуса (рис. 2.15). Предплечья и плечевые кости рук оказывающего помощь должны быть разогнуты до отказа. Пальцы обеих рук должны быть сведены вместе и не должны касаться грудной клетки пострадавшего. Надавливать

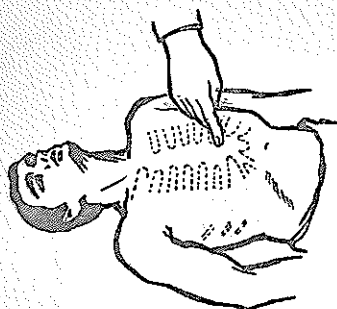


Рис. 2.14. Место надавливания на грудную клетку пострадавшего при выполнении наружного массажа сердца

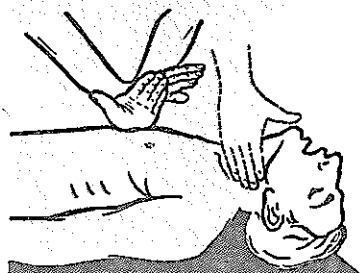


Рис. 2.15. Положение рук производящего массаж сердца и проверка пульса на сонной артерии (пунктир)

следует быстрым толчком, так чтобы сместить нижнюю часть грудины вниз на 3–4, а у полных людей на 5–6 см. Усилие при надавливании следует концентрировать на нижней части грудины, которая более подвижна. Следует избегать надавливания на верхнюю часть грудины, а также на окончания нижних ребер, так как это может привести к их перелому. Нельзя надавливать ниже края грудной клетки (на мягкие ткани), так как можно повредить расположенные здесь органы, в первую очередь печень.

Надавливание (толчок) на грудину следует повторять примерно 1 раз в секунду или несколько чаще, чтобы создать достаточный кровоток.

После быстрого толчка положение рук не должно меняться в течение примерно 0,5 с. После этого следует слегка выпрямиться и расслабить руки, не отнимая их от грудины.

У детей массаж производят только одной рукой, надавливая 2 раза в секунду.

Для обогащения крови пострадавшего кислородом одновременно с массажем сердца необходимо проводить искусственное дыхание по способу «изо рта в рот» (или «изо рта в нос»).

Если оказывающих помощь двое, то один из них должен производить искусственное дыхание, а другой — массаж сердца (рис. 2.16). Целесообразно каждому из них делать искусственное дыхание и массаж сердца поочередно, сменяя друг друга через каждые 5–10 мин. При этом порядок оказания помощи должен быть следующим: *после одного глу-*

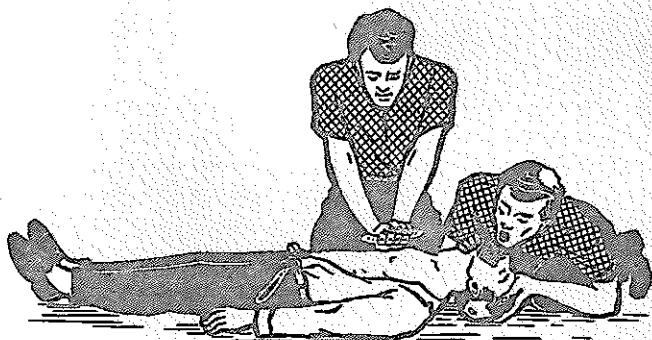


Рис. 2.16. Наружный массаж сердца и искусственное дыхание «из рта в рот», выполняемые двумя лицами

бокого вдувания производится пять надавливаний на грудную клетку. Если окажется, что после вдувания грудная клетка пострадавшего остается неподвижной (а это может свидетельствовать о недостаточном количестве вдуваемого воздуха), необходимо помощь оказывать в ином порядке: после двух глубоких вдуваний делать 15 надавливаний.

Следует остерегаться надавливать на грудину во время вдоха.

Если оказывающий помощь не имеет помощника и проводит искусственное дыхание и наружный массаж сердца один, нужно чередовать проведение указанных операций в следующем порядке: после двух глубоких вдуваний в рот или нос пострадавшего оказывающий помощь 15 раз надавливает на грудную клетку, затем снова производит два глубоких вдувания и повторяет 15 надавливаний для массажа сердца и т. д.

Эффективность наружного массажа сердца проявляется в первую очередь в том, что при каждом надавливании на грудину на сонной артерии четко прощупывается пульс. Для определения пульса указательный и средний пальцы накладывают на адамово яблоко пострадавшего и, продвигая пальцы вбок, осторожно ощупывают поверхность шеи до определения сонной артерии (рис. 2.15).

Другими признаками эффективности массажа является сужение зрачков, появление у пострадавшего самостоятельного дыхания, уменьшение синюшности кожи и видимых слизистых оболочек.

Контроль за эффективностью массажа осуществляет лицо, производящее искусственное дыхание.

Для повышения эффективности массажа рекомендуется на время наружного массажа сердца приподнять (на 0,5 м) ноги пострадавшего. Такое положение ног способствует лучшему притоку крови в сердце из вен нижней части тела.

Искусственное дыхание и наружный массаж сердца следует производить до появления самостоятельного дыхания и восстановления деятельности сердца или до передачи пострадавшего медицинскому персоналу.

О восстановлении деятельности сердца пострадавшего судят по появлению у него собственного, не поддерживаемого массажем регулярного пульса. Для проверки пульса через каждые 2 мин прерывают массаж на 2–3 с. Сохранение пульса во время перерыва свидетельствует о восстановлении самостоятельной работы сердца.

При отсутствии пульса во время перерыва необходимо немедленно возобновить массаж.

Длительное отсутствие пульса при появлении других признаков оживления организма (самостоятельного дыхания, сужения зрачков, попытки пострадавшего двигать руками и ногами и др.) служит признаком фибрилляции сердца. В этом случае необходимо продолжать оказание помощи пострадавшему до прибытия врача или до доставки пострадавшего в лечебное учреждение, где будет произведена дефибрилляция сердца.

В пути следует непрерывно делать искусственное дыхание и массаж сердца вплоть до момента передачи пострадавшего медицинскому персоналу.

2.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДЕФИБРИЛЛЯЦИЯ СЕРДЦА

Сердце человека, находящееся в состоянии фибрилляции, не может само по себе вернуться к нормальной, естественной работе. Более того, из-за нарастания гипоксии, т. е. недостатка кислорода в крови, работоспособность сердца быстро утрачивается и через некоторое время (в лучшем случае через несколько минут) фибрилляция сменяется полной остановкой сердца. В этом случае восстановить нормальную работу сердца оказывается значительно труднее, чем до момента его полной остановки.

Чтобы исключить полную остановку сердца из-за гипоксии, необходимо непрерывно производить его массаж и искусственное дыхание.

Дефибрилляция сердца, т. е. устранение его фибрилляции с восстановлением нормальной, естественной работы, может быть достигнута путем кратковременного воздействия большого тока на сердце пострадавшего. В этом случае под влиянием мощного электрического разряда

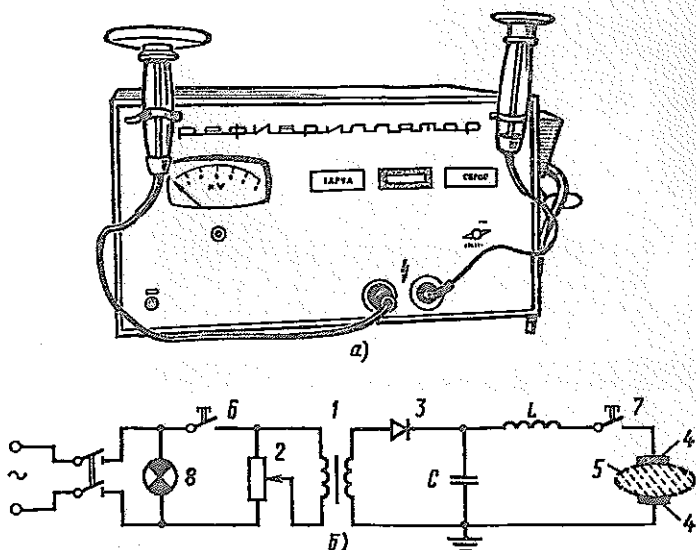


Рис. 2.17. Электрический дефибриллятор:

a — общий вид; *б* — упрощенная принципиальная схема: 1 — повышающий трансформатор 127 (220)/6000 В; 2 — регулятор напряжения; 3 — диод; 4 — электроды; 5 — грудная клетка пострадавшего; 6 — кнопка заряда; 7 — кнопка разряда; 8 — сигнальная лампа; L — индуктивное сопротивление 0,3 Гн; C — конденсатор 20–25 мкФ

жения наступает одновременное возбуждение, а следовательно, и сокращение всех волокон сердечной мышцы, которые до того сокращались в разное время. В результате происходит однократное сокращение сердца, аналогичное тому, которое имеет место при нормальной его работе. После этого могут восстановиться его естественные ритмичные сокращения. Дефибрилляция производится с помощью специального электрического аппарата — дефибриллятора (рис. 2.17), в создании которого ведущую роль сыграли советские медики и инженеры во главе с доктором медицинских наук Н. Л. Гуревичем.

Основной частью прибора является конденсатор постоянного тока емкостью 20–25 мкФ с рабочим напряжением 6 кВ. Зарядка конденсатора производится до напряжения 4,5–6 кВ от осветительной сети переменного тока 127 или 220 В. При этом повышение напряжения осуществляется с помощью однофазного трансформатора, а выпрямление тока — с помощью диода, которые также являются составными частями дефибриллятора. Разрядный ток этого конденсатора является как раз тем импульсом, который устраняет фибрилляцию сердца. Разряд конденсатора производится через грудную клетку пострадавшего, так чтобы сердце находилось на пути разрядного тока,

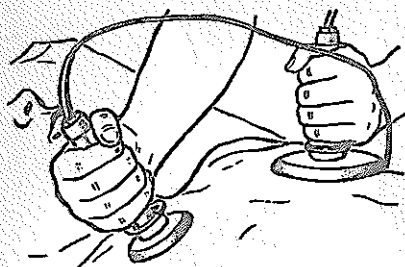


Рис. 2.18. Расположение электродов дефибрилятора на груди человека, находящегося в состоянии клинической смерти, при дефибрилляции сердца

значение которого составляет 15–20 А, а длительность прохождения — около 10 мс. Чтобы обеспечить одинаковую продолжительность разряда при различных значениях сопротивления грудной клетки, которое колеблется в пределах 60–80 Ом, в цепи конденсатора предусмотрено индуктивное сопротивление 0,3 Гн. Благодаря этому сопротивлению напряжение, приложенное к телу пострадавшего, т. е. напряжение между электродами 4 на рис. 2.17, оказывается в 3 раза меньше напряжения на конденсаторе и составляет 1,5–2 кВ.

У современных дефибрилляторов оба электрода одинаковые и представляют собой металлические диски с изолирующими рукоятками; при дефибрилляции электроды размещают на передней поверхности грудной клетки: один — под правой ключицей, а другой — непосредственно над областью сердца (рис. 2.18). Разрядная кнопка 7 (рис. 2.17,б) вмонтирована в изолирующую рукоятку одного из электродов.

Подготовка к дефибрилляции производится без прекращения массажа сердца и искусственного дыхания во избежание нарастания гипоксии. Подготовка заключается в подключении дефибриллятора к электрической сети, зарядке конденсатора и наложении электродов на тело пострадавшего.

Процесс дефибрилляции сводится к разряду конденсатора через сердце пострадавшего путем нажатия на разрядную кнопку 7. Разряд производится сразу после наложения на тело электродов, с тем чтобы не прерывать массаж сердца более чем на 3–5 с и тем самым не давать развиваться гипоксии.

В случае успешной дефибрилляции у пострадавшего вслед за разрядом возникает пульс. Иногда пульс появляется не сразу, а через 2–4 мин, во время которых необходимо делать искусственное дыхание и массаж сердца.

Электрическую дефибрилляцию сердца может производить только врач, владеющий этим методом.

Глава 3

ЯВЛЕНИЯ ПРИ СТЕКАНИИ ТОКА В ЗЕМЛЮ

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Стекание тока в землю происходит только через проводник, находящийся с нею в непосредственном контакте. Такой контакт может быть случайным или преднамеренным.

В последнем случае проводник или группа соединенных между собой проводников, находящихся в контакте с землей, называется заземлителем. Одиночный проводник, находящийся в контакте с землей, называется также одиночным заземлителем, или заземляющим электродом, или просто электродом, а заземлитель, состоящий из нескольких параллельно соединенных электродов, называется также групповым или сложным заземлителем.

Причинами стекания тока в землю является замыкание токоведущей части на заземленный корпус электрического оборудования, падение провода на землю, использование земли в качестве провода и т. п. Во всех этих случаях происходит резкое снижение потенциала (т. е. напряжения относительно земли*) φ_3 . В, заземлившейся токоведущей части до значения, равного произведению тока, стекающего в землю, I_3 , А, на сопротивление, которое этот ток встречает на своем пути, т. е. сопротивление заземлителя растеканию тока R_3 , Ом:

$$\varphi_3 = I_3 R_3. \quad (3.1)$$

Это явление, весьма благоприятное по условиям безопасности, используют как меру защиты от поражения током при случайном появлении напряжения на металлических нетоковедущих частях, которые с этой целью заземляют. Однако наряду с понижением потенциала заземлившейся токоведущей части при стекании тока в землю возникают и отрицательные явления, а именно появление потенциалов на заземлителе и находящихся в контакте с ним металлических частях, а также на поверхности грунта вокруг места стекания тока в землю. Возникающие при этом разности потенциалов отдельных точек це-

* Напряжением относительно земли называется напряжение относительно точки земли, находящейся вне зоны растекания тока замыкания на землю, т. е. точки, потенциал которой может быть условно принят равным нулю. Под потенциалом в данном случае понимается величина, равноценная напряжению относительно земли.

пи тока, в том числе точек на поверхности земли, могут достигать больших значений и представлять опасность для человека.

Значения потенциалов, их разностей и характер изменений, а следовательно, и обусловленная ими опасность поражения человека током зависят от многих факторов: значения тока, стекающего в землю; конфигурации, размеров, числа и взаимного расположения электродов, составляющих групповой заземлитель; удельного сопротивления грунта* и др. Воздействуя на некоторые из этих факторов, можно снизить разности потенциалов, действующие на человека, до безопасных значений.

Рассмотрению указанных вопросов и посвящена настоящая глава.

3.2. СТЕКАНИЕ ТОКА В ЗЕМЛЮ ЧЕРЕЗ ОДИНОЧНЫЙ ЗАЗЕМЛИТЕЛЬ

а) Распределение потенциала на поверхности земли

Стекание тока в землю сопровождается возникновением на заземлителе, в земле вокруг заземлителя, а следовательно, и на поверхности земли некоторых потенциалов.

Нам необходимо знать, от чего зависят значения этих потенциалов, как изменяются они при изменениях расстояния до заземлителя, т. е. знать уравнение потенциальной кривой.

Чтобы ответить на указанные вопросы, рассмотрим в качестве примеров случай стекания тока в землю через шаровой и стержневой заземлители. Шаровые заземлители на практике, как правило, не применяются. Однако использование их в качестве примеров удобно при изложении рассматриваемого вопроса, поскольку при этом резко упрощаются математические выводы. Для большего упрощения считаем, что земля во всем своем объеме однородна, т. е. в любой точке обладает одинаковым удельным сопротивлением ρ , Ом·м.

Шаровой заземлитель в земле на большой глубине. Пусть мы имеем шаровой заземлитель радиусом r , м, погруженный в землю на бесконечно большую глубину (так глубоко, что можно пренебречь влиянием поверхности земли). Через этот шар в землю стекает ток I_3 , А, который подается к заземлителю с помощью изолированного проводника (рис. 3.1). Требуется получить уравнение для потенциала ϕ , В, в некоторой точке объема

* Термины «земля», «грунт», «почва» применены в этой книге как равнозначные.

земли C , отстоящей от центра заземлителя на расстоянии x , м, или, иначе говоря, уравнение потенциальной кривой.

Поскольку, как нами принято, земля однородна, ток в ней будет растекаться от шара равномерно и симметрично во все стороны (по радиусам шара) и плотность его в земле будет убывать по мере удаления от заземлителя (по мере увеличения сечения слоя земли, через которое проходит ток). На расстоянии x , м, от центра шара плотность тока, A/m^2 ,

$$J = \frac{I_3}{4\pi x^2}. \quad (3.2)$$

В объеме земли, где проходит ток, возникает так называемое поле *растекания тока*. Теоретически оно простирается до бесконечности. Однако в действительных условиях уже на расстоянии 20 м от заземлителя сечение слоя земли, через которое проходит ток, оказывается столь большим, что плотность тока здесь практически равна нулю. Следовательно, в данном случае, т. е. при шаровом заземлителе малого радиуса, поле растекания можно считать ограниченным объемом сферы радиусом примерно 20 м.

При постоянном токе, а также при переменном частотой 50 Гц поле растекания тока в проводящей однородной среде можно рассматривать как стационарное электрическое поле, напряженность которого E , В/м, связана с плотностью тока соотношением

$$J = \vec{E}/\rho, \quad (3.3)$$

являющимся законом Ома в дифференциальной форме.

При этом линии напряженности электрического поля совпадают с линиями плотности тока, которые в рассматриваемом случае совпадают также с радиусами шарового заземлителя.

Как известно, напряженность электрического поля равна падению напряжения, отнесенного к единице длины линии напряженности поля, т. е. на единице пути, совпадающего с линией напряженности поля. В данном случае

$$E = dU/dx, \quad (3.4)$$

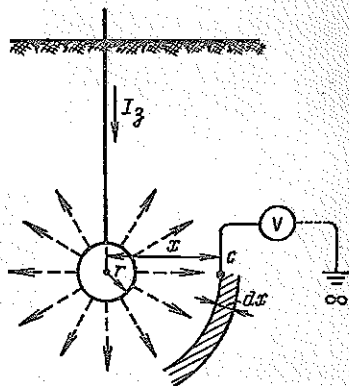


Рис. 3.1. Шаровой заземлитель, погруженный в землю на большую глубину

где dU — падение напряжения, В, на участке dx , м, т. е. в элементарном слое земли толщиной dx (см. рис. 3.1).

Пользуясь (3.2) — (3.4), легко определить потенциал любой точки в объеме земли, например точки C . Он равен падению напряжения в грунте на участке от x до бесконечности:

$$\varphi = \int_x^{\infty} dU,$$

где

$$dU = Edx = J\rho dx = \frac{I_3\rho}{4\pi x^2} dx. \quad (3.5)$$

Решив этот интеграл, получим искомое уравнение для потенциала точки C , т. е. уравнение потенциальной кривой

$$\varphi = \frac{I_3\rho}{4\pi x}. \quad (3.6)$$

Минимальный потенциал, т. е. $\varphi = 0$, будет иметь точка, отстоящая от заземлителя на расстоянии $x = \infty$. Практически область нулевого потенциала начинается на расстоянии примерно 20 м от заземлителя. Потенциал точек на поверхности земли в данном случае равен нулю, поскольку, как мы условились, заземлитель находится от поверхности земли на бесконечно большом расстоянии.

Максимальный потенциал будет при наименьшем значении x , равном радиусу заземлителя, т. е. непосредственно на заземлителе

$$\varphi_3 = \frac{I_3\rho}{4\pi r}. \quad (3.7)$$

Это — потенциал шарового заземлителя.

Шаровой заземлитель вблизи поверхности земли. Обычно заземлители погружают в землю на относительно небольшую глубину, при которой ее поверхность оказывает влияние на электрическое поле, искажая линии тока (рис. 3.2). Поэтому для нахождения выражений потенциалов в интересующих нас точках земли необходимо воспользоваться методом зеркальных изображений (рис. 3.3).

В этом случае потенциал φ в некоторой точке C будет равен сумме потенциалов φ_d и φ_f , создаваемых в этой точке полями

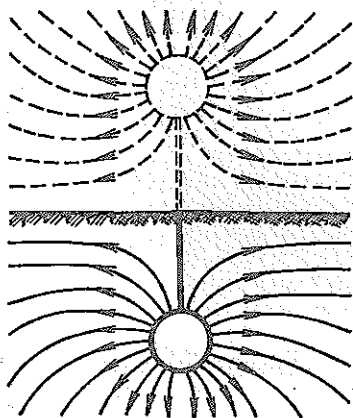


Рис. 3.2. Поле тока шарового заземлителя и его зеркального изображения

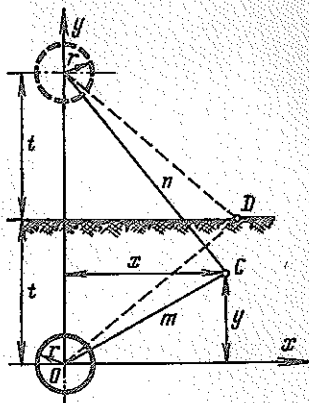


Рис. 3.3. Шаровой заземлитель вблизи поверхности земли и его зеркальное изображение

токов, стекающих как с действительного, так и с фиктивного заземлителей:

$$\varphi = \varphi_d + \varphi_{\text{ф.}}$$

Токи, стекающие с действительного и фиктивного заземлителей, одинаковы по абсолютному значению и знаку.

С учетом (3.6) можем написать

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{4\pi m} + \frac{I_3 \rho}{4\pi n} = \frac{I_3 \rho}{4\pi} \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{n} \right), \quad (3.8)$$

где I_3 — ток, стекающий в землю с заземлителя, А; ρ — удельное сопротивление земли, Ом·м; m и n — расстояния от точки C до центров действительного и фиктивного заземлителей соответственно, м.

Из рис. 3.3 видно, что

$$m = \sqrt{x^2 + y^2 + t^2},$$

$$n = \sqrt{x^2 + y^2 + (2t - y)^2},$$

где x, y — координаты точки C , м; t — заглубление заземлителя (расстояние от поверхности земли до центра шара), м.

Таким образом, потенциал точки C определяется следующим уравнением:

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{4\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + (2t - y)^2}} \right). \quad (3.9)$$

Пример 3.1. Ток $I_3 = 100$ А стекает в землю через металлический предмет правильной формы, который может быть условно уподоблен шару радиусом $r = 0,5$ м (рис. 3.4). Предмет погружен в землю на глубину $t_1 = 3$ м. Удельное сопротивление земли $\rho = 100$ Ом·м. Требуется определить потенциал на металлическом трубопроводе C , проложенном в землю на глубине $t_2 = 4$ м и на расстоянии по горизонтали от центра шара $x = 3$ м.

Решение. В данном случае следует воспользоваться выражением (3.8). При этом значения m и n равны

$$m = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{x^2 + (t_2 - t_1)^2} = \sqrt{3^2 + (4 - 3)^2} = 3,16 \text{ м};$$

$$n = \sqrt{x^2 + (t_1 + t_2)^2} = \sqrt{3^2 + (3 + 4)^2} = 7,6 \text{ м}.$$

По (3.8) находим искомый потенциал на трубопроводе C :

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{4\pi} \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{n} \right) = \frac{100 \cdot 100}{4\pi} \left(\frac{1}{3,16} + \frac{1}{7,6} \right) = 360 \text{ В}.$$

Если нас интересуют потенциалы точек, лежащих на поверхности земли, то для каждой такой точки, например точки B (рис. 3.3),

$$m = n = \sqrt{x^2 + t^2}, \quad (3.10)$$

а уравнение, определяющее ее потенциал, т. е. уравнение потенциальной кривой для точек на поверхности земли, согласно (3.8) и (3.10) имеет вид

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{2\pi} \frac{1}{m} \quad (3.11)$$

или

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{x^2 + t^2}}. \quad (3.12)$$

Потенциал заземлителя φ_3 , В, т. е. максимальный потенциал, будет, как это следует из (3.9), при $y = 0$ и, следовательно, при $x = r$ (рис. 3.3)

$$\varphi_3 = \frac{I_3 \rho}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{\sqrt{r^2 + 4t^2}} \right).$$

Рис. 3.4. К примеру 3.1. Определение потенциала на трубопроводе C , в точке D на поверхности земли и на заземлителе

Если $4t^2 \gg r$ (а так обычно бывает на практике), это уравнение примет вид

$$\varphi_3 = \frac{I_3 \rho}{4\pi r} \left(1 + \frac{r}{2t} \right). \quad (3.13)$$

Пример 3.2. Определить потенциал φ_D на поверхности земли в точке D , отстоящей от линии, соединяющей центры действительного и фиктивного шаровых заземлителей, на расстоянии $x = 3$ м (рис. 3.4), и потенциал заземлителя φ_3 . Условия те же, что и в примере 3.1.

Решение. По (3.12) находим потенциал в точке D :

$$\varphi_D = \frac{I_3 \rho}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{x^2 + t_1^2}} = \frac{100 \cdot 100}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3^2 + 3^2}} = 375 \text{ В.}$$

Потенциал заземлителя определяем по (3.13), принимая $(r^2 + 4t_1^2) = 4t_1^2$:

$$\varphi_3 = \frac{I_3 \rho}{4\pi r} \left(1 + \frac{r}{2t_1} \right) = \frac{100 \cdot 100}{4\pi \cdot 0,5} \left(1 + \frac{0,5}{2 \cdot 3} \right) = 1730 \text{ В.}$$

Шаровой заземлитель на поверхности земли, т. е. заглубленный так, что его центр находится на уровне земли (рис. 3.5), именуется полусферическим заземлителем.

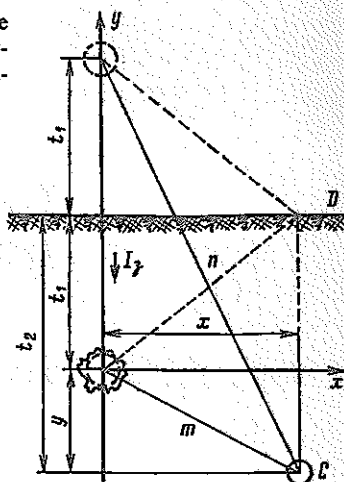
Для такого заземлителя уравнение потенциальной кривой на поверхности земли (так же как и в объеме земли) можно получить из (3.12), приняв в нем $t = 0$. Тогда

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{2\pi x}. \quad (3.14)$$

Это уравнение можно получить так же, как уравнение потенциальной кривой шарового заземлителя. В этом случае плотность тока в земле, A/m^2 , на расстоянии x , м, от центра полушара (рис. 3.4) определяется следующей зависимостью:

$$J = \frac{I_3}{2\pi x^2}, \quad (3.15)$$

а напряженность поля E , В, и соотношение J и E выражаются уравнениями (3.3) и (3.4).



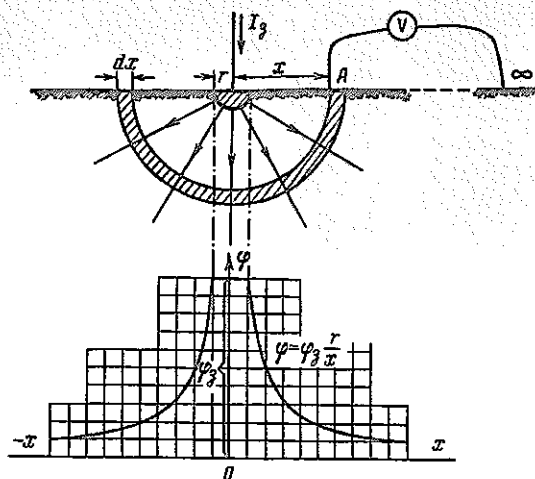


Рис. 3.5. Распределение потенциала на поверхности земли вокруг полушарового заземлителя

Потенциал любой точки в земле, в том числе точки A на поверхности земли, отстоящей от центра полушара на расстоянии x , будет равен падению напряжения в земле на участке от x до ∞ , В:

$$\varphi = \int_x^{\infty} dU = \frac{I_3 \rho}{2\pi} \int_x^{\infty} \frac{dx}{x^2}.$$

Решив этот интеграл, получим уравнение (3.14).

Потенциал заземлителя φ_3 , В, будет при x , равном радиусу заземлителя r , м, т. е.

$$\varphi_3 = \frac{I_3 \rho}{2\pi r}. \quad (3.16)$$

Разделив (3.14) на (3.16), получим

$$\varphi = \varphi_3 r \frac{1}{x}. \quad (3.17)$$

Обозначив произведение постоянных $\varphi_3 r$ через k , получим уравнение равносторонней гиперболы

$$\varphi = k \frac{1}{x}. \quad (3.18)$$

Следовательно, потенциал на поверхности земли вокруг полусферового заземлителя изменяется по закону гиперболы, уменьшаясь от максимального значения Φ_3 до нуля по мере удаления от заземлителя (рис. 3.5).

Очевидно, что для данного случая (как, впрочем, и для некоторых других одиночных заземлителей — стержневого, дискового и т. п.) эквипотенциальные линии на поверхности земли представляют собой концентрические окружности, центром которых является центр заземлителя.

В действительных условиях, когда грунт вокруг заземлителя неоднороден, эквипотенциальные линии могут значительно отличаться от окружностей и изменение потенциала при удалении от заземлителя будет происходить не по гиперболе, а по какой-то иной кривой.

Пример 3.3. На воздушной линии электропередачи вследствие повреждения изоляции возникло замыкание фазы на металлическую опору, что вызвало стекание тока в землю $I_3 = 15$ А (рис. 3.6). Определить потенциал металлического забора, ближайшая металлическая стойка которого А отстоит от оси опоры на расстоянии $x = 4$ м, и потенциал опоры. Удельное сопротивление земли $\rho = 100$ Ом·м.

Решение. Полагая, что фундамент опоры, через который ток стекает в землю, можно уподобить полушару радиусом $x = 0,25$ м, по (3.14) находим потенциал точки земли, отстоящей от центра полушара на расстояние x , т. е. потенциал металлического забора:

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{2\pi x} = \frac{15 \cdot 100}{2\pi \cdot 4} = 60 \text{ В.}$$

Потенциал опоры, т. е. потенциал заземлителя, определяется по (3.16):

$$\Phi_3 = \frac{I_3 \rho}{2\pi r} = \frac{15 \cdot 100}{2\pi \cdot 0,25} = 960 \text{ В.}$$

Стержневой заземлитель. Рассмотрим стержневой вертикальный заземлитель круглого сечения длиной l , м, и диаметром d , м, погруженный в землю так, чтобы его верхний конец был на уровне земли (рис. 3.7). С заземлителя стекает ток I_3 , А. Задача — найти выражения для расчета потенциала точек на поверхности земли и потенциала заземлителя.

Разбиваем заземлитель по длине на бесконечно малые участки каждый длиной dy и уподобляем их элементарным шаровым заземлителем диаметром dy , м.

С каждого такого участка в землю стекает ток, А,

$$dI_3 = \frac{I_3}{l} dy, \quad (3.19)$$

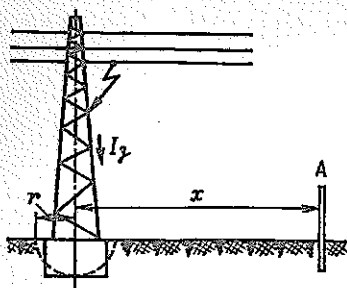


Рис. 3.6. К примеру 3.3. Определение потенциала металлической стойки A и опоры ВЛ

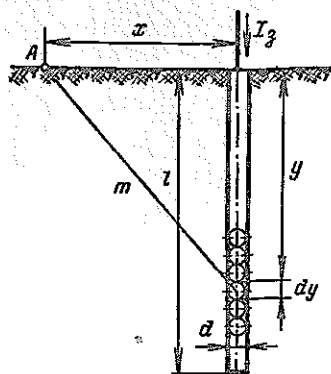


Рис. 3.7. К определению уравнения потенциальной кривой стержневого заземлителя

который обуславливает возникновение элементарного потенциала $d\phi$, B , в некоторой точке земли.

Пусть нас интересует точка A на поверхности земли, отстоящая от оси стержневого заземлителя на расстоянии x , м.

Потенциал этой точки, B , создаваемый одним элементарным шаровым заземлителем, согласно (3.11) будет

$$d\phi = \frac{dI_3 \rho}{2\pi} \frac{1}{m}.$$

Учитывая, что $m = \sqrt{x^2 + y^2}$ (см. рис. 3.7), и заменяя dI_3 его значением из (3.19), получаем

$$d\phi = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \frac{dy}{\sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (3.20)$$

Проинтегрировав это уравнение по всей длине стержневого заземлителя (от 0 до l), получим искомое уравнение для потенциала точки A , т. е. уравнение потенциальной кривой

$$\phi = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \int_0^l \frac{dy}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}. \quad (3.21)$$

Потенциал заземлителя ϕ_3 , B , будет, при $x = 0,5d$, м, т. е.

$$\phi_3 = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{(0,5d)^2 + l^2} + l}{0,5d}.$$

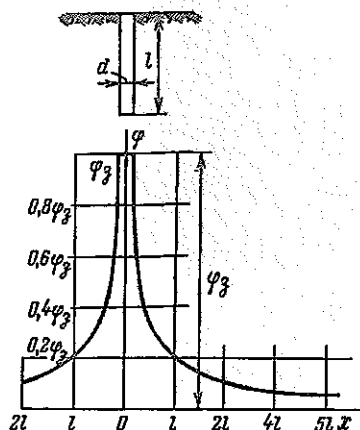


Рис. 3.8. Распределение потенциала на поверхности земли вокруг стержневого заземлителя с размерами $l:d = 50$ ($l = 2,5$ м; $d = 0,05$ м)

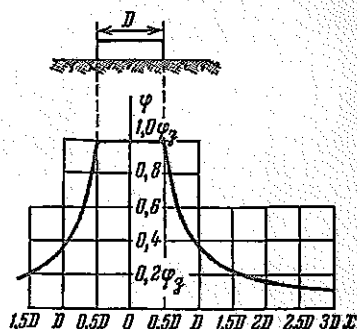


Рис. 3.9. Распределение потенциала на поверхности земли вокруг дискового заземлителя

Здесь $0,5d \ll l$, следовательно, первым слагаемым под корнем можно пренебречь. Тогда это уравнение примет вид

$$\varphi_3 = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}. \quad (3.22)$$

На рис. 3.8 показана потенциальная кривая стержневого заземлителя с отношением размеров $l:d = 50$.

При дисковом заземлителе — круглой пластине диаметром D , м, лежащей на земле (рис. 3.9), распределение потенциала на поверхности земли вдоль радиуса диска подчиняется следующему уравнению:

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{\pi D} \arcsin \frac{D}{2x}. \quad (3.23)$$

Потенциал заземлителя будет при $x = 0,5D$, м, т. е.

$$\varphi_3 = \frac{I_3 \rho}{2D}. \quad (3.24)$$

У протяженного заземлителя круглого сечения (стержень, провод и т. п.), находящегося на поверхности земли и заглубленного так, что его продольная ось совпадает с поверх-

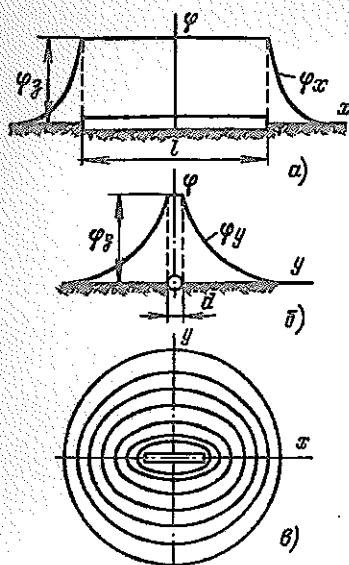


Рис. 3.10. Распределение потенциала на поверхности земли вокруг протяженного заземлителя круглого сечения, лежащего на земле:

a — потенциальная кривая вдоль оси заземлителя; *b* — потенциальная кривая в плоскости, перпендикулярной оси заземлителя и пересекающей его в середине; *c* — эквипотенциальные кривые на поверхности земли вокруг протяженного заземлителя

ностью земли (рис. 3.10), изменения потенциальной кривой различны в разных направлениях. Наиболее резко потенциал падает вдоль оси заземлителя, а наиболее плавно — поперек оси по линии, проведенной через его середину.

Уравнения потенциальных кривых этого заземлителя (рис. 3.10) имеют следующий вид:

a) вдоль оси заземлителя (по оси *x*), В,

$$\varphi_x = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{l^2 + d^2} + 2x}{\sqrt{l^2 + d^2} + 2x - 2l}, \quad (3.25)$$

где *l* и *d* — длина и диаметр сечения заземлителя, м.

При $l \gg d$ (что обычно имеет место на практике) уравнение упрощается:

$$\varphi_x = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{2x + l}{2x - l}; \quad (3.26)$$

b) поперек оси заземлителя (по оси *y*), В,

$$\varphi_y = \frac{I_3 \rho}{\pi l} \ln \frac{\sqrt{l^2 + 4y^2} + l}{2y}. \quad (3.27)$$

Потенциал заземлителя будет при наименьшем значении *x*, т. е. при $x = 0,5l$, если φ_3 вычисляется из (3.25), или при наименьшем значении *y*, т. е. при $y = 0,5d$, если φ_3 вычисляется из (3.27), т. е.

$$\varphi_3 = \frac{I_3 \rho}{\pi l} \ln \frac{2l}{d}. \quad (3.28)$$

Эквипотенциальные линии на поверхности земли вокруг протяженного заземлителя приближаются по форме к эллипсам; на большом расстоянии от заземлителя они переходят в окружности (рис. 3.10, в).

Потенциальная кривая заземлителя любой формы на относительно большом от него расстоянии (по сравнению с размерами заземлителя) приближается к потенциальной кривой полусферического заземлителя и описывается ее уравнением, В,

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{2\pi x},$$

где x — расстояние от заземлителя, м.

Важно отметить также и то, что потенциал земли на расстоянии свыше 20 м от заземлителя любой формы, как и в случае полусферического заземлителя, можно считать практически равным нулю.

б) Сопротивление одиночного заземлителя растеканию тока

Ток, проходящий через заземлитель в землю, преодолевает сопротивление, называемое сопротивлением заземлителя растеканию тока или просто сопротивлением растеканию. Оно имеет три слагаемых: сопротивление самого заземлителя, переходное сопротивление между заземлителем и грунтом (т. е. контактное сопротивление между поверхностью заземлителя и прилегающими к ней частицами земли) и, наконец, сопротивление грунта.

Два первых слагаемых по сравнению с третьим малы, поэтому ими пренебрегают и под сопротивлением заземлителя растеканию тока понимают сопротивление грунта растеканию тока, стекающего в землю с заземлителя данной формы и размеров*.

Сопротивление растеканию одиночного шарового заземлителя, погруженного в землю на бесконечно большую глубину (см. рис. 3.1), можно определить следующим образом. Слой грунта сферической формы элементарной толщиной dx , отстоящий от центра заземлителя на расстоянии x , можно рассматри-

* При весьма протяженных заземлителях сопротивление самого заземлителя (сопротивление металла) может достигать заметных значений и должно учитываться.

вать как линейный проводник длиной dx и сечением $4\pi x^2$; этот слой обладает элементарным сопротивлением dR , Ом, равным

$$dR = \rho \frac{dx}{4\pi x^2},$$

где dx и x — в м; ρ — в Ом·м.

Очевидно, сопротивление току, стекающему с заземлителя, оказывает вся масса земли, начиная от участков, прилегающих к заземлителю. Поэтому общее сопротивление растеканию тока при шаровом заземлителе, Ом, будет

$$R = \int_r^{\infty} \frac{\rho}{4\pi} \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho}{4\pi r}, \quad (3.29)$$

где r — радиус шарового заземлителя, м.

Сопротивление растеканию одиночных заземлителей других типов — стержневых, полосовых и т. п., широко применяемых в практике устройства заземлений, также определяется расчетом, но более сложным путем.

Между сопротивлением заземлителя растеканию тока R , Ом, потенциалом заземлителя ϕ_3 , В, и током, стекающим с него в землю, I_3 , А, существует следующая зависимость:

$$R = \phi_3 / I_3,$$

которая справедлива для любых одиночных и групповых заземлителей.

Поэтому из найденных нами ранее уравнений для потенциалов заземлителей — шарового, полушарового, стержневого вертикального у поверхности земли, дискового на земле и протяженного на земле [(3.7), (3.13), (3.16), (3.22), (3.24) и (3.28)] — легко получить уравнения для расчета сопротивлений растеканию этих заземлителей, разделив каждое из них на I_3 .

Уравнения для определения сопротивлений некоторых одиночных заземлителей приведены в табл. 3.1. Из этих уравнений видно, что сопротивление растеканию тока зависит не только от свойств грунта, но также от формы и геометрических размеров заземлителя. Этим и объясняется правомочность термина «сопротивление заземлителя растеканию тока», хотя при оценке его значения сопротивление собственно заземлителя (т. е. металлического электрода) не учитывается.

Поскольку плотность тока в земле на расстоянии больше 20 м от заземлителя практически равна нулю, можно считать,

что сопротивление стекающему току оказывает лишь соответствующий объем земли; для одиночного заземлителя это — полусфера радиусом 20 м. Однако при разных формах и размерах заземлителя сопротивление этого объема земли различно.

Пример 3.4. Определить сопротивления растеканию тока одиночных заземлителей: вертикального стержневого R_v и горизонтального полосового R_r .

Их размеры и размещение в земле показаны на рис. 3.11. Удельное сопротивление грунта $\rho = 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Решение. Подставив данные в соответствующие формулы (табл. 3.1), получим:

для вертикального электрода

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right) = \frac{100}{2\pi \cdot 10} \left(\ln \frac{2 \cdot 10}{0,04} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 5,5 + 10}{4 \cdot 5,5 - 10} \right) = 10,8 \text{ Ом};$$

для горизонтального электрода

$$R_r = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{dt} = \frac{100}{2\pi \cdot 10} \ln \frac{2 \cdot 10^2}{0,04 \cdot 0,8} = 14 \text{ Ом}.$$

в) Определение сопротивления растеканию заземлителей методом электростатической аналогии

Аналогия электростатического поля с электрическим полем в проводящей среде. Из основ электротехники известно, что между соотношениями, характеризующими электростатическое поле в диэлектрике, и соотношениями, характеризующими стационарное электрическое поле постоянных токов (а с некоторым приближением и переменных токов 50 Гц) в проводящей среде, существует формальная аналогия.

На этом основан так называемый метод электростатической аналогии, позволяющий в ряде случаев при одинаковой конфигурации проводящих тел решать задачи поля токов, пользуясь готовыми решениями соответствующих задач электростатики, и наоборот.

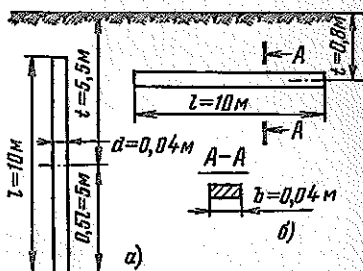
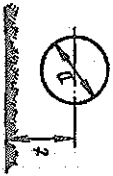
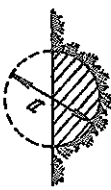
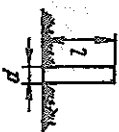
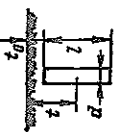
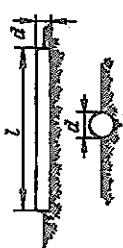
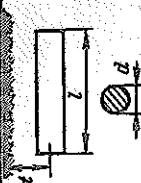
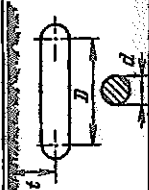
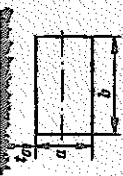


Рис. 3.11. К примеру 3.4. Одиночные заземлители — вертикальный стержневой (а) и горизонтальный полосовой (б)

Таблица 3.1. Формулы для вычисления сопротивлений одиночных заземлителей растеканию тока в однородном грунте

Тип заземлителя	Схема	Формула	Условия применения
1. Шаровой в земле		$R = \frac{\rho}{2\pi D} \left(1 + \frac{D}{4t} \right)$	$2t \gg D$
2. Полушаровой у поверхности земли		$R = \frac{\rho}{\pi D}$	—
3. Стержневой круглого сечения (трубчатый) или уголкового у поверхности земли		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$	$l \gg d$ Для уголка с шириной полки b $d = 0,95b$
4. То же в земле		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right)$	$l \gg d; t_0 \geq 0,5 \text{ м}$ Для уголка с шириной полки b $d = 0,95b$
5. Протяженный на поверхности земли (стержень, труба, полоса, кабель и т. п.)		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l^2}{d^2}$	$l \gg d$ Для полосы шириной b $d = 0,5b$

6. То же в земле		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{dt}$	$l \gg d; l \gg 4t$ Для полосы шириной b $d = 0,5b$
7. Кольцевой на поверхности земли		$R = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{8D}{d}$	$D \gg d$ Для полосы шириной b $d = 0,5b$
8. То же в земле		$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{4\pi D^2}{dt}$	$D \gg d; D \gg 2t$ Для полосы шириной b $d = 0,5b$
9. Круглая пластина на поверхности земли		$R = \rho/2D$	D — диаметр пластины
10. То же в земле		$R = \frac{\rho}{4D} \left(1 + \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{D}{\sqrt{16t_0^2 + D^2}} \right)$	$2t_0 \gg D$
11. Пластиначатый в земле (пластина поставлена на ребро)		$R = \frac{\rho}{2\pi a} \left(\ln \frac{4a}{b} + \frac{a}{4t_0} \right)$	$2t_0 \gg a$

Примечание. В формулах ρ — удельное сопротивление грунта, Ом·м (1 Ом·м — сопротивление куба грунта с ребром длиной 1 м). Все размеры — в метрах, при этом R будет выражено в омах.

В частности, этот метод позволяет довольно просто получать в некоторых случаях формулы для расчета сопротивлений растеканию тока заземлителей отдельных типов, а также сопротивлений прохождению тока между электродами и т. п. При этом, чтобы найти искомую формулу для определения сопротивления, необходимо в соответствующую формулу для емкости тела такой же конфигурации, как и заземлитель, подставить $1/R$ вместо C и $1/\rho$ вместо ϵ , т. е. вычислять сопротивление по формуле

$$R = \epsilon \rho / C,$$

где R , Ом, — сопротивление заземлителя растеканию тока в однородной среде с удельным сопротивлением ρ , Ом·м; C , Ф, — емкость рассматриваемой системы тел (заземлителя) в однородной среде с диэлектрической проницаемостью ϵ , Ф/м.

Для этой цели используют известные в электростатике формулы, определяющие:

емкость уединенного проводника, расположенного в безграничном пространстве;

емкость уединенного проводника, расположенного вблизи бесконечной непроницаемой плоскости;

емкость между уединенным проводником и расположенной вблизи бесконечной проводящей плоскостью;

емкость между двумя проводниками (конденсаторная емкость).

Рассмотрим несколько простейших случаев вывода формул методом электростатической аналогии для расчета сопротивления растеканию некоторых одиночных заземлителей R , Ом, как заглубленных в землю, так и расположенных на ее поверхности. При этом будем иметь в виду следующие положения:

1) емкость уединенного проводника, которую обозначим через C_0 , Ф, является скалярной величиной, равной отношению заряда этого проводника к его потенциалу, в предположении, что все другие заряженные проводники бесконечно удалены;

2) уединенный проводник может быть в виде одного проводящего тела или системы из нескольких проводящих тел, соединенных между собой тонким проводником с пренебрежимо малой емкостью;

3) емкость между уединенным проводником и бесконечной непроницаемой плоскостью равна половине емкости другого уединенного проводника, образованного соединением рассматриваемого проводника с его зеркальным изображением относительно указанной плоскости;

4) емкость между уединенным проводником и бесконечной проводящей плоскостью равна удвоенному значению емкости между этим проводником и его зеркальным изображением относительно указанной плоскости;

5) емкость между двумя проводниками является скалярной величиной, равной абсолютному значению отношения заряда одного из

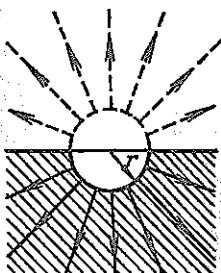


Рис. 3.12. К определению сопротивления растеканию полусферового заземлителя, расположенного у поверхности земли, методом зеркального изображения

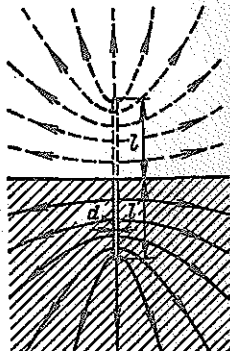


Рис. 3.13. К определению сопротивления растеканию вертикального стержневого заземлителя методом зеркального изображения

проводников к разности их потенциалов, при условии, что заряды обоих проводников одинаковы по значению, но противоположны по знаку и что все другие заряженные проводники бесконечно удалены.

Сопротивление растеканию шарового заземлителя радиусом r , м, погруженного в землю на бесконечно большую глубину, находим с помощью известной формулы для емкости уединенного шара, Φ ,

$$C_0 = 4\pi\epsilon r. \quad (3.30)$$

Произведя в этой формуле соответствующую замену: C_0 на $1/R_0$, ϵ на $1/\rho$, получим искомое выражение

$$R_0 = \frac{\rho}{4\pi r}. \quad (3.31)$$

Сопротивление растеканию полусферового заземлителя радиусом r , м, получаем с использованием метода зеркального изображения (рис. 3.12), полагая, что воздушное пространство над поверхностью земли, где размещено зеркальное изображение полусфера, заполнено средой с таким же, как у земли, удельным сопротивлением ρ .

При этих условиях мы имеем дело с рассмотренным случаем, когда шар находится в однородной безграничной среде и, следовательно, для него применимы формулы (3.30) и (3.31). Однако поскольку действительный электрод является полусфером, емкость его в 2 раза меньше, а сопротивление растеканию в 2 раза больше, чем шара. Значит, искомое сопротивление растеканию полусферового заземлителя

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi r}. \quad (3.32)$$

Сопротивление растеканию стержневого заземлителя длиной l , м, и диаметром d , м, размещенного в земле вертикально у ее поверхности, найдем с помощью приближенных формул для емкости уединенных стержней, Φ [9, с. 53, 168]:

а) малой длины ($8d \geq l > 0$)

$$C_0 \approx 2\pi\epsilon d [0,6372 + 0,5535(2l/d)^{0,76}]; \quad (3.33)$$

б) большой длины ($l > 50d$)

$$C_0 \approx 2\pi\epsilon l / \ln \frac{2l}{d}. \quad (3.34)$$

Здесь, так же как и при полушаровом заземлителе, пользуемся методом зеркального изображения (рис. 3.13). При этом длина уединенного стержня, составленного, как это видно на рис. 3.13, из действительного стержня и его зеркального изображения, оказывается равной $2l$. Следовательно, в (3.33) и (3.34) надо заменить l на $2l$. Емкость же действительного стержня по той же причине будет в 2 раза меньше, чем уединенного, т. е. выражения (3.33) и (3.34) надо разделить на два.

Далее, преобразуя соответствующим образом эти выражения, получаем искомые формулы для расчета сопротивления растеканию стержневого вертикального заземлителя, Ом:

а) малой длины ($8d \geq l > 0$)

$$R_0 \approx \frac{\rho}{\pi d} \left[0,6372 + 0,5535 \left(\frac{2l}{d} \right)^{0,76} \right]; \quad (3.35)$$

б) большой длины ($l > 50d$)

$$R_0 \approx \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}. \quad (3.36)$$

Сопротивление растеканию тонкой прямоугольной пластины размером $a \times b$, м, погруженной в землю вертикально на глубину t_0 , м (рис. 3.14, а), определяем, пользуясь приближенной формулой емкости уединенного проводника, состоящего из двух соединенных между собой одинаковых прямоугольных пластин, лежащих в одной плоскости (компланарных), как показано на рис. 3.14, б. Две стороны этих пластин параллельны, а две другие лежат на одной прямой. Емкость такого проводника C_0 , Ф, равна [9, с. 115]

$$C_0 \approx 4\pi\epsilon a / \left(\ln \frac{4a}{b} + \frac{a}{4t_0} \right). \quad (3.37)$$

Эта формула действительна при условии $2t_0 \geq a$.

Сопротивление такого проводника (состоящего из двух пластин), Ом, согласно методу электростатической аналогии равно

$$R_0 \approx \frac{\rho}{4\pi a} \left(\ln \frac{4a}{b} + \frac{a}{4t_0} \right). \quad (3.38)$$

В данном случае одну из пластин можно рассматривать как зеркальное изображение другой, поэтому искомое сопротивление растеканию одной пластины будет в 2 раза больше:

$$R_0 \approx \frac{\rho}{2\pi a} \left(\ln \frac{4a}{b} + \frac{a}{4t_0} \right). \quad (3.39)$$

Условие при этом то же: $2t_0 \geq a$.

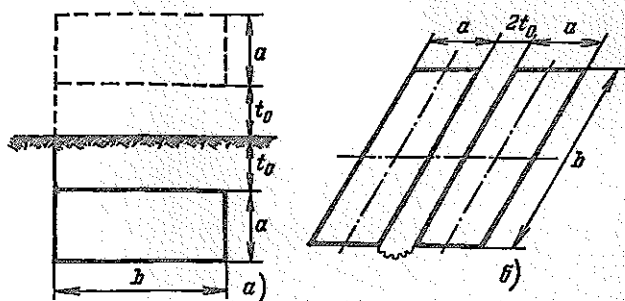


Рис. 3.14. Пластина́тые заземлители:

a — прямоугольная пластина, погруженная в землю вертикально, и ее зеркальное изображение; b — две соединенные между собой компланарные прямоугольные пластины, лежащие на поверхности земли

Небезынтересно отметить следующие обстоятельства.

1. Если заземлитель состоит из двух компланарных соединенных прямоугольных пластин (рис. 3.14, б), лежащих на поверхности земли, то нетрудно показать, что сопротивление растеканию такого заземлителя определяется также полученным выражением (3.39), в котором $2t_0$ — расстояние между пластинами, м.

2. Если у этого заземлителя принять $2t_0 = \infty$, то получим из (3.39) выражение для сопротивления растеканию двух параллельно соединенных пластин, поля тока которых не влияют одно на другое:

$$R_0 \approx \frac{\rho}{2\pi a} \ln \frac{4a}{b}.$$

Увеличив это сопротивление вдвое, получим сопротивление растеканию тока одной прямоугольной пластины, лежащей на поверхности земли, Ом:

$$R_0 \approx \frac{\rho}{\pi a} \ln \frac{4a}{b}. \quad (3.40)$$

3. Если пластина, лежащая на поверхности земли, квадратная, т. е. $a = b$, то (3.40) примет вид

$$R_0 \approx 0,444\rho/a. \quad (3.41)$$

4. Если пластина, лежащая на поверхности земли, круглая (диск) той же площади, что и квадратная, т. е.

$$a^2 = \pi D^2/4,$$

то, решив совместно последние два уравнения относительно R_0 , получим выражение для сопротивления растеканию диска, лежащего на земле:

$$R_0 \approx \rho/2D, \quad (3.42)$$

где D — диаметр диска, м.

3.3. СТЕКАНИЕ ТОКА В ЗЕМЛЮ ЧЕРЕЗ ГРУППОВОЙ ЗАЗЕМЛИТЕЛЬ

По условиям безопасности заземление должно обладать сравнительно малым сопротивлением, обеспечить которое можно путем увеличения геометрических размеров одиночного заземлителя (электрода) или применения нескольких параллельно соединенных электродов, именуемых в совокупности групповым заземлителем.

Элементарный подсчет показывает, что второй путь во много раз экономичнее по затрате металла и другим условиям. Кроме того, при нескольких электродах можно выровнять потенциальную кривую на территории, где они размещаются, что в ряде случаев играет решающую роль в обеспечении безопасности обслуживающего персонала. Поэтому на практике применяют, как правило, групповые заземлители.

а) Распределение потенциала на поверхности земли

При бесконечно больших расстояниях между электродами группового заземлителя (обычно более 40 м) поля растекания токов вокруг них практически не взаимодействуют, т. е. ток каждого электрода проходит по «своему» отдельному участку земли, по которому токи других заземлителей не проходят. В этом случае вокруг каждого электрода возникают самостоятельные потенциальные кривые, взаимно не пересекающиеся (рис. 3.15). При этом потенциалы всех электродов равны, даже если электроды имеют разные размеры, а следовательно, через них проходят токи разного значения и их потенциальные кривые имеют разную форму.

При малых расстояниях между электродами и группового заземлителя (менее 40 м) поля растекания токов как бы накладываются одно на другое, а потенциальные кривые электродов взаимно пересекаются и, складываясь, образуют непрерывную суммарную потенциальную кривую группового заземлителя (рис. 3.16).

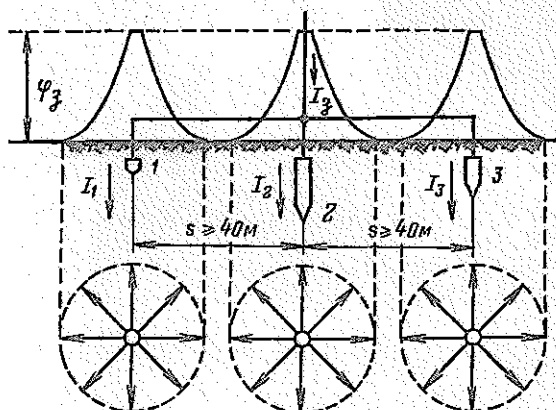


Рис. 3.15. Потенциальные кривые и поля растекания тока группового заземлителя при расстояниях между электродами $s \geq 40 \text{ м}$:

1, 2, 3 — электроды.

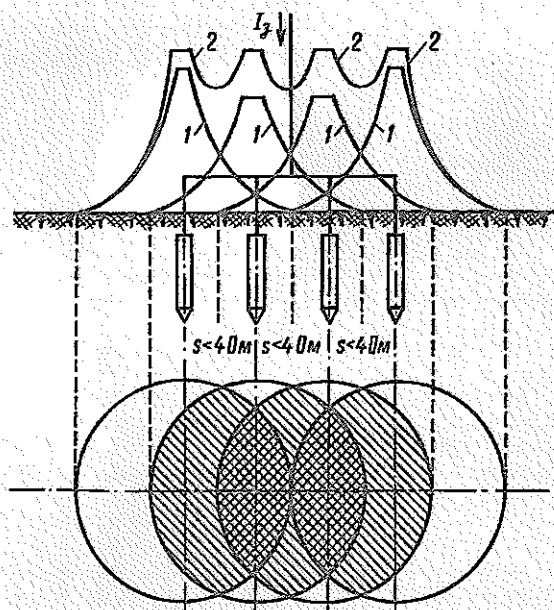


Рис. 3.16. Потенциальная кривая и поле растекания тока группового заземлителя при расстояниях между электродами $s < 40 \text{ м}$:

1 — собственные потенциальные кривые электродов; 2 — суммарная потенциальная кривая

В результате поверхность земли на участках между электродами приобретает некоторый потенциал. При этом форма суммарной потенциальной кривой зависит от расстояния между электродами, их взаимного расположения, числа, формы и размеров.

Потенциальная кривая простейшего группового заземлителя, состоящего из двух одинаковых полушаровых электродов, показана на рис. 3.17 жирной линией. Она получена сложением потенциальных кривых обоих электродов. Нетрудно определить уравнение этой кривой и, в частности, наиболее интересного ее участка — между электродами. Поскольку эти электроды одинаковы и находятся в одинаковых условиях, ток, стекающий в землю, делится между ними поровну и, следовательно, их потенциальные кривые идентичны.

Для нашей задачи важен участок между электродами, т. е. кривые φ_1 и φ_2 , которые в системе прямоугольных координат φ, x с ординатой, проходящей через центр левой полусферы (рис. 3.17), выражаются следующими уравнениями, В:

$$\varphi_1 = \varphi_0 r/x; \quad (3.43)$$

$$\varphi_2 = \varphi_0 r/(s-x). \quad (3.44)$$

где φ_0 — собственный потенциал полусферы, определяемый по формуле (3.16), В; r — радиус полусферы, м; s — расстояние между центрами полусфер, м.

Искомое уравнение суммарной потенциальной кривой $\varphi, В$, на участке между заземлителями определяется суммированием уравнений (3.43) и (3.44):

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \varphi_0 \frac{rs}{x(s-x)}. \quad (3.45)$$

Наибольший потенциал на поверхности земли будет при наименьшем значении x , т. е. при $x=r$. Это — потенциал каждого из двух полушаровых электродов, входящих в состав рассматриваемого группового заземлителя, или (что одно и то же) потенциал группового заземлителя, В,

$$\varphi_{rp} = \varphi_0 s/(s-r). \quad (3.46)$$

Разделив (3.45) на (3.46), получим уравнение той же кривой, но выраженное через потенциал группового заземлителя, В,

$$\varphi = \varphi_{rp} \frac{r(s-r)}{x(s-x)}. \quad (3.47)$$

Наименьший потенциал на поверхности земли будет между электродами в точке В, лежащей на середине отрезка s , т. е. при $x = 0,5s$:

$$\varphi_B = \varphi_0 \cdot 4r/s \quad (3.48)$$

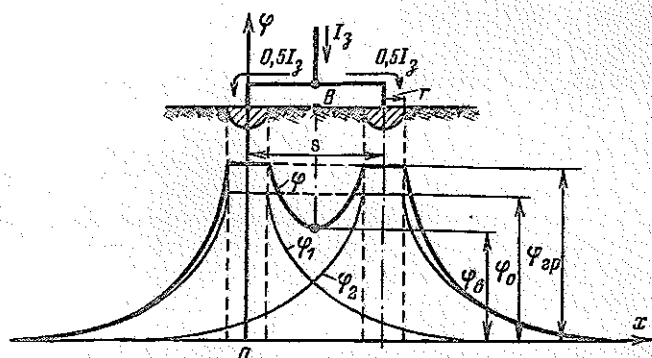


Рис. 3.17. Потенциальная кривая группового заземлителя, состоящего из двух одинаковых полушаровых электродов

или

$$\varphi_B = \varphi_{гр} \cdot 4r(s-r)/s^2. \quad (3.49)$$

Из (3.49) видно, что с уменьшением s потенциал φ_B возрастает, приближаясь к потенциалу группового заземлителя (наименьшее значение $s = 2r$). Одновременно увеличивается и $\varphi_{гр}$ [см. (3.46)], приближаясь к $2\varphi_0$.

При большом значении s , например при $s \geq 40$ м, $\varphi_B \approx 0$, а $\varphi_{гр} \approx \varphi_0$.

Таким образом, с уменьшением расстояния между электродами группового заземлителя (начиная от 40 м) происходит выравнивание потенциала на поверхности земли между электродами.

Подобный эффект наблюдается и при других групповых заземлителях, т. е. при иной форме электродов, большем их числе и любом взаимном размещении.

6) Потенциал группового заземлителя

Поскольку электроды группового заземлителя связаны между собой электрически, они имеют одинаковый потенциал, являющийся потенциалом группового заземлителя $\varphi_{гр}$.

Совершенно очевидно, что потенциал каждого электрода группового заземлителя состоит из собственного потенциала, обусловленного стеканием через него тока, и потенциалов, наведенных на нем полями других электродов:

$$\varphi_{гр} = \varphi_{01} + \sum_2^n \varphi_{0n}. \quad (3.50)$$

где φ_{01} — собственный потенциал первого электрода, В, он равен произведению тока I_1 , А, стекающего через этот электрод в землю, на сопротивление его растеканию R_1 , Ом:

$$\varphi_{01} = I_1 R_1; \quad (3.51)$$

n — количество электродов в групповом заземлителе; φ_n — потенциал, наведенный на первом электроде одним из соседних, В, φ_n определяется по уравнению потенциальной кривой этого соседнего электрода с учетом расстояния между ними. Например, если наводимым электродом является полушар радиусом r , то наводимый им потенциал φ_n на другом электроде любой формы определяется уравнением (3.43):

$$\varphi_n = \varphi_0 r / x. \quad (3.52)$$

где φ_0 — собственный потенциал полушара, В; x — ближайшее расстояние от центра полушара до поверхности электрода, на котором определяется φ_n , м.

Например, для случая, показанного на рис. 3.17, один полушар наводит на другом потенциал, В,

$$\varphi_n = \varphi_0 r / (s - r). \quad (3.53)$$

В общем случае собственные потенциалы электродов не равны, как не равны и потенциалы, наводимые другими электродами. Однако сумма собственного и всех наведенных на электроде потенциалов для всех электродов одинакова и равна $\varphi_{гр}$. Иначе говоря, каждый электрод, входящий в состав группового заземлителя, будет иметь потенциал, равный потенциалу группового заземлителя $\varphi_{гр}$ (рис. 3.18).

Если групповой заземлитель состоит из одинаковых электродов, размещенных по вершинам правильного многоугольника, то у электродов одинаковыми оказываются токи, стекающие через них в землю, а следовательно, и собственные потенциалы φ_0 и сумма наведенных на каждом из них потенциалов $\sum_{n=1} \varphi_n$.

В этом случае уравнение (3.50) может быть записано так:

$$\varphi_{гр} = \varphi_0 + \sum_{n=1} \varphi_n. \quad (3.54)$$

Если одинаковые электроды группового заземлителя расположены на одинаковых

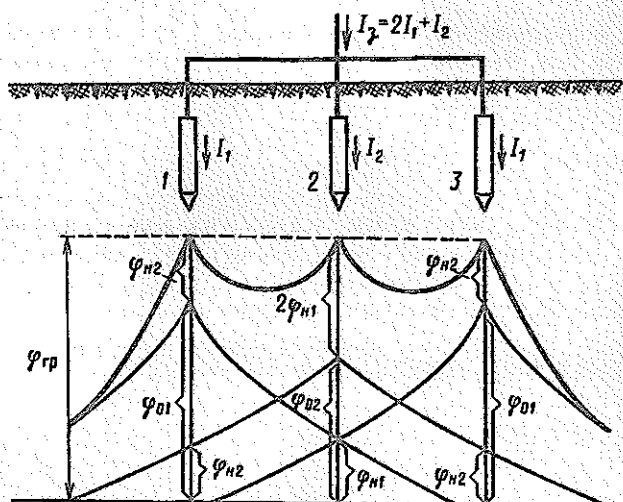


Рис. 3.18. Потенциальная кривая группового заземлителя, состоящего из трех одинаковых электродов, размещенных на одной прямой:

φ_{01} , φ_{02} — собственные потенциалы электродов; $\varphi_{н1}$, $\varphi_{н2}$ — потенциалы, наведенные другими электродами

расстояниях один от другого (а это может быть только при двух электродах или трех, размещенных в вершинах равностороннего треугольника), то у них оказываются одинаковыми не только собственные потенциалы φ_0 , но и потенциалы, наводимые каждым из них на других электродах $\varphi_{н}$. Для этих частных случаев уравнение (3.50) принимает вид

$$\varphi_{гр} = \varphi_0 + (n - 1) \varphi_{н}, \quad (3.55)$$

где n — количество электродов (2 или 3).

При бесконечно больших расстояниях между электродами (больше 40 м) каждый из них находится вне полей растекания тока с других электродов (рис. 3.15). Поэтому наведенные потенциалы на электродах отсутствуют, а потенциал группового заземлителя, который в этом случае часто обозначается $\varphi_{г}$, имеет наименьшее значение, равное значению собственного потенциала любого электрода, входящего в состав группового заземлителя:

$$\varphi_{г} = \varphi_{01} = \varphi_{02} = \dots = \varphi_{0n} \quad (3.56)$$

или

$$\varphi_{\infty} = I_1 R_1 = I_2 R_2 = \dots = I_n R_n, \quad (3.57)$$

где $I_1, I_2, \dots, I_n$ — токи, стекающие через электроды, А; $R_1, R_2, \dots, R_n$ — сопротивления растеканию электродов, Ом.

Если при этом электроды одинаковы, то и токи, стекающие через них в землю, одинаковы:

$$I_1 = I_2 = \dots = I_n = I_3/n.$$

Тогда потенциал группового заземлителя, В,

$$\varphi_{\infty} = I_3 R_0/n, \quad (3.58)$$

где R_0 — сопротивление растеканию одного электрода, Ом; I_3 — ток, стекающий через групповой заземлитель, А.

Пример 3.5. Ток $I_3 = 30$ А стекает в землю через групповой заземлитель, состоящий из трех одинаковых полушаровых электродов радиусом $r = 0,5$ м, размещенных в вершинах равностороннего треугольника (рис. 3.19). Определить $\varphi_{гр}$ при расстояниях между центрами электродов, равных 2,5; 10; 40 м; ρ земли равно 120 Ом·м (земля однородная).

Решение. Поскольку электроды одинаковы и находятся в одинаковых условиях, у них равны:

сопротивления растеканию тока

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi r} = \frac{120}{2\pi \cdot 0,5} = 40 \text{ Ом};$$

токи, стекающие через них в землю,

$$I_0 = I_3/n = 30/3 = 10 \text{ А};$$

собственные потенциалы

$$\varphi_0 = I_0 R_0 = 10 \cdot 40 = 400 \text{ В}.$$

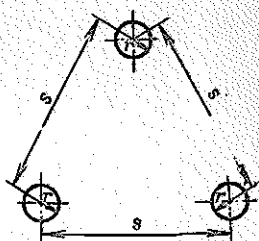
На основании уравнения (3.55) потенциал группового заземлителя

$$\varphi_{гр} = \varphi_0 + (n-1)\varphi_n.$$

С учетом (3.53)

$$\varphi_{гр} = \varphi_0 + (n-1)\varphi_0 \frac{r}{s-r}.$$

Рис. 3.19. Групповой заземлитель из трех полусферовых электродов, размещенных в вершинах равностороннего треугольника на поверхности земли



Подставив значения $n = 3$ и $r = 0,5$ м и произведя простейшие преобразования, получим

$$\varphi_{гр} = \varphi_0 \frac{s+r}{s-r} = 400 \frac{s+0,5}{s-0,5}.$$

Искомые значения потенциалов группового заземлителя будут:

при $s = 2,5$ м $\varphi_{гр} = 1,5\varphi_0 = 600$ В;

при $s = 10$ м $\varphi_{гр} = 1,1\varphi_0 = 440$ В;

при $s = 40$ м $\varphi_{гр} \approx \varphi_0 = 400$ В.

в) Сопротивление группового заземлителя растеканию тока

При очень больших расстояниях между электродами группового заземлителя (практически больше 40 м) сопротивление всей группы R_∞ , Ом, определяется, как и в случае параллельного соединения активных сопротивлений, следующим выражением:

$$R_x = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_0}.$$

Если электроды одинаковы, а следовательно, одинаковы и их сопротивления растеканию R_0 , то сопротивление группового заземлителя, Ом, будет

$$R_x = R_0 / n.$$

При расстояниях между электродами меньше 40 м происходит взаимодействие полей растекания тока, в результате чего на общих участках земли, по которым проходят токи, стекающие с нескольких электродов, увеличивается плотность тока (см. рис. 3.16) и, следовательно, на этих участках увеличивается падение напряжения. Это явление, равноценное уменьшению сечения земли, по которому проходит ток от заземлителя, приводит к увеличению сопротивления растеканию как отдельных электродов, составляющих групповой заземлитель, так и заземлителя в целом. Иначе говоря, при уменьшении расстояния между электродами до 40 м

и менее сопротивление растеканию группового заземлителя увеличивается, а проводимость соответственно уменьшается. Эта зависимость выражается следующими соотношениями:

$$R_{гр} = R_{\infty} / \eta;$$

$$\frac{1}{R_{гр}} = \eta \frac{1}{R_{\infty}},$$

где $R_{гр}$ — действительное значение сопротивления растеканию группового заземлителя при данном размещении его электродов, Ом; R_{∞} — наименьшее значение сопротивления растеканию группового заземлителя (т. е. при расстояниях между его электродами более 40 м), Ом; η — коэффициент, характеризующий уменьшение проводимости заземлителей и называемый коэффициентом использования проводимости группового заземлителя или просто коэффициентом использования. Иногда η именуется коэффициентом экранирования.

Таким образом, сопротивление группового заземлителя, Ом, в общем случае выражается следующим уравнением:

$$R_{гр} = \frac{1}{\eta \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_0}}.$$

При равенстве сопротивлений растеканию всех электродов это уравнение примет вид

$$R_{гр} = R_0 / \eta n. \quad (3.59)$$

г) Коэффициент использования группового заземлителя

Коэффициент использования проводимости заземлителя, или просто коэффициент использования, есть отношение действительной проводимости группового заземлителя $1/R_{гр}$ к наибольшей возможной его проводимости $1/R_{\infty}$, т. е. при бесконечно больших расстояниях между его электродами

$$\eta = R_{\infty} / R_{гр}.$$

Величина η может быть выражена также отношением соответствующих потенциалов группового заземлителя

$$\eta = \frac{I_3 R_{\infty}}{I_3 R_{гр}} = \frac{\varphi_{\infty}}{\varphi_{гр}} \quad (3.60)$$

или, поскольку согласно (3.56) $\varphi_{\infty} = \varphi_{01}$, с учетом (3.50)

$$\eta = \varphi_{01} / (\varphi_{01} + \sum_2^n \varphi_n). \quad (3.61)$$

Для частного случая, когда групповой заземлитель состоит из одинаковых электродов, размещенных по вершинам правильного многоугольника, уравнение (3.61) имеет вид

$$\eta = \varphi_0 / (\varphi_0 + \sum_{n=1}^n \varphi_n). \quad (3.62)$$

Значение коэффициента использования зависит от формы, размеров и размещения электродов, составляющих групповой заземлитель, а также от их числа n и расстояния s между соседними электродами. Так, с увеличением s уменьшается взаимодействие полей единичных заземлителей и η возрастает; при $s \geq 40$ м проводимость заземлителей используется полностью и $\eta = 1$. С увеличением числа заземлителей (при неизменном s) повышается взаимодействие полей и, следовательно, снижается η .

В качестве примера определим выражения для расчета коэффициента использования простейших групповых заземлителей, состоящих из двух и трех одинаковых полушаровых электродов.

При двух электродах и расстоянии между ними s (рис. 3.17) коэффициент использования согласно (3.62) и (3.53) будет равен

$$\eta = \frac{\varphi_0}{\varphi_0 + \varphi_n} = \frac{\varphi_0}{\varphi_0 + \varphi_0 \frac{r}{s-r}} = \frac{s-r}{s}.$$

Например, при $s = 2,5$ м и $r = 0,5$ м $\eta = 0,8$.

При трех электродах того же радиуса, расположенных в вершинах равностороннего треугольника со стороной s (рис. 3.19), коэффициент использования будет меньше:

$$\eta = \frac{\varphi_0}{\varphi_0 + 2\varphi_n} = \frac{\varphi_0}{\varphi_0 + 2\varphi_0 \frac{r}{s-r}} = \frac{s-r}{s+r}.$$

В самом деле, при $s = 2,5$ м и $r = 0,5$ м $\eta = 0,67$.

Этот же результат мы получим, если воспользуемся формулой (3.60), причем числовые значения φ_a и $\varphi_{гр}$ возьмем из при-

мера 3.5, решенного для того же заземлителя: $\varphi_{\text{гр}} = 600$ В (при $s = 2,5$ м) и $\varphi_{\infty} = 400$ В. По (3.60) получаем

$$\eta = 400/600 = 0,67.$$

При иной форме электродов и большем их числе определять коэффициент использования расчетным путем сложно. Поэтому при расчете заземляющих устройств значения η берутся из таблиц и кривых, составленных на основании опытов (табл. 3.2 – 3.4).

Для защитного заземления часто применяют электроды двух типов – стержневые, забиваемые в землю вертикально, и полосовые, укладываемые в грунт горизонтально и предназначенные для соединения вертикальных электродов; нередко горизонтальные электроды используют как самостоятельные заземлители, т. е. без вертикальных электродов (рис. 3.20, в). При этом возникает взаимодействие полей растекания тока вертикальных электродов не только между собой, но и с полями горизонтальных электродов. Однако степень этого взаимодействия различна для этих типов заземлителей и учитывается двумя коэффициентами использования – вертикальных и горизонтальных электродов η_v и η_r (см. табл. 3.2 и 3.3).

Таблица 3.2. Коэффициенты использования η_v вертикальных электродов группового заземлителя (труб, уголков и т. п.) без учета влияния полосы связи

Отношение расстояний между вертикальными электродами к их длине	Число заземлителей n							
	2	4	6	10	20	40	60	100

Электроды размещены в ряд (рис. 3.20, а)

1	0,85	0,73	0,65	0,59	0,48	—	—	—
2	0,91	0,83	0,77	0,74	0,67	—	—	—
3	0,94	0,89	0,85	0,81	0,76	—	—	—

Электроды размещены по контуру (рис. 3.20, б)

1	—	0,69	0,61	0,56	0,47	0,41	0,39	0,36
2	—	0,78	0,73	0,68	0,63	0,58	0,55	0,52
3	—	0,85	0,80	0,76	0,71	0,66	0,64	0,62

Таблица 3.3. Коэффициенты использования η горизонтального полосового электрода, соединяющего вертикальные электроды (трубы, уголки и т. п.) группового заземлителя

Отношение расстояний между вертикальными электродами к их длине	Число вертикальных электродов							
	2	4	6	10	20	40	60	100

Вертикальные электроды размещены в ряд (рис. 3.20, а)

1	0,85	0,77	0,72	0,62	0,42	—	—	—
2	0,94	0,80	0,84	0,75	0,56	—	—	—
3	0,96	0,92	0,88	0,82	0,68	—	—	—

Вертикальные электроды размещены по контуру (рис. 3.20, б)

1	—	0,45	0,40	0,34	0,27	0,22	0,20	0,19
2	—	0,55	0,48	0,40	0,32	0,29	0,27	0,23
3	—	0,70	0,64	0,56	0,45	0,39	0,36	0,33

Таблица 3.4. Коэффициенты использования η параллельно уложенных горизонтальных полосовых электродов группового заземлителя (ширина полосы $b = 20 \div 40$ мм; глубина заложения 0,3–0,8 м; рис. 3.20, в)

Длина полосы, м	Число параллельных полос	Расстояние между параллельными полосами, м				
		1	2,5	5	10	15
15	2	0,63	0,75	0,83	0,92	0,96
	5	0,37	0,49	0,60	0,73	0,79
	10	0,25	0,37	0,49	0,64	0,72
	20	0,16	0,27	0,39	0,57	0,64
25	5	0,35	0,45	0,55	0,66	0,73
	10	0,23	0,31	0,43	0,57	0,66
	20	0,14	0,23	0,33	0,47	0,57
50	2	0,60	0,69	0,78	0,88	0,93
	5	0,33	0,40	0,48	0,58	0,65
	10	0,20	0,27	0,35	0,46	0,53
	20	0,12	0,19	0,25	0,36	0,44

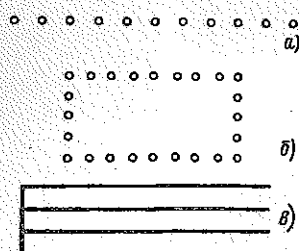


Рис. 3.20. Способы размещения электродов группового заземлителя (вид в плане):

а — вертикальные электроды, размещены в ряд; б — вертикальные электроды, размещены по контуру; в — горизонтальные электроды, уложены параллельно на одинаковой глубине

Коэффициент использования такого группового заземлителя может быть определен из выражения

$$\eta_{\text{гр}} = \frac{R_{\text{в}}\eta_{\text{г}} + R_{\text{г}}n\eta_{\text{в}}}{R_{\text{в}} + R_{\text{г}}n}, \quad (3.63)$$

где $R_{\text{в}}$, $R_{\text{г}}$ — сопротивления растеканию вертикального и горизонтального электродов, Ом; n — число вертикальных электродов.

Для расчетов заземлителя значение этого коэффициента обычно не требуется, так как можно сразу определить сопротивление группового заземлителя, Ом*.

$$R_{\text{гр}} = \frac{R_{\text{в}}R_{\text{г}}}{R_{\text{в}}\eta_{\text{г}} + R_{\text{г}}n\eta_{\text{в}}}, \quad (3.64)$$

Пример 3.6. Определить коэффициент использования $\eta_{\text{гр}}$ и сопротивление группового заземлителя $R_{\text{гр}}$, состоящего из 20 вертикальных стержневых электродов, расположенных в ряд на расстоянии $s = 2,5$ м один от другого, и горизонтальной соединительной стальной полосы. Длина стержневого электрода $l = 2,5$ м. Сопротивление растеканию электродов: вертикального стержневого $R_{\text{в}} = 30,2$ Ом, горизонтального полосового $R_{\text{г}} = 3,86$ Ом.

Решение. Из табл. 3.2 и 3.3 находим для случая $s/l = 1$ $\eta_{\text{в}} = 0,48$ и $\eta_{\text{г}} = 0,42$.

Подставив данные в уравнения (3.63) и (3.64), получим

$$\eta_{\text{гр}} = \frac{30,2 \cdot 0,42 + 3,86 \cdot 20 \cdot 0,48}{30,2 + 3,86 \cdot 20} = 0,46;$$

$$R_{\text{гр}} = \frac{30,2 \cdot 3,86}{30,2 \cdot 0,42 + 3,86 \cdot 20 \cdot 0,48} = 2,34 \text{ Ом.}$$

* Это выражение получено путем суммирования проводимостей заземлителей обоих типов, поскольку они работают параллельно:

$$\frac{1}{R_{\text{гр}}} = \frac{1}{R_{\text{гр.с}}} + \frac{1}{R_{\text{гр.г}}} = \frac{n\eta_{\text{в}}}{R_{\text{в}}} + \frac{\eta_{\text{г}}}{R_{\text{г}}} = \frac{R_{\text{в}}\eta_{\text{г}} + R_{\text{г}}n\eta_{\text{в}}}{R_{\text{в}}R_{\text{г}}}$$

д) Сопротивление сложного заземлителя в однородной земле

Сопротивление растеканию, Ом, сложного заземлителя в виде горизонтальной квадратной сетки с квадратными ячейками одинакового размера и равномерным размещением вертикальных электродов по контуру (периметру) заземлителя (рис. 3.21, а) можно определить по следующей формуле:

$$R = A \frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L_r + n l_b}, \quad (3.65)$$

где A — коэффициент, значение которого равно

$$A = 0,444 - 0,84 t_{отн} \quad \text{при } 0 \leq t_{отн} \leq 0,1; \quad (3.66)$$

$$A = 0,385 - 0,25 t_{отн} \quad \text{при } 0,1 \leq t_{отн} \leq 0,5; \quad (3.67)$$

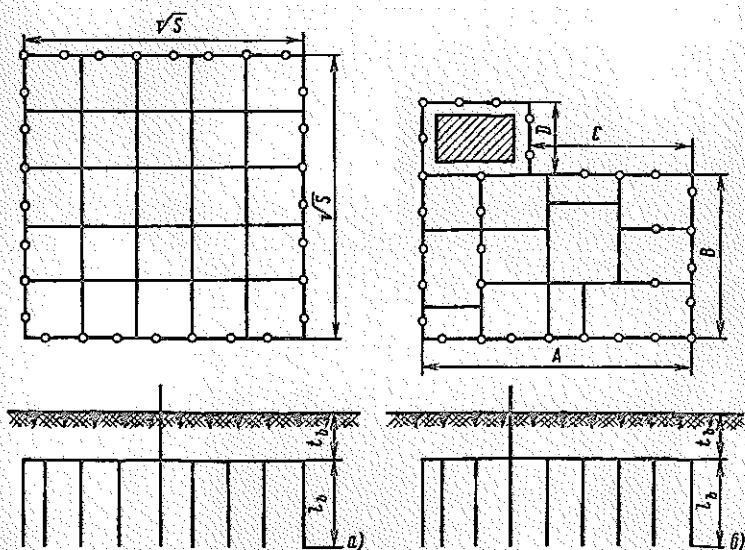


Рис. 3.21. Сложные заземлители в однородной земле:

а — в виде горизонтальной квадратной сетки с квадратными ячейками одинакового размера и равномерным размещением вертикальных электродов по контуру (периметру) заземлителя; б — в виде горизонтальной сетки с ячейками разной формы и размеров с различным расположением горизонтальных и примерно равномерным размещением вертикальных электродов

$t_{\text{отн}}$ — относительная глубина погружения в землю вертикальных электродов:

$$t_{\text{отн}} = (l_b + t_b) / \sqrt{S}; \quad (3.68)$$

t_b — глубина погружения в землю верхнего конца вертикального электрода, м; S — площадь, занимаемая заземлителем, м²; L_r — суммарная длина горизонтальных электродов, м; l_b — длина вертикального электрода, м.

К такому виду может быть приведен любой сложный заземлитель в виде горизонтальной сетки с различным расположением горизонтальных и примерно равномерным размещением вертикальных электродов, например заземлитель, показанный на рис. 3.21, б. При этом, однако, должно быть соблюдено следующее условие: у действительного (приводимого) и квадратного (расчетного) заземлителей должны быть равны площади S , суммарная длина горизонтальных электродов L_r , количество и длина вертикальных электродов n и l_b , а также глубина заложения их в землю t_b .

Пример 3.7. Определить сопротивление заземлителя в однородной земле, выполненного в виде сетки из горизонтальных и вертикальных электродов (рис. 3.21, б). Дано: удельное сопротивление земли $\rho = 100$ Ом·м; размеры заземлителя: $A = 25$ м, $B = 17$ м, $C = 15$ м, $D = 6$ м; длина вертикального электрода $l_b = 3$ м; глубина заложения заземлителя $t_b = 0,5$ м.

Решение. Искомое сопротивление заземлителя находим по (3.65). Предварительно вычисляем неизвестные значения величин, входящих в эту формулу. Определяем площадь, занимаемую заземлителем, $S = A \cdot B + (A - C)D = 25 \cdot 17 + (25 - 15) \cdot 6 = 485$ м²; по (3.68) находим

$$t_{\text{отн}} = (l_b + t_b) / \sqrt{S} = (3 + 0,5) / \sqrt{485} = 0,159;$$

определяем коэффициент A по (3.67), поскольку $0,1 \leq t_{\text{отн}} \leq 0,5$:

$$A = 0,385 - 0,25t_{\text{отн}} = 0,385 - 0,25 \cdot 0,159 = 0,381.$$

По рис. 3.21, а подсчитываем суммарную длину горизонтальных и количество вертикальных электродов: $L_r = 217$ м, $n = 32$ шт.

Подставив в (3.65) полученные значения, найдем искомое сопротивление заземлителя

$$R = A \frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L_r + nl_b} = 0,381 \frac{100}{\sqrt{485}} + \frac{100}{217 + 32 \cdot 3} = 2,05 \text{ Ом}.$$

Сопротивление заземлителя в однородной земле, выполненного в виде сетки из горизонтальных электродов (без вертикальных), определяется также по формуле (3.65), в которой надо принять $l_b = 0$. В этом случае, поскольку $t_b = 0$ и согласно (3.68) и (3.66) $t_{отн} = 0$ и $A = 0,444$, (3.65) приобретает вид

$$R = 0,444 \frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L_r}. \quad (3.69)$$

Эта формула известна как формула Оллендорфа – Лорана.

Первый член ее выражает сопротивление растеканию сплошной квадратной металлической плиты со стороной $\sqrt{S}$, лежащей на поверхности земли [см. (3.41)]. Вместе с тем он определяет наименьшее сопротивление растеканию заземлителя, выполненного только из горизонтальных электродов. Вторым членом выражает разницу между сопротивлениями растекания заземлителей в виде горизонтальной решетки и сплошной плиты.

Сопротивление контурного заземлителя в однородной земле, выполненного в виде горизонтальной прямоугольной решетки из прутков круглого сечения диаметром d , м, размещенной в земле на глубине t , м, можно определить методом электростатической аналогии, как и в случае одиночных заземлителей (см. § 3.2, в).

В данном случае применима следующая формула для расчета емкости, Φ , между бесконечной непроницаемой плоскостью и параллельной ей плоской прямоугольной решеткой:

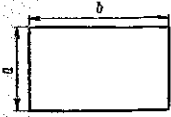
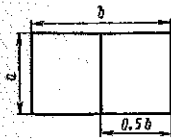
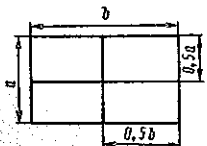
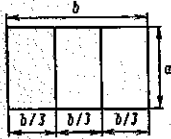
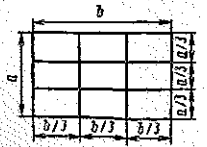
$$C_{o,n} = \frac{2\pi\epsilon L_r}{\ln \frac{L_r^2}{td} + m}, \quad (3.70)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м; L_r – суммарная длина всех проводников, образующих решетку, м; t – расстояние между решеткой и плоскостью, м; m – коэффициент, зависящий от конфигурации решетки, соотношения ее сторон и числа ячеек. Значения m для некоторых типов прямоугольных решеток приведены в табл. 3.5.

Заменяя в этом выражении $C_{o,n}$ на $1/R$ и ϵ на $1/\rho$ и решив полученное уравнение относительно R , будем иметь выражение для определения сопротивления растеканию решетки, Ом,

$$R = \frac{\rho}{2\pi L_r} \left(\ln \frac{L_r^2}{td} + m \right). \quad (3.71)$$

Таблица 3.5. Значения коэффициента m , входящего в формулы (3.70) и (3.71)

Конструкция решетки	Отношения сторон решетки				
	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0
	1,71	1,76	1,86	2,10	2,34
	3,67	3,41	3,31	3,29	3,35
	4,95	5,16	5,44	6,00	6,52
	4,33	4,43	4,73	5,04	5,61
	8,55	8,94	9,40	10,3	11,11

Пример 3.8. Определить сопротивление растеканию заземлителя, выполненного из прутковой стали диаметром $d = 2$ см в виде горизонтальной прямоугольной решетки 9×6 м с девятью ячейками со сторонами $b = 3$ м и $a = 2$ м. Глубина погружения решетки в грунт $t = 1,5$ м. Удельное сопротивление земли $\rho = 100$ Ом·м.

Решение. Суммарная длина проводников, из которых состоит решетка, $L_r = 4 \cdot 3b + 4 \cdot 3a = 12 \cdot 3 + 12 \cdot 2 = 60$ м. Коэффициент m , входящий в (3.71), определим из данных табл. 3.5, имея в виду, что отношение сторон ячеек $b/a = 1,5$; при этом $m = 8,94$. По (3.71) находим искомое сопротивление растеканию заземлителя

$$R = \frac{\rho}{2\pi L_r} \left(\ln \frac{L_r^2}{td} + m \right) = \frac{100}{2\pi \cdot 60} \left(\ln \frac{60}{1,5 \cdot 0,02} + 8,94 \right) = 5,7 \text{ Ом.}$$

3.4. НАПРЯЖЕНИЕ ПРИКОСНОВЕНИЯ

Напряжением прикосновения $U_{пр}$ называется напряжение между двумя точками цепи тока, которых одновременно касается человек, или, иначе говоря, падение напряжения в сопротивлении тела человека, B ,

$$U_{пр} = I_h R_h, \quad (3.72)$$

где I_h — ток, проходящий через человека по пути рука — ноги, А; R_h — сопротивление тела человека, Ом.

В области защитных заземлений, занулений и т. п. одна из этих точек имеет потенциал заземлителя φ_3 , В, а другая — потенциал основания в том месте, где стоит человек, $\varphi_{осн}$. В этом случае напряжение прикосновения будет

$$U_{пр} = \varphi_3 - \varphi_{осн} \quad (3.73)$$

или

$$U_{пр} = \varphi_3 \alpha_1,$$

где α_1 — коэффициент, называемый коэффициентом напряжения прикосновения или просто коэффициентом прикосновения, учитывающий форму потенциальной кривой:

$$\alpha_1 = (1 - \varphi_{осн}/\varphi_3) \leq 1. \quad (3.74)$$

а) Напряжение прикосновения при одиночном заземлителе

Пусть мы имеем оборудование, например электродвигатели, корпуса которых заземлены с помощью одиночного заземлителя (электрода) (рис. 3.22). При замыкании на корпус * одного из этих двигателей на заземлителе и всех присоединенных к нему металлических частях, в том числе на корпусах двигателей, появится потенциал φ_3 . Поверхность земли вокруг заземлителя также будет иметь потенциал, изменяющийся по кривой, зависящей от формы и размеров заземлителя (электрода).

Напряжение прикосновения для человека, касающегося заземленного корпуса двигателя и стоящего на земле (см. случай 1 на рис. 3.22), определяется отрезком AB и зависит от формы потенциальной кривой и расстояния x между человеком и заземлителем: чем дальше от заземлителя находится человек, тем больше $U_{пр}$ и наоборот.

Так, при наибольшем расстоянии, т. е. при $x = \infty$, а практически при $x \geq 20$ м (случай 2 на рис. 3.22) напряжение прикосновения имеет наибольшее значение: $U_{пр} = \varphi_3$; при этом $\alpha_1 = 1$.

Это — наиболее опасный случай прикосновения.

При наименьшем значении x , т. е. когда человек стоит непосредственно на заземлителе (случай 3 на рис. 3.22), $U_{пр} = 0$ и $\alpha_1 = 0$.

Это — безопасный случай: человек не подвергается воздействию напряжения, хотя он и находится под потенциалом заземлителя φ_3 .

При других значениях x в пределах 0 — 20 м (случай 1) $U_{пр}$ плавно возрастает от 0 до φ_3 , а α_1 — от 0 до 1.

В практике устройства защитных заземлений интерес представляют максимальные значения напряжений прикосновения.

Для примера посмотрим, как изменяются $U_{пр}$ и α_1 при одиночном полусферовом заземлителе радиусом r . В этом

* Замыканием на корпус, или, точнее, электрическим замыканием на корпус, называется случайное электрическое соединение токоведущей части с металлическими нетокведущими частями электроустановки. Замыкание на корпус может быть результатом, например, повреждения изоляции, случайного касания токоведущей части корпуса машины, падения провода, находящегося под напряжением, на нетокведущие металлические части и т. п. Замыкание на корпус показано на рисунке молниевидной стрелкой.

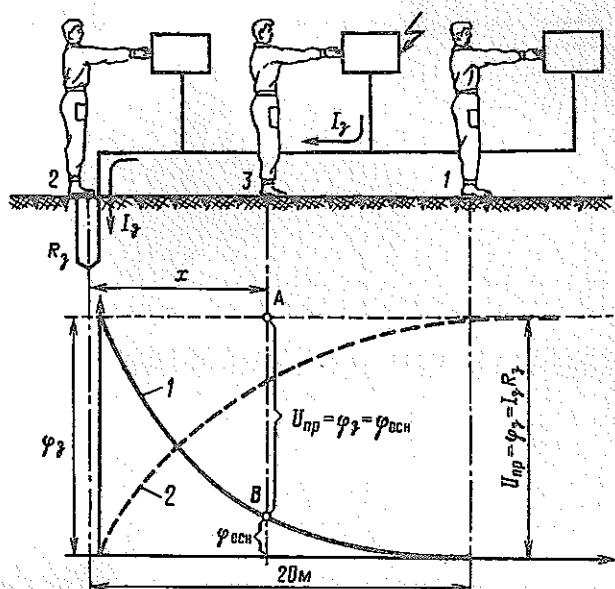


Рис. 3.22. Напряжение прикосновения при одиночном заземлителе:

1 — потенциальная кривая; 2 — кривая, характеризующая изменение $U_{пр}$ — при изменении x

случае нам известно выражение потенциала любой точки на поверхности земли вокруг заземлителя (3.17), поэтому напряжение прикосновения

$$U_{пр} = \varphi_z - \varphi_z r/x = \varphi_z (1 - r/x), \quad (3.75)$$

а коэффициент прикосновения

$$\alpha_1 = 1 - r/x. \quad (3.76)$$

При $x = \infty$, а практически при $x \geq 20$ м (случай 2 на рис. 3.22) $r/x \approx 0$, поэтому напряжение прикосновения и коэффициент прикосновения будут иметь максимальные значения:

$$U_{пр, max} = \varphi_z; \quad \alpha_{1, max} = 1.$$

При $x = r$ (случай 3) $r/x = 1$, поэтому $U_{пр} = 0$ и $\alpha_1 = 0$.

При промежуточных значениях x от r до 20 м $U_{пр}$ и α_1 определяются из выражений (3.75) и (3.76). Так, если $x = 10r$ (случай 1), то $\alpha_1 = 1 - r/10r = 0,9$, а $U_{пр} = \varphi_z \alpha_1 = 0,9\varphi_z$.

При одиночном стержневом вертикальном заземлителе выражения для $U_{\text{пр}}$ и α_1 можно получить, вычтя уравнение потенциала некоторой точки основания (3.21) из уравнения потенциала заземлителя (3.22):

$$U_{\text{пр}} = \varphi_3 - \varphi_{\text{осн}} = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} - \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x} =$$

$$= \varphi_3 \left(1 - \frac{\ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}}{\ln \frac{4l}{d}} \right); \quad (3.77)$$

$$\alpha_1 = 1 - \frac{\ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}}{\ln \frac{4l}{d}}. \quad (3.78)$$

Максимальные значения $U_{\text{пр}}$ и α_1 будут при $x = \infty$ (практически при $x \geq 20$ м)

$$U_{\text{пр. max}} = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} = \varphi_3; \quad \alpha_{1 \text{ max}} = 1.$$

В этом случае мы пренебрегли дробными выражениями в (3.77) и (3.78), поскольку числитель их при $x > l$ и $l \gg d$ весьма мал по сравнению со знаменателем.

Пример 3.9. Определить α_1 и $U_{\text{пр}}$ при одиночном стержневом вертикальном заземлителе длиной $l = 3$ м и диаметром $d = 6$ см для двух случаев: человек, касающийся заземленного оборудования, находится на расстоянии от оси заземлителя $x = 2$ м (положение 1 на рис. 3.22) и $x = 20$ м (положение 2). Удельное сопротивление земли $\rho = 100$ Ом·м; ток, стекающий в землю через заземлитель, $I_3 = 10$ А.

Решение. По (3.22) находим потенциал заземлителя

$$\varphi_3 = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} = \frac{10 \cdot 100}{2\pi \cdot 3} \ln \frac{4 \cdot 3}{0,06} = 280 \text{ В.}$$

По (3.78) и (3.77) вычисляем значения искомых коэффициентов α_1 и напряжений прикосновения $U_{\text{пр}}$ при $x = 2$ м

$$\alpha_1 = \left(1 - \frac{\ln \frac{\sqrt{2^2 + 3^2} + 3}{2}}{\ln \frac{4 \cdot 3}{0,06}} \right) = 0,772;$$

$$U_{\text{пр}} = \varphi_3 \alpha_1 = 280 \cdot 0,772 = 216 \text{ В;}$$

при $x = 20$ м

$$\alpha_1 = \left(1 - \frac{\ln \frac{\sqrt{20^2 + 3^2} + 3}{20}}{\ln \frac{4 \cdot 3}{0,06}} \right) = 0,972;$$

$$U_{\text{пр}} = \varphi_3 \alpha_1 = 280 \cdot 0,972 = 272 \text{ В.}$$

б) Напряжение прикосновения при групповом заземлителе

Известно, что если поля растекания токов электродов группового заземлителя накладываются одно на другое, то все точки поверхности земли на участке между электродами имеют потенциалы, отличные от нуля. Поэтому в любом месте этого участка $U_{\text{пр}} < \varphi_3$ и $\alpha_1 < 1$.

Как и в случае одиночного заземлителя, $U_{\text{пр}} = 0$ и $\alpha_1 = 0$ тогда, когда человек, касаясь заземленного предмета, стоит непосредственно на электроде, входящем в состав группового заземлителя.

Наибольшие значения $U_{\text{пр}}$ и α_1 будут иметь на определенном расстоянии от электродов, зависящем от их формы и взаимного расположения.

Рассмотрим эти вопросы применительно к заземлителю, состоящему из двух одинаковых полушаровых электродов радиусом r , м, с расстоянием между ними s , м (рис. 3.23).

Зная уравнение потенциальной кривой такого заземлителя (3.47), выраженное через $\varphi_{\text{гр}}$, мы вправе написать

$$\varphi_{\text{осн}} = \varphi_{\text{гр}} \frac{r(s-r)}{x(s-x)}.$$

Тогда

$$U_{\text{пр}} = \varphi_{\text{гр}} - \varphi_{\text{осн}} = \varphi_{\text{гр}} \left[1 - \frac{r(s-r)}{x(s-x)} \right];$$

$$\alpha_1 = 1 - \frac{r(s-r)}{x(s-x)}.$$

Как видно из этих выражений, $U_{\text{пр}}$ и α_1 будут иметь наименьшие значения в двух случаях — при наименьшем и наибольшем значениях x , а именно при $x = r$ и $x = (s-r)$, т. е. когда человек стоит на одном из электродов. В этом случае $U_{\text{пр}} = 0$ и $\alpha_1 = 0$.

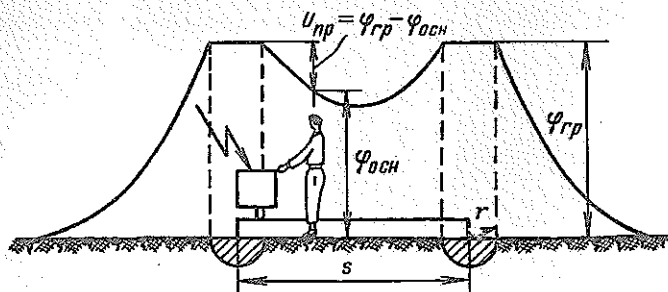


Рис. 3.23. Напряжение прикосновения при групповом заземлителе

Наибольшие значения $U_{пр}$ и α_1 будут при $x = 0,5s$, когда человек стоит точно посередине между электродами. Тогда с учетом (3.49)

$$U_{пр, max} = \varphi_{гр} \left(1 - 4r \frac{s-r}{s^2} \right);$$

$$\alpha_{1max} = 1 - 4r \frac{s-r}{s^2}.$$

Например, при $s = 20r$ получим $U_{пр, max} = 0,89\varphi_{гр}$, а $\alpha_1 = 0,89$.

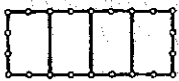
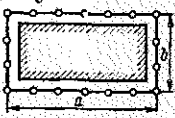
Если электроды не шаровые, а другой формы, то вычисление $U_{пр}$ и α_1 оказывается более сложным, а при большом числе электродов — практически невозможным.

При проектировании защитных заземлений требуется знать наибольшее в данной конструкции заземлителя значение напряжения прикосновения. Для этой цели пользуются максимальными значениями α_1 , полученными опытным путем (табл. 3.6).

При уменьшении s , т. е. при более частом расположении электродов, $U_{пр}$ и α_1 снижаются — происходит выравнивание потенциалов на поверхности земли.

В пределах площади, на которой размещены электроды группового заземлителя, $U_{пр, max}$ и α_{1max} наблюдаются, как правило, в точках, наиболее удаленных от электродов. Например, при размещении электродов по вершинам или сторонам правильного многоугольника $U_{пр, max}$ и α_{1max} оказываются в центре этих фигур (рис. 3.24). Если электроды образуют сетку, состоящую из квадратных или прямоугольных клеток, то внутри каждой такой клетки наибольшие значения $U_{пр}$ и α_1 будут точно в центре ее, причем в угловых клетках $U_{пр, max}$ и α_{1max} будут больше, чем в других (рис. 3.25).

Таблица 3.6. Наибольшие значения коэффициентов прикосновения α_1 и шага β_1

Тип заземлителя	Число внутренних полос	Расстояние между параллельными полосами, м	α_1	β_1
Одиночный горизонтальный; заглубление $t_0 \approx 0,5$ м	—	—	1	0,3
Групповой — вертикальные стержневые электроды расположе- ны в ряд и соединены полосой; заглубление $t_0 \approx 0,8$ м	—	—	1	0,6
Групповой контурный из полос с внутренними параллельными полосами; $t_0 \approx 0,5$ м 	2	2,5	0,3	0,15
		5	0,35	
		10	0,4	
		15	0,45	
	5	2,5	0,15	
		5	0,2	
		10	0,3	
		15	0,35	
	10	2,5	0,1	
		5	0,15	
		10	0,25	
		15	0,3	
Групповой контурный из стерж- ней и полос с внутренними па- раллельными полосами; $t_0 \approx 0,5$ м 	5	2,5	0,1	0,15
		5	0,15	
		10	0,25	
		15	0,35	
	10	2,5	0,08	
		5	0,1	
		10	0,2	
		15	0,25	
Групповой контурный из стерж- ней и полос (вокруг здания, со- оружения); $t_0 \approx 0,5$ м 	—	$a = b$	0,4	0,3
		$a = 2b$	0,35	0,25
		$a = 3b$	0,3	0,2

Примечания: 1. Для заземлителей первых двух типов значения α_1 даны для случая, когда человек находится на расстоянии 20 м и более от заземлителя. Все остальные значения α_1 относятся к случаям нахождения человека внутри контура.

2. Для заземлителя последнего типа отношение расстояния между соседними вертикальными электродами s к длине вертикального электрода l_0 , т. е. s/l_0 , находится в пределах 1—3.

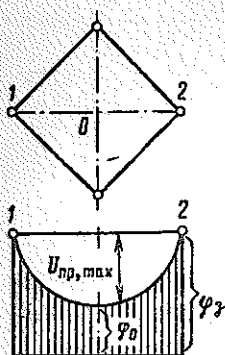


Рис. 3.24.

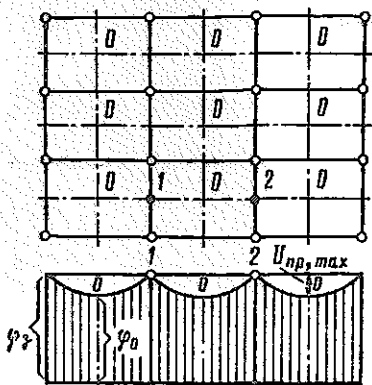


Рис. 3.25.

Рис. 3.24. Потенциальная кривая внутри контура группового заземлителя с вертикальными электродами, размещенными по вершинам правильного многоугольника и соединенными горизонтальными электродами

Рис. 3.25. Потенциальная кривая внутри контура группового заземлителя в виде горизонтальной сетки с ячейками одинакового размера

Для заземлителя в однородной земле, выполненного в виде горизонтальной квадратной сетки с квадратными ячейками одинакового размера и равномерным размещением вертикальных электродов по контуру (периметру) заземлителя (рис. 3.21, а), коэффициент напряжения прикосновения может быть вычислен по следующему выражению:

$$\alpha_1 = 0,5 / \left(\frac{l_B L_r}{a \sqrt{S}} \right)^{0,45}, \quad (3.79)$$

где l_B — длина вертикального электрода, м; L_r — общая длина всех горизонтальных электродов, м; a — расстояние между вертикальными электродами, м; S — площадь, занимаемая заземлителем, м.

Эта формула может быть упрощена, если принять степень в знаменателе равной 0,5 и заменить расстояние a его выражением $a = 4\sqrt{S/n}$, где n — количество вертикальных электродов. Тогда будем иметь

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{S}{nl_B L_r}}$$

или

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{S}{L_B L_T}}, \quad (3.80)$$

где $L_B = n l_B$ — общая длина всех вертикальных электродов, м.

в) Напряжение прикосновения с учетом падения напряжения в сопротивлении основания, на котором стоит человек

Ток, стекающий в землю через человека, стоящего на земле, полу и другом основании, преодолевает сопротивление не только тела человека, но и этого основания, вернее, тех его участков, с которыми имеют контакт подошвы ног человека (сопротивление обуви, носков и т. п. в данном случае во внимание не принимается).

Сопротивление основания, на котором стоит человек, правильнее называть (аналогично сопротивлению заземлителя) сопротивлением растеканию тока основания ног; нередко это сопротивление именуют также сопротивлением растеканию основания или сопротивлением растеканию ног человека.

Все положения, рассмотренные выше в этом параграфе, справедливы для случаев, когда сопротивление растеканию основания, на котором стоит человек, равно нулю. В действительных условиях это сопротивление не равно нулю и в ряде случаев бывает довольно велико.

Следовательно, разность потенциалов $(\varphi_3 - \varphi_{осн})$, равная $\varphi_3 \alpha_1$, В, оказывается приложенной не только к сопротивлению тела человека R_h , Ом, но и к последовательно соединенному с ним сопротивлению основания $R_{осн}$, Ом, на котором стоит человек (рис. 3.26):

$$\varphi_3 \alpha_1 = I_h (R_h + R_{осн}).$$

Заменяя в этом выражении ток I_h , А, проходящий через человека, его значением из (3.72), получим

$$\varphi_3 \alpha_1 = \frac{U_{пр}}{R_h} (R_h + R_{осн}),$$

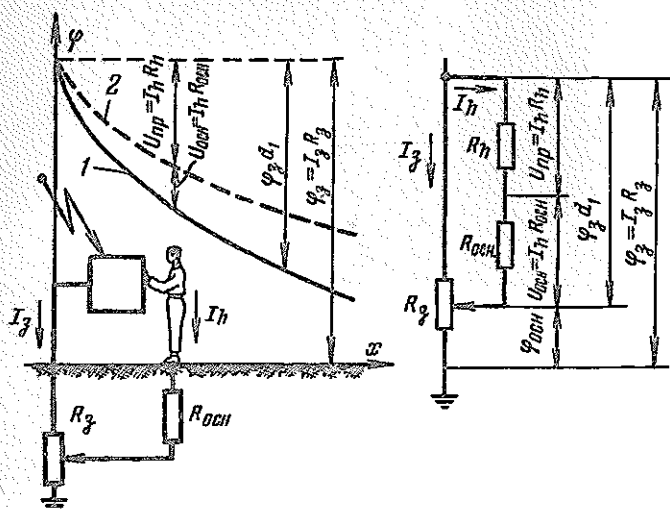


Рис. 3.26. К определению напряжения прикосновения с учетом падения напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек:

1 — потенциальная кривая; 2 — кривая, характеризующая изменение $U_{пр}$ с изменением расстояния от заземлителя

откуда напряжение прикосновения с учетом падения напряжения в сопротивлении растеканию основания, В,

$$U_{пр} = \varphi_3 \alpha_1 \frac{R_h}{R_h + R_{очн}} \quad (3.81)$$

или

$$U_{пр} = \varphi_3 \alpha_1 \alpha_2, \quad (3.82)$$

где α_2 — коэффициент напряжения прикосновения, учитывающий падение напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек:

$$\alpha_2 = R_h / (R_h + R_{очн}). \quad (3.83)$$

Сопротивление растеканию основания, на котором стоит человек, или, иначе говоря, сопротивление растеканию ног человека, можно определить следующим образом.

Подошвы обуви человека, создающие контакт с основанием, можно уподобить дисковому заземлителю, лежащему на поверхности земли (см. рис. 3.9). Если площадь подошвы одной ноги принять равной $0,0225 \text{ м}^2$, то диаметр d эквивалентного ей диска будет равен $0,17 \text{ м}$, а сопротивление растеканию тока составит (см. табл. 3.1, п. 9), Ом,

$$R_{\text{н}} = \rho / 2d \approx 3\rho. \quad (3.84)$$

Полагая, что ступни ног отстоят одна от другой на расстоянии шага, и считая поэтому, что их поля растекания токов не влияют одно на другое, получим искомое сопротивление растеканию основания, т. е. сопротивление растеканию обеих ног человека, Ом*,

$$R_{\text{осн}} = R_{\text{н}} / 2 \approx 1,5\rho. \quad (3.85)$$

Подставив это значение в (3.83), получим окончательное выражение для коэффициента напряжения прикосновения, учитывающего падение напряжения в сопротивлении растеканию ног человека,

$$\alpha_2 = \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{н}} + 1,5\rho}. \quad (3.86)$$

Пример 3.10. Человек коснулся оборванного и лежащего на земле провода воздушной линии, находящейся под напряжением (рис. 3.27). Определить $U_{\text{пр}}$, если длина участка провода, лежащего на земле, $l = 5 \text{ м}$; расстояние от человека до этого участка $s = 3 \text{ м}$; диаметр провода $2r = 0,01 \text{ м}$; ток замыкания на землю $I_3 = 10 \text{ А}$; $\rho = 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $R_{\text{н}} = 10^3 \text{ Ом}$.

Решение. Расчетной формулой для этого случая с учетом (3.73) и (3.82) будет

$$U_{\text{пр}} = \varphi_3 \alpha_1 \alpha_2 = (\varphi_3 - \varphi_{\text{ос}}) \alpha_2.$$

* Если считать, что ступни ног стоят рядом, то диаметр эквивалентного им диска $d \approx 0,25 \text{ м}$, а $R_{\text{осн}} \approx 2\rho \text{ Ом}$.

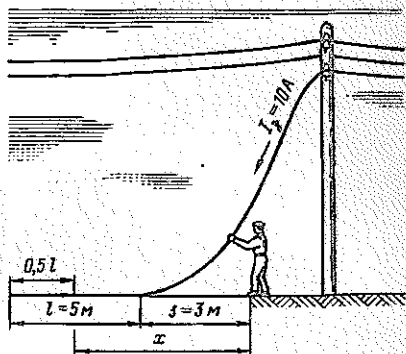


Рис. 3.27. К примеру 3.10.

Рассматривая провод, лежащий на земле, как протяженный заземлитель круглого сечения, по уравнению (3.28) определяем потенциал провода:

$$\varphi_1 = \frac{I_3 \rho}{\pi l} \ln \frac{l}{r} = \frac{10 \cdot 10^2}{\pi \cdot 5} \ln \frac{5}{0,005} = 440 \text{ В.}$$

Потенциал на поверхности земли в том месте, где стоит человек, по (3.26)

$$\varphi_{ос} = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{2x + l}{2x - l} = \frac{10 \cdot 10^2}{2\pi \cdot 5} \ln \frac{2(2,5 + 3) + 5}{2(2,5 + 3) - 5} = 30 \text{ В.}$$

Коэффициент напряжения прикосновения по (3.86)

$$\alpha_2 = \frac{10^3}{10^3 + 1,5 \cdot 10^2} = 0,87.$$

Искомое напряжение прикосновения

$$U_{пр} = (440 - 30) \cdot 0,87 = 360 \text{ В.}$$

3.5. НАПРЯЖЕНИЕ ШАГА

Напряжением шага называется напряжение между двумя точками цепи тока, находящимися одна от другой на расстоянии шага, на которых одновременно *стоит* человек, или, иначе говоря, падение напряжения в сопротивлении тела человека, В,

$$U_{ш} = I_h R_h, \quad (3.87)$$

где I_h — ток, проходящий через человека по пути нога — нога, А; R_h — сопротивление тела человека, Ом.

В области защитных устройств от поражения током — заземления, зануления и др. — интерес представляют в первую очередь напряжения между точками на поверхности земли (или иного основания, на котором стоит человек) в зоне растекания тока с заземлителя. В этом случае напряжением шага будет являться разность потенциалов φ_x , В, и φ_{x+a} , В, двух точек на поверхности земли в зоне растекания тока, которые находятся на расстоянии x и $(x + a)$ от заземлителя и на расстоянии шага одна от другой и на которых одновременно стоит человек (рис. 3.28). При этом длина шага a принимается равной 0,8 м. Таким образом, напряжение шага, В, будет

$$U_{ш} = \varphi_x - \varphi_{x+a}. \quad (3.88)$$

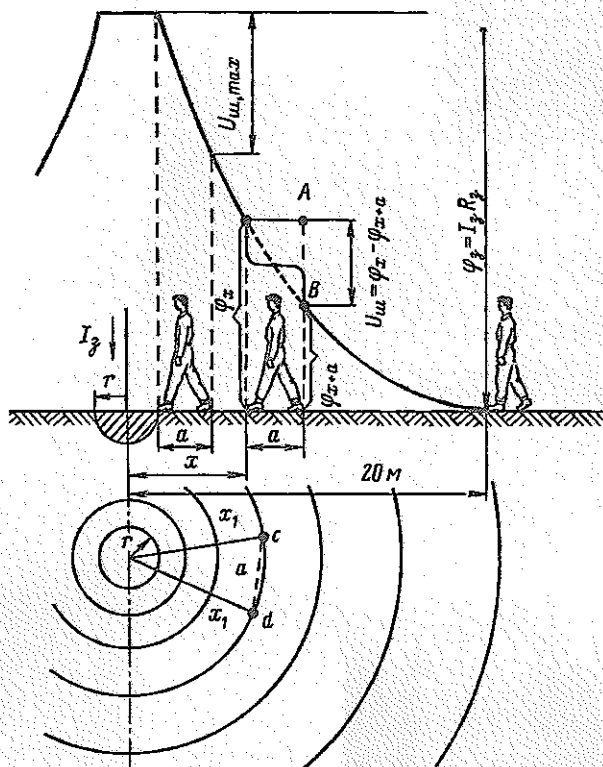


Рис. 3.28. Напряжение шага при одиночном заземлителе

Поскольку φ_x и φ_{x+a} являются частями потенциала заземлителя φ_3 , разность их также есть часть этого потенциала. Поэтому выражение (3.88) мы вправе записать так:

$$U_{\text{ш}} = \varphi_3 \beta_1, \quad (3.89)$$

где β_1 — коэффициент напряжения шага или просто коэффициент шага, учитывающий форму потенциальной кривой:

$$\beta_1 = (\varphi_x - \varphi_{x+a}) / \varphi_3 < 1. \quad (3.90)$$

а) Напряжение шага при одиночном заземлителе

Напряжение шага определяется отрезком AB (рис. 3.28) длина которого зависит от формы потенциальной кривой, т. е. от типа заземлителя, и изменяется от некоторого максимального значения до нуля с изменением расстояния от заземлителя.

Наибольшие значения $U_{\text{ш}}$ и β_1 будут при наименьшем расстоянии от заземлителя, когда человек одной ногой стоит непосредственно на заземлителе, а другой — на расстоянии шага от него. Объясняется это тем, что потенциал вокруг заземлителей распределяется по вогнутым кривым и, следовательно, наибольший перепад оказывается, как правило, в начале кривой.

Наименьшие значения $U_{\text{ш}}$ и β_1 будут при бесконечно большом удалении от заземлителя, т. е. за пределами поля растекания тока, а практически дальше 20 м. В этом месте $U_{\text{ш}} \approx 0$ и $\beta_1 \approx 0$.

На расстояниях меньше 20 м $U_{\text{ш}}$ и β_1 будут иметь промежуточные значения, зависящие от типа заземлителя.

При одиночном полушаровом заземлителе радиусом r (рис. 3.28) напряжение шага, V , с учетом (3.17) составит

$$U_{\text{ш}} = \varphi_3 \frac{r}{x} - \varphi_3 \frac{r}{x+a} = \varphi_3 \frac{ra}{x(x+a)},$$

а коэффициент шага

$$\beta_1 = \frac{ra}{x(x+a)},$$

где x — расстояние от центра заземлителя, м; a — длина шага, м.

При $x = \infty$ (практически при $x \geq 20$ м) $U_{\text{ш}} = 0$ и $\beta_1 = 0$. Этот же результат получим и вблизи заземлителя, если $a = 0$, т. е. когда ступни ног человека находятся рядом или на одной эквипотенциальной линии, а следовательно, на одинаковом расстоянии от заземлителя (точки c и d на рис. 3.28).

При наименьшем значении x (при $x = r$), т. е. когда человек одной ногой стоит на заземлителе, а другой — на расстоянии $(r+a)$ от его центра, получим максимальные значения $U_{\text{ш}}$ и β_1 :

$$U_{\text{ш}, \text{max}} = \varphi_3 a / (r+a); \quad \beta_{1, \text{max}} = a / (r+a).$$

В практике устройства защитных заземлений интерес представляют максимальные значения шаговых напряжений.

Для одиночного стержневого вертикального заземлителя $U_{ш, max}$ можно получить, вычтя (3.21) из (3.22). При этом в (3.21) надо заменить x на a и для упрощения принять $a^2 + l^2 = l^2$.

Тогда получим, В,

$$U_{ш, max} = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{a}{r}; \quad (3.91)$$

соответственно

$$\beta_{1 max} = \frac{U_{ш, max}}{\varphi_3} = \frac{\ln a - \ln r}{\ln 2l - \ln r}. \quad (3.92)$$

Для протяженного заземлителя круглого сечения, лежащего на поверхности земли (см. рис. 3.10), аналогично:

а) вдоль оси

$$U_{ш, max} = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{al}{r^2}; \quad (3.93)$$

б) поперек оси

$$U_{ш, max} = \frac{I_3 \rho}{\pi l} \ln \frac{a}{r}. \quad (3.94)$$

Пример 3.11. Определить $U_{ш, max}$ при одиночном стержневом заземлителе длиной $l = 3$ м и диаметром $d = 6$ см (см. рис. 3.8).

Решение. Из уравнения (3.92) находим

$$\beta_1 = \frac{\ln 80 - \ln 3}{\ln 600 - \ln 3} = 0,62,$$

тогда

$$U_{ш, max} = \varphi_3 \beta_1 = 0,62 \varphi_3.$$

б) Напряжение шага при групповом заземлителе

В пределах площади, на которой размещены электроды группового заземлителя, напряжение шага меньше, чем при одиночном заземлителе, но также изменяется от некоторого максимального значения до нуля при удалении от электродов (рис. 3.29).

Наибольшее напряжение шага будет, как и при одиночном заземлителе, в начале потенциальной кривой, т. е. когда человек одной ногой стоит непосредственно на электроде (или на участке земли, под которым зарыт электрод), а другой — на расстоянии шага от электрода (положения A и D на рис. 3.29).

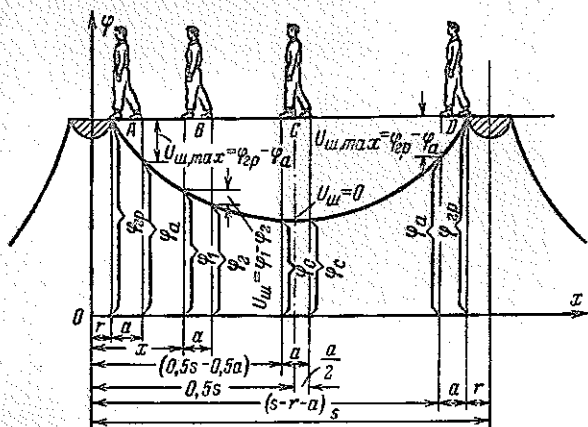


Рис. 3.29. Напряжение шага при групповом заземлителе

Наименьшее напряжение шага соответствует случаю, когда человек стоит на «точках» с одинаковыми потенциалами (положение C); в этом случае $U_{ш} = 0$.

Проверим эти выводы на примере группового заземлителя, состоящего из двух одиночных полушаровых электродов (рис. 3.29).

Зная уравнение потенциальной кривой (3.47), напомним уравнение для $U_{ш}$. В,

$$U_{ш} = \varphi_x - \varphi_{x+a} = \varphi_{гр} r (s-r) \left[\frac{1}{x(s-x)} - \frac{1}{(x+a)(s-x-a)} \right].$$

Из этого уравнения видно, что $U_{ш, max}$ будет при наименьшем и наибольшем значениях x , т. е. при $x = r$ и $x = s - (r + a)$:

$$U_{ш, max} = \varphi_{гр} \left[1 - \frac{r(s-r)}{(r+a)(s-r-a)} \right].$$

Наименьшее значение $U_{ш} = 0$ будет при $x = s/2 - a/2$.

С уменьшением s снижается и $U_{ш}$.

Максимальные значения β_1 для некоторых заземлителей приведены в табл. 3.6.

в) Напряжение шага с учетом падения напряжения в сопротивлении основания, на котором стоит человек

Как и в случае напряжения прикосновения, разность потенциалов между двумя точками, на которых стоит человек, т. е. $\varphi_x - \varphi_{x+a} = \varphi_3 \beta_1$, делится между сопротивлением тела человека и последовательно соединенным с ним сопротивлением растеканию основания, на котором он стоит, $R'_{осн}$, Ом.

В данном случае сопротивление основания складывается из двух последовательно соединенных сопротивлений растеканию ног человека: $R'_{осн} = 2R_n$ (рис. 3.30).

Следовательно,

$$\varphi_3 \beta_1 = I_h (R_h + R'_{осн}) = \frac{U_{ш}}{R_h} (R_h + 2R_n),$$

откуда напряжение шага, В,

$$U_{ш} = \varphi_3 \beta_1 \frac{R_h}{R_h + 2R_n}$$

или

$$U_{ш} = \varphi_3 \beta_1 \beta_2, \quad (3.95)$$

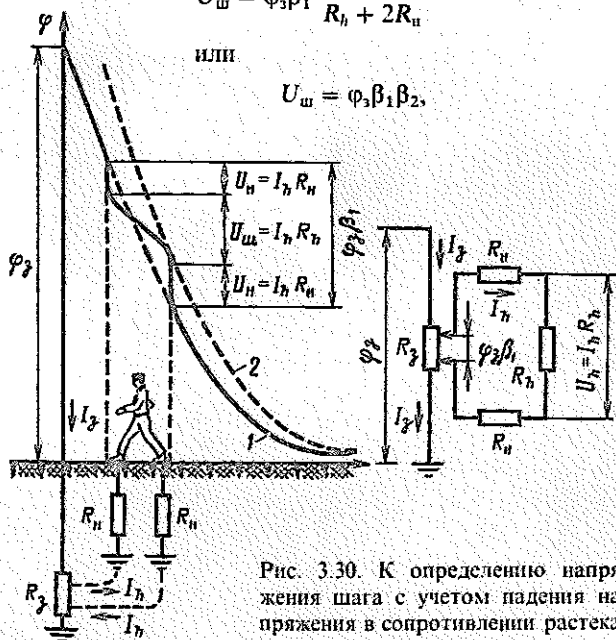


Рис. 3.30. К определению напряжения шага с учетом падения напряжения в сопротивлении растеканию ног человека.

1 — потенциальная кривая; 2 — кривая, характеризующая изменение $U_{ш}$ с изменением расстояния от заземлителя

где β_2 — коэффициент напряжения шага, учитывающий падение напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек:

$$\beta_2 = \frac{R_h}{R_h + 2R_n}$$

или с учетом (3.84)

$$\beta_2 = \frac{R_h}{R_h + 6\rho} \quad (3.96)$$

Пример 3.12. Определить $U_{ш}$, если $\beta_1 = 0,62$ (см. пример 3.11); $\rho = 10^2$ Ом·м; $R_h = 10^3$ Ом.

Решение. Из (3.96) находим

$$\beta_2 = 10^3 / (10^3 + 6 \cdot 10^2) = 0,625.$$

Подставив данные в (3.95), получим

$$U_{ш} = 0,62 \cdot 0,625 \varphi_3 \approx 0,39 \varphi_3.$$

3.6. ЗАЗЕМЛИТЕЛЬ В МНОГОСЛОЙНОЙ ЗЕМЛЕ

а) Общие сведения

До сих пор, рассматривая явления стекания тока в землю, мы считали, что земля во всем своем объеме однородна, т. е. в любой точке обладает одинаковым удельным сопротивлением ρ , Ом·м.

В действительности земля, как известно, не является однородной, а имеет слоистое строение, хотя в большинстве случаев явно выраженных границ между слоями нет. Слои земли расположены практически горизонтально и представляют собой грунты различного рода, с разным минеральным составом, разной структурой, пористостью, плотностью и температурой, а также с различным содержанием влаги, солей и пр., поэтому удельные сопротивления различных слоев земли могут значительно различаться. Обычно верхние слои земли имеют большее удельное сопротивление, чем нижележащие. В редких случаях бывает наоборот, например когда под поверхностью земли находятся горные породы, обладающие, как правило, весьма большим сопротивлением. Такое же положение наблюдается в теплое время года в районах вечной мерзлоты, когда глубинные слои земли, более холодные, чем верхние, имеют более высокое сопротивление.

Кроме того, значение ρ верхних слоев земли колеблется в течение года, причем в значительных пределах, в связи с изменением погодных условий, влекущих за собой изменение температуры грунта, содержания в нем влаги, солей и т. п. Эти изменения принято называть сезонными, а толщину слоя земли, подверженного сезонным изменениям, — слоем сезонных изменений и обозначать h_c . Для оценки влияния климата местности на сопротивление земли территория СССР условно разделена на четыре климатические зоны* от I до IV, в которых h_c имеет следующие значения:

Климатическая зона	I	II	III	IV
Толщина слоя сезонных изменений h_c , м	2,2	2,0	1,8	1,6

Слои земли, лежащие ниже слоя сезонных изменений, как менее подверженные воздействию погодных условий имеют обычно незначительные сезонные колебания удельного сопротивления, и поэтому считается, что удельные сопротивления этих слоев в течение года неизменны.

Учет неоднородности земли, т. е. наличия в ней горизонтальных слоев с разными удельными сопротивлениями, значительно повышает точность расчета заземлителей и, следовательно, удешевляет их сооружение. С другой стороны, учет слоистости земли весьма усложняет сам расчет, а также экспериментальное определение удельного сопротивления слоев грунта.

Однако в последние годы все шире начинает внедряться в практику метод расчета заземлителей, при котором условно принимается, что земля имеет два слоя — верхний и нижний, обладающих каждый своим удельным сопротивлением ρ_1 и ρ_2 (рис. 3.31). При этом толщина (или, как принято говорить, мощность) верхнего слоя h_1 может быть равной или больше мощности слоя сезонных изменений h_c . Следовательно, верхний слой (весь или частично) подвержен непосредственному воздействию погодных условий и его удельное сопротивление ρ_1 имеет значительные сезонные колебания, которые подлежат учету при расчетах заземлителей.

Сопротивление заземлителя растеканию тока в многослойной земле зависит от его геометрических размеров, конструкции, размещения в земле относительно ее поверхности и слоев и так называемого эквивалентного сопротивления земли ρ_z .

* Подробнее см. § 3.7.е.

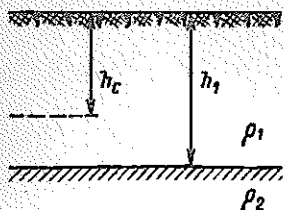


Рис. 3.31. Двухслойная модель земли:

ρ_1 и ρ_2 — удельные сопротивления верхнего и нижнего слоев земли; h_1 — мощность (толщина) верхнего слоя; h_c — мощность слоя сезонных изменений

Эквивалентным удельным сопротивлением многослойной земли называется такое удельное сопротивление однородной земли, при котором сопротивление растеканию данного электрода имеет то же значение, что и в реальном многослойном грунте.

Эквивалентное удельное сопротивление многослойной земли ρ_3 , в том числе и двухслойной, в отличие от ρ однородной земли зависит от ряда факторов: от значений ρ отдельных слоев, формы, размеров и размещения в земле заземлителей.

Оно определяется по формулам или таблицам, составленным для отдельных типов заземлителей при известных значениях удельных сопротивлений всех слоев земли, конфигурации, размерах и размещении в земле заземлителя.

Удельные сопротивления слоев земли определяются опытным путем с помощью так называемого пробного электрода, о чем подробно сказано в § 3.7, ж.

б) Одиночный заземлитель в двухслойной земле

Эквивалентное удельное сопротивление двухслойной земли для одиночных заземлителей может быть вычислено лишь в некоторых частных случаях, в том числе для вертикального стержневого электрода, а также для пластинчатого, поставленного на ребро, размещенных в обоих слоях земли (рис. 3.32). Приближенные значения ρ_3 , Ом·м, для этих электродов определяются из следующего выражения:

$$\rho_3 = \frac{l}{\Delta l_1/\rho_1 + \Delta l_2/\rho_2}, \quad (3.97)$$

где l — длина (высота) электрода, м; Δl_1 и Δl_2 — длина частей электрода, находящихся в верхнем и нижнем слоях земли соответственно, м.

Выражение (3.97) получено следующим путем. Пусть мы имеем стержневой вертикальный электрод у поверхности земли (рис. 3.32, а). Сопротивления растеканию R_1 и R_2 участков этого электрода длиной соответственно Δl_1 и Δl_2 , расположенных в разных слоях грунта

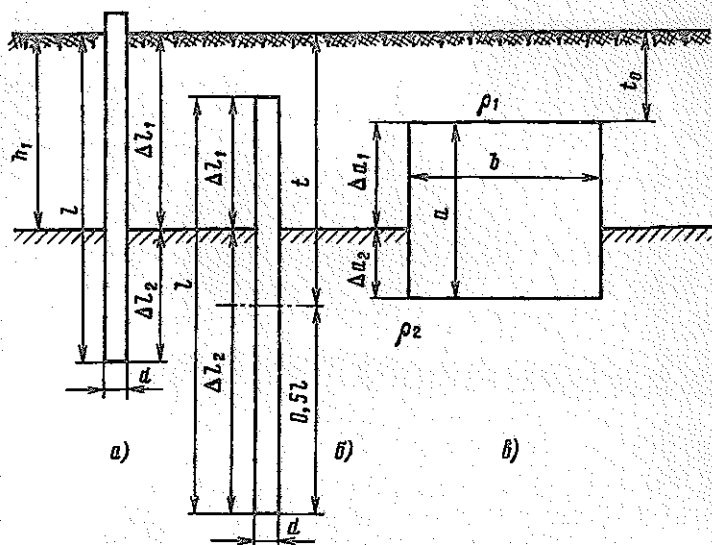


Рис. 3.32. Одиночные заземлители, размещенные в двухслойной земле:

a – вертикальный стержневой у поверхности земли; *б* – вертикальный стержневой в земле; *в* – пластинчатый в земле

с удельным сопротивлением ρ_1 и ρ_2 , включены параллельно, поэтому мы вправе написать

$$1/R_1 + 1/R_2 = 1/R, \quad (3.98)$$

где R , – эквивалентное сопротивление растеканию, т. е. сопротивление растеканию всего электрода длиной $l = \Delta l_1 + \Delta l_2$, размещенного в двухслойной земле с эквивалентным удельным сопротивлением ρ .

Воспользовавшись уравнением сопротивления растеканию одиночного стержневого вертикального заземлителя в однородной земле (табл. 3.1, п. 3)

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d},$$

заменим в (3.98) R_1 , R_2 и R , соответствующими выражениями. В результате получим

$$\frac{2\pi\Delta l_1}{\rho_1 \ln \frac{4\Delta l_1}{d}} + \frac{2\pi\Delta l_2}{\rho_2 \ln \frac{4\Delta l_2}{d}} = \frac{2\pi l}{\rho \ln \frac{4l}{d}}. \quad (3.99)$$

Допуская некоторую ошибку, принимаем, что

$$\ln \frac{4\Delta l_1}{d} = \ln \frac{4\Delta l_2}{d} = \ln \frac{4l}{d}.$$

Теперь, произведя в (3.99) необходимые сокращения, получим

$$\Delta l_1/\rho_1 + \Delta l_2/\rho_2 = l/\rho_3.$$

Искомое выражение эквивалентного удельного сопротивления двухслойной земли для вертикального стержневого электрода (размещенного у поверхности земли) будет

$$\rho_3 = \frac{l}{\Delta l_1/\rho_1 + \Delta l_2/\rho_2}.$$

Аналогичным путем можно получить это выражение и для двух других электродов, показанных на рис. 3.32.

Пример 3.13. В двухслойной земле с удельным сопротивлением верхнего и нижнего слоев $\rho_1 = 200$ Ом·м и $\rho_2 = 40$ Ом·м соответственно и мощностью верхнего слоя $h_1 = 3$ м размещены электроды — два вертикальных стержневых и один пластинчатый, показанные на рис. 3.32. Определить эквивалентные удельные сопротивления земли для этих электродов. Дано:

для вертикального стержневого электрода у поверхности земли (рис. 3.32, а) $l = 5$ м, $\Delta l_1 = 3$ м, $\Delta l_2 = 2$ м;

для вертикального стержневого электрода в земле (рис. 3.32, б) $l = 10$ м, $\Delta l_1 = 2,5$ м, $\Delta l_2 = 7,5$ м;

для пластинчатого электрода (рис. 3.32, в) $a = 2,5$ м, $\Delta a_1 = 2$ м, $\Delta a_2 = 0,5$ м, $b = 3$ м.

Решение. Подставляя эти данные в (3.97), получаем искомые эквивалентные удельные сопротивления для электродов:

вертикального у поверхности земли

$$\rho_3 = \frac{5}{3/200 + 2/40} \approx 80 \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

вертикального в земле

$$\rho_3 = \frac{10}{2,5/200 + 7,5/40} = 50 \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

пластинчатого в земле

$$\rho_3 = \frac{2,5}{2/200 + 0,5/40} = 110 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Сопротивление одиночного заземлителя растеканию тока в двухслойной земле вычисляется по соответствующей формуле из приведенных в табл. 3.1, в которой ρ необходимо заменить на ρ_3 .

Пример 3.14. Определить сопротивление растеканию $R_{\text{н}}$ пластинчатого электрода, поставленного на ребро и размещенного в обоих слоях двухслойной земли (рис. 3.32, а). Дано: $a = 1$ м; $b = 2$ м; $t_0 = 1,5$ м; $\rho_1 = 110$ Ом·м (см. пример 3.13).

Решение. Искомое сопротивление определяем по формуле, приведенной в табл. 3.1, п. 11; при этом заменяем ρ на ρ_1 :

$$R_{\text{н}} = \frac{\rho_1}{2\pi a} \left(\ln \frac{4a}{b} + \frac{a}{4t_0} \right) = \frac{110}{2\pi \cdot 1} \left(\ln \frac{4 \cdot 1}{2} + \frac{1}{4 \cdot 1,5} \right) = 15 \text{ Ом.}$$

Если же ρ_2 не известно, но даны значения удельных сопротивлений обоих слоев земли ρ_1 и ρ_2 , то сопротивление растеканию одиночных заземлителей находим с помощью специальных таблиц (например, табл. 3.7 и 3.8).

Данные табл. 3.7 позволяют определять сопротивление растеканию $R_{\text{н}}$, Ом, одиночного стержневого вертикального заземлителя в двухслойной

Таблица 3.7. Значение коэффициента A_0 , входящего в формулу (3.100) для вычисления сопротивления одиночного стержневого вертикального заземлителя (электрода) в двухслойной земле

ρ_1/ρ_2	A_0 при длине электрода l , м								
	5			10			20		
	при h_1 , м								
	1	3	5	1	3	5	1	3	5

При $d = 0,02$ м

0,5	0,182	0,142	0,115	0,107	0,093	0,082	0,060	0,056	0,052
1,0	0,204	0,204	0,204	0,114	0,114	0,114	0,063	0,063	0,063
5,0	0,225	0,322	0,626	0,120	0,141	0,170	0,065	0,070	0,076
10,0	0,228	0,348	0,966	0,121	—	0,182	—	—	—

При $d = 0,04$ м

0,5	0,164	0,128	0,104	0,098	0,084	0,074	0,055	0,051	0,048
1,0	0,187	0,187	0,187	0,104	0,104	0,104	0,057	0,057	0,057
5,0	0,203	0,290	0,564	0,109	0,128	0,155	0,059	0,064	0,069
10,0	0,205	0,314	0,780	0,110	—	0,165	—	—	—

Примечание. Расстояние h_0 от поверхности земли до верхнего конца электрода во всех случаях равно 0,5 м; d — диаметр электрода.

Таблица 3.8. Значение коэффициента B_0 , входящего в формулу (3.101) для вычисления сопротивления растеканию одиночного горизонтального заземлителя (электроды) в двухслойной земле

ρ_1/ρ_2	$h_1, \text{ м}$	$h_0, \text{ м}$	B_0 при длине электрода $l, \text{ м}$											
			5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
0.5	1	0.5	0.14	0.090	0.054	0.041	0.032	0.027	0.024	0.021	0.019	0.017	0.016	
	1	0.8	0.14	0.089	0.054	0.040	0.032	0.027	0.023	0.021	0.019	0.017	0.016	
	3	0.5—0.8	0.13	0.078	0.047	0.035	0.029	0.024	0.021	0.019	0.017	0.015	0.014	
	5	0.5—0.8	0.12	0.075	0.045	0.033	0.027	0.023	0.020	0.018	0.016	0.015	0.013	
1.0	—	0.5	0.24	0.14	0.080	0.058	0.045	0.038	0.032	0.028	0.025	0.023	0.021	
	—	0.8	0.22	0.13	0.076	0.055	0.043	0.036	0.031	0.027	0.024	0.022	0.020	
2.0	1	0.5	0.40	0.22	0.12	0.086	0.067	0.055	0.047	0.041	0.036	0.033	0.030	
	1	0.8	0.36	0.20	0.11	0.079	0.061	0.051	0.043	0.038	0.033	0.030	0.028	
	3	0.5—0.8	0.44	0.25	0.14	0.098	0.076	0.063	0.053	0.046	0.041	0.037	0.033	
	5	0.5—0.8	0.45	0.26	0.15	0.100	0.080	0.065	0.056	0.049	0.043	0.039	0.035	
5.0	1	0.5	0.86	0.47	0.24	0.170	0.130	0.110	0.089	0.076	0.067	0.060	0.054	
	1	0.8	0.74	0.39	0.21	0.140	0.110	0.089	0.075	0.065	0.058	0.052	0.047	
	3	0.5—0.8	1.06	0.58	0.31	0.220	0.170	0.130	0.110	0.098	0.086	0.077	0.069	
	5	0.5—0.8	1.11	0.63	0.34	0.230	0.180	0.150	0.120	0.110	0.095	0.085	0.077	
10.0	1	0.5	1.63	0.85	0.45	0.30	0.230	0.180	0.150	0.130	0.120	0.110	0.096	
	1	0.8	1.34	0.70	0.36	0.25	0.190	0.150	0.130	0.110	0.098	0.086	0.078	
	3	0.5—0.8	2.11	1.14	0.60	0.41	0.310	0.250	0.210	0.180	0.160	0.140	0.130	
	5	0.5—0.8	2.20	1.24	0.66	0.46	0.340	0.280	0.240	0.200	0.180	0.160	0.140	

земле (рис. 3.33, а) при известных значениях ρ_1 , ρ_2 , l , d , h_1 и $t_0 = 0,5$ м по формуле

$$R_b = A_0 \rho_2, \quad (3.100)$$

где l — длина вертикального заземлителя, м; A_0 берется из табл. 3.7.

С учетом данных табл. 3.8 можно определять сопротивление растеканию R_r , Ом, одиночного горизонтального заземлителя, размещенного в верхнем слое двухслойной земли параллельно ее поверхности (рис. 3.33, б), при известных значениях ρ_1 , ρ_2 , l , h_1 и t_0 по формуле

$$R_r = B_0 \rho_2, \quad (3.101)$$

где B_0 берется из табл. 3.8.

Для указанных выше электродов — вертикальных стержневых и пластинчатых, поставленных на ребро, сопротивление растеканию в двухслойном грунте, Ом, при известных ρ_1 и ρ_2 может быть определено без предварительного вычисления ρ_3 с помощью следующих приближенных выражений:

вертикального стержневого у поверхности земли (рис. 3.32, а)

$$R_b = \frac{\ln \frac{4l}{d}}{2\pi(\Delta l_1/\rho_1 + \Delta l_2/\rho_2)}; \quad (3.102)$$

вертикального стержневого в земле (рис. 3.32, б)

$$R_b = \frac{\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l}}{2\pi(\Delta l_1/\rho_1 + \Delta l_2/\rho_2)}; \quad (3.103)$$

пластинчатого в земле (рис. 3.32, в)

$$R_n = \frac{\ln \frac{4a}{b} + \frac{a}{4t_0}}{2\pi(\Delta a_1/\rho_1 + \Delta a_2/\rho_2)}. \quad (3.104)$$

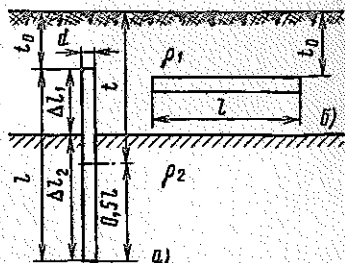


Рис. 3.33. Одиночные заземлители — вертикальный (а) и горизонтальный (б) — в двухслойной земле

Пример 3.15. Определить сопротивление растеканию тока одиночных заземлителей — вертикального стержневого и горизонтального — в двухслойной земле (см. рис. 3.33). Оба электрода имеют одинаковую длину $l = 10$ м. Диаметр вертикального электрода $d = 0,04$ м. Глубина погружения электродов в землю t_0 составляет: вертикального 0,5, горизонтального 0,8 м. Длина частей вертикального электрода, находящихся в верхнем и нижнем слоях земли, равна соответственно $\Delta l_1 = 2,5$ м, $\Delta l_2 = 7,5$ м. Удельное сопротивление верхнего и нижнего слоев земли ρ_1 и ρ_2 равно 200 и 40 Ом·м соответственно. Мощность верхнего слоя $h_1 = 3$ м.

Решение.

Для вертикального заземлителя сопротивление растеканию определим двумя способами: по (3.100) с помощью табл. 3.7 и по (3.103).

По табл. 3.7 для $\rho_1 : \rho_2 = 200 : 40 = 5$; $l = 10$ м; $d = 0,04$ м; $h_1 = 3$ м находим $A_0 = 0,128$. Тогда по (3.100) будем иметь

$$R_0 = A_0 \rho_2 = 0,128 \cdot 40 = 5,12 \text{ Ом.}$$

По (3.103)

$$R_0 = \frac{\ln \frac{2 \cdot 10}{0,04} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 5,5 + 10}{4 \cdot 5,5 - 10}}{2\pi(2,5/200 + 7,5/40)} = 5,4 \text{ Ом.}$$

Для горизонтального заземлителя по табл. 3.8 в соответствии с данными $\rho_1 : \rho_2 = 200 : 40 = 5$; $l = 10$ м; $h_1 = 3$ м; $t_0 = 0,8$ м находим $B_0 = 0,58$, тогда по (3.101) получаем

$$R_r = B_0 \rho_2 = 0,58 \cdot 40 = 23,2 \text{ Ом.}$$

в) Групповой заземлитель в двухслойной земле

Сопротивление растеканию группового заземлителя в двухслойной земле R зависит от его конфигурации, параметров и эквивалентного удельного сопротивления земли ρ_2 . Значение R вычисляется по тем же формулам, по которым вычисляется сопротивление растеканию аналогичных заземлителей в однородной земле при условии замены удельного сопротивления однородной земли на ρ_2 .

Так, для вычисления сопротивления растеканию сложного группового заземлителя в двухслойной земле, выполненного в виде горизонтальной сетки (или контура) с вертикальными электродами (рис. 3.34, а), может быть использована формула (3.65)

$$R = A \frac{\rho_2}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_2}{L_r + n l_b} \quad (3.105)$$

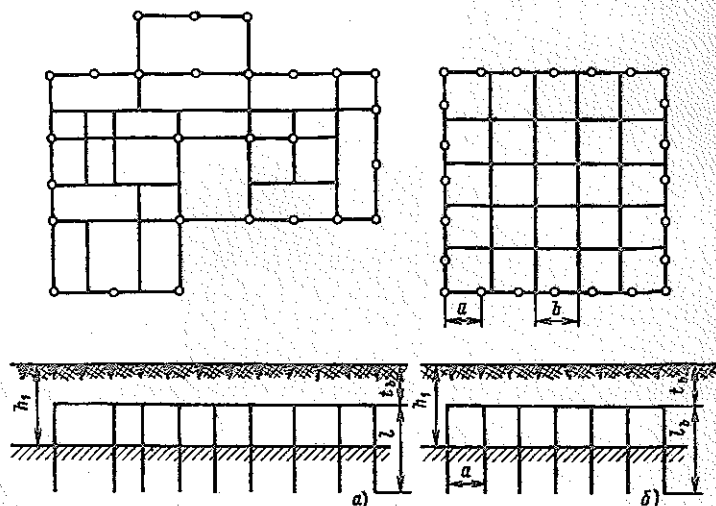


Рис. 3.34. Сложные групповые заземлители в двухслойной земле, выполненные в виде горизонтальной сетки с вертикальными электродами:

a — сетка неправильной формы, вертикальные электроды размещены неравномерно; *б* — сетка квадратная с квадратными ячейками одинакового размера и равномерно размещенными вертикальными электродами по контуру заземлителя

При отсутствии вертикальных электродов в указанной конструкции заземлителя применима формула (3.69)

$$R = 0,444 \frac{\rho_2}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_2}{L_r} \quad (3.106)$$

Эквивалентное удельное сопротивление двухслойной земли, Ом, для сложного группового заземлителя в виде горизонтальной квадратной сетки с квадратными ячейками одинакового размера и равномерно размещенными вертикальными электродами по контуру (периметру) заземлителя* (рис. 3.34, б) вычисляется по следующей формуле

$$\rho_2 = \rho_2 (\rho_1/\rho_2)^k, \quad (3.107)$$

где ρ_1 и ρ_2 — удельные сопротивления верхнего и нижнего слоев земли соответственно, Ом·м; k — показатель степени:

* К такой конфигурации может быть приведен любой сложный заземлитель в виде горизонтальной сетки (см. с. 110).

при $0,1 \leq \rho_1/\rho_2 \leq 1$

$$k = 0,32 \left(1 + 0,26 \ln \frac{h_1}{l_B} \right); \quad (3.108)$$

при $1 \leq \rho_1/\rho_2 \leq 10$

$$k = 0,43 \left(l_{\text{отн}} + 0,272 \ln \frac{a\sqrt{2}}{l_B} \right); \quad (3.109)$$

h_1 — толщина верхнего слоя земли, м; l_B — длина вертикального электрода, м; a — расстояние между вертикальными электродами, м; $l_{\text{отн}}$ — относительная длина верхней части вертикального электрода, т. е. части, находящейся в верхнем слое земли, м:

$$l_{\text{отн}} = (h_1 - t_B)/l_B; \quad (3.110)$$

t_B — глубина погружения в землю верхнего конца вертикального электрода, м.

Для того же заземлителя значение ρ_2 может быть определено также с помощью табл. 3.9.

Таблица 3.9. Относительное эквивалентное расчетное удельное сопротивление для горизонтальных сеток с вертикальными электродами ρ_1/ρ_2

ρ_1/ρ_2	a/l_B	ρ_2/ρ_1 при относительной длине верхней части заземлителя $l_{\text{отн}}$						
		0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	0,95
0,125	0,5–2	0,95	0,9	0,8	0,7	0,62	0,54	0,52
0,25	0,5–4	0,97	0,93	0,85	0,78	0,71	0,65	0,64
0,5	0,5–4	0,99	0,96	0,92	0,88	0,83	0,79	0,77
1,0	1–4	1	1	1	1	1	1	1
2,0	1	1,02	1,03	1,05	1,1	1,13	1,3	1,4
	2	1,03	1,07	1,1	1,13	1,15	1,32	1,5
	4	1,05	1,17	1,13	1,15	1,2	1,38	1,6
5,0	1	1,05	1,1	1,15	1,22	1,35	1,86	2,4
	2	1,22	1,26	1,35	1,43	1,54	2,12	2,7
	4	1,33	1,41	1,5	1,65	1,83	2,6	3,5
10	1	1,1	1,2	1,28	1,38	1,62	2,5	3,7
	2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,75	5,5
	4	1,52	1,7	1,88	2,08	2,33	3,52	6,0

Пример 3.16. Определить значение эквивалентного удельного сопротивления ρ_3 двухслойной земли для сложного заземлителя (рис. 3.34, б) по (3.107) и табл. 3.9. Дано: $\rho_1 = 200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\rho_2 = 40 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $h_1 = 1,8 \text{ м}$; $a = 6 \text{ м}$; $l_b = 3 \text{ м}$; $t_b = 0,6 \text{ м}$.

Решение. 1. Определяем ρ_3 по (3.107). Находим отношение удельных сопротивлений $\rho_1/\rho_2 = 200/40 = 5$. По (3.110) вычисляем $l_{\text{отн}} = (1,8 - 0,6)/3 = 0,4$. Показатель степени в уравнении (3.107) вычисляем по (3.109), поскольку $1 \leq \rho_1/\rho_2 \leq 10$:

$$k = 0,43 \left(l_{\text{отн}} + 0,272 \ln \frac{a\sqrt{2}}{l_b} \right) = 0,43 \left(0,4 + 0,272 \ln \frac{6\sqrt{2}}{3} \right) = 0,294.$$

Прологарифмируем выражение (3.107), подставив в него полученные значения:

$$\ln \rho_3 = \ln \rho_2 + k \ln(\rho_1/\rho_2) = \ln 40 + 0,294 \ln 5 = 4,16,$$

откуда искомое эквивалентное удельное сопротивление $\rho_3 = 64 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

2. Определяем ρ_3 по табл. 3.9. Имея данные: $\rho_1/\rho_2 = 5$, $a/l_b = 6/3 = 2$, $l_{\text{отн}} = 0,4$, находим в соответствующей графе таблицы $\rho_3/\rho_2 = 1,54$, откуда $\rho_3 = 1,54\rho_2 = 1,54 \cdot 40 = 62 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Коэффициент напряжения прикосновения α_1 (наибольшее значение) для сложного группового заземлителя в двухслойной земле, выполненного в виде квадратной сетки с квадратными клетками одинакового размера и равномерно размещенными по его контуру вертикальными электродами (рис. 3.34, б), может быть определен из следующего выражения:

$$\alpha_1 = \frac{M}{\left(\frac{l_b L_r}{a\sqrt{S}} \right)^{0,45}} \quad (3.111)$$

или по упрощенной формуле, предложенной автором,

$$\alpha_1 = \left(1,68 - \frac{0,68}{\rho_1/\rho_2} \right) \sqrt{\frac{S}{L_r L_b}}, \quad (3.112)$$

где M — параметр, зависящий от отношения удельных сопротивлений верхнего ρ_1 и нижнего ρ_2 слоев земли:

ρ_1/ρ_2	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	10,0
M	0,36	0,50	0,62	0,69	0,72	0,75	0,77	0,79	0,80	0,82

L_r — общая длина всех горизонтальных электродов заземлителя, м; S — площадь территории, занимаемой заземлителем (площадь заземлителя), м^2 ; L_b — общая длина всех вертикальных электродов, м.

Пример 3.17. Определить наибольшее значение коэффициента напряжения прикосновения α_1 для заземлителя в двухслойной земле в виде квадратной сетки со стороной $\sqrt{S}$ с квадратными клетками одинакового размера и равномерно размещенными по контуру заземлителя вертикальными электродами (рис. 3.34, б). Дано: $\sqrt{S} = 36$ м; $\rho_1 = 200$ Ом·м; $\rho_2 = 40$ Ом·м; $l_b = 3$ м; $a = 6$ м.

Решение. 1. Определяем α_1 по (3.111). Находим отношение удельных сопротивлений $\rho_1/\rho_2 = 200/40 = 5$ и по цифровой зависимости, приведенной выше, вычисляем параметр $M = 0,75$. По рис. 3.34, б подсчитываем общую длину горизонтальных электродов $L_r = 12 \cdot 36 = 432$ м. Подставив в (3.111) значения входящих в нее величин, получим искомый коэффициент прикосновения

$$\alpha_1 = \frac{M}{\left(\frac{l_b L_r}{a \sqrt{S}}\right)^{0,45}} = \frac{0,75}{\left(\frac{3 \cdot 432}{6 \cdot 36}\right)^{0,45}} = 0,31.$$

2. Определяем α_1 по (3.112). Подсчитываем по рис. 3.43, б количество вертикальных электродов n или, располагая значениями длины одной стороны квадратной сетки $\sqrt{S} = 36$ м и расстояния между вертикальными электродами $a = 6$ м, вычисляем n как частное от деления длины периметра сетки на a :

$$n = 4\sqrt{S}/a = 4 \cdot 36/6 = 24 \text{ шт.}$$

Затем находим общую длину вертикальных электродов

$$L_b = n l_b = 24 \cdot 3 = 72 \text{ м.}$$

Теперь по (3.112) определяем

$$\alpha_1 = \left(1,68 - \frac{0,68}{\rho_1/\rho_2}\right) \sqrt{\frac{S}{L_r L_b}} = \left(1,68 - \frac{0,68}{5}\right) \frac{36}{\sqrt{432 \cdot 72}} \approx 0,315.$$

3.7. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЗЕМЛИ

а) Общие сведения

Земля является плохим проводником электрического тока: проводимость ее в несколько миллиардов раз меньше проводимости металлов*. Однако поскольку площадь земли, через которую проходит ток, обычно весьма велика, земля оказывает сравнительно небольшое сопротивление току.

* Например, при средних значениях удельного сопротивления грунта $\rho = 10^2$ Ом·м и меди $\rho_m = 175 \cdot 10^{-10}$ Ом·м (при 20°C) получим $\rho/\rho_m = 5,7 \cdot 10^9$, т. е. сопротивление грунта в 5,7 млрд. раз больше сопротивления меди.

Грунт представляет собой дисперсное пористое тело, состоящее из трех частей: твердой, жидкой и газообразной (рис. 3.35).

Твердая часть грунта — это мелкие частицы различных минералов, являющиеся продуктом разрушения и выветривания горных пород, а также перегноя — органической части почвы. Размеры этих частиц обычно находятся в пределах от сотых долей микрона до 1 мм.

Жидкая часть грунта, так называемый почвенный раствор, — это вода и растворенные в ней вещества, которые содержатся также в твердой и газообразной частях грунта. Воду условно можно разделить на две формы: связанную и свободную.

Связанная вода — тонкая водяная пленка, окружающая твердые частицы грунта и удерживаемая ими с большой силой. Это явление объясняется наличием на поверхности почвенных частиц электрически не насыщенных активных центров, которые обуславливают притяжение к их поверхности молекул воды и ионов растворенных в ней солей.

Свободная вода — вода, не подверженная влиянию сорбционных сил, т. е. не сосредоточенная около почвенных частиц. Она может свободно перемещаться в порах и пустотах грунта.

Газообразная часть грунта — воздух и водяной пар, заполняющие не занятые водой пространства в грунте, а также содержащиеся в свободной воде в виде местных включений.

Электрическое сопротивление грунта характеризуется его объемным удельным сопротивлением ρ , т. е. сопротивлением куба грунта с ребром длиной 1 м или 1 см.

Единицей удельного сопротивления является соответственно ом на метр или ом на сантиметр ($1 \text{ Ом} \cdot \text{м} = 100 \text{ Ом} \cdot \text{см}$).

Значение ρ земли колеблется в широких пределах — от десятков до тысяч ом на метр, так как оно зависит от многих факторов, в том числе от влажности, температуры, рода грунта, степени его уплотненности, а также от времени года.



Рис. 3.35. Схематическая структура грунта:

1 — твердая часть; 2 — связанная вода; 3 — свободная вода; 4 — газообразная часть (воздух, пары воды)

6) Зависимость ρ грунта от влажности

Грунты любого рода — песок, глина, чернозем — в абсолютно сухом состоянии обладают большим удельным сопротивлением (свыше 10^4 Ом·м), т. е. практически не проводят ток. Это справедливо для грунтов как с малым, так и с большим содержанием растворимых веществ, ибо, как известно, сухие соли, безводные кислоты и основания в твердом виде тока не проводят.

Если же грунт увлажнить, то сопротивление его уменьшится в десятки, даже сотни раз благодаря растворению в воде солей, кислот и оснований, содержащихся в грунте, а также за счет проводимости самой воды.

Понятно, что сопротивление грунта значительно снизится и в том случае, если вода обладает большим сопротивлением, равным, например, сопротивлению сухого грунта.

Из сказанного следует, что *основной проводник тока в грунте — это его жидкая часть, т. е. почвенный раствор.*

Как всякая проводящая жидкость, почвенный раствор является электролитом и обладает ионной проводимостью, т. е. заряды в нем переносятся не электронами, как это имеет место в металлических проводниках, а ионами, образовавшимися в результате электрической диссоциации (распада) молекул солей, кислот и оснований при растворении их в воде.

Под влиянием электрического поля в растворе возникает направленное перемещение ионов к электродам, что и обуславливает проводимость грунта. При этом чем больше переносится ионов в единицу времени через единицу площади (при данных напряженности поля и температуре раствора), тем больше ток, т. е. тем выше проводимость грунта. Отсюда можно сделать вывод: чем больше в грунте содержится воды и растворимых веществ, тем меньше его удельное сопротивление. Однако эта закономерность справедлива лишь в определенных пределах.

Так, при высокой концентрации ионов в почвенном растворе, что соответствует большому содержанию растворимых веществ в грунте или малой его влажности, расстояния между ионами оказываются небольшими; это приводит к возрастанию сил межуионного притяжения, снижению скорости перемещения ионов из-за тормозящего действия этих сил, а в результате — к росту удельного сопротивления грунта.

При низкой концентрации ионов, что соответствует малому содержанию растворимых веществ в грунте или большой его влажности, тормозящая роль межуионных связей практически отсутствует и ионы перемещаются с большей скоростью. Тем не менее число ионов, проходящих через единицу площади за некоторый отрезок времени, может быть очень небольшим, что также свидетельствует о возрастании ρ грунта.

Таким образом, для грунтов существуют некоторые оптимальные значения влажности и содержания растворимых веществ, при которых ρ достигает минимума.

В практических условиях резкое снижение ρ грунта наблюдается обычно при увеличении влажности до 15–20 % (по массе). Дальнейшее увлажнение мало влияет на его сопротивление. При влажности более 70–80 % ρ грунта может возрасти за счет снижения концентрации растворимых в воде веществ (рис. 3.36).

Соотношение между количествами связанной и свободной воды в грунте также влияет на его удельное сопротивление. Дело в том, что для перемещения ионов, содержащихся в связанной воде, требуется значительно больше энергии, поскольку в этом случае необходимо преодолеть усилия, удерживающие ионы около твердых частиц грунта. Иначе говоря, *связанная вода обладает большим удельным сопротивлением, чем свободная*, и изменение соотношения между количествами связанной и свободной воды в грунте будет влиять на его удельное сопротивление.

Например, при 100 %-ном влагонасыщении грунта, т. е. при заполнении всех его пор водой, он имеет наибольшее количество воды обоих видов и обладает некоторым ρ . При уменьшении влагонасыщения грунта, например до 50 %, в нем почти полностью сохраняется связанная вода, имеющая более прочные связи, а содержание свободной воды снижается больше чем наполовину. Вследствие этого ρ возрастает, однако незначительно, так как в почве еще будет существовать непрерывная цепочка из хорошо проводящей свободной воды.

Дальнейшее понижение влажности будет сопровождаться возрастанием доли связанной воды и интенсивным ростом ρ и, наконец, приведет к тому, что в грунте останется лишь связанная вода в виде тонкого слоя вокруг его твердых частичек, которая также образует непрерывные электропроводящие цепочки, но с очень большим сопротивлением. Если еще уменьшить влажность, то возникнут обрывы этих цепочек, что вызовет резкое, скачкообразное возрастание ρ .

в) Зависимость ρ грунта от температуры

Температура грунта изменяется в зависимости от многих причин и оказывает существенное влияние на его удельное сопротивление.

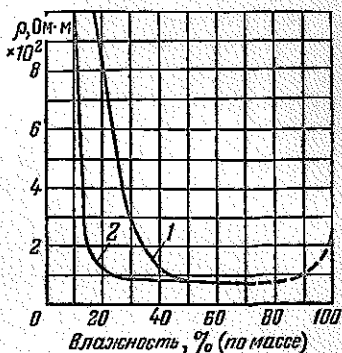


Рис. 3.36. Изменение удельного сопротивления грунта в зависимости от содержания в нем влаги:

1 — тонкодисперсный грунт; 2 — грубодисперсный грунт

Грунт, содержащий влагу, является электролитом и поэтому обладает отрицательным температурным коэффициентом сопротивления: с ростом температуры его удельное сопротивление уменьшается. Объясняется это тем, что с повышением температуры увеличивается степень диссоциации молекул веществ, растворенных в воде, т. е. возрастает концентрация ионов в растворе, что ведет обычно к снижению удельного сопротивления. Однако эта закономерность сохраняется до тех пор, пока влага не начнет испаряться, что сопровождается резким увеличением сопротивления.

Бурное испарение влаги и как следствие этого стремительный рост сопротивления грунта происходят при 100°C и выше. Такой нагрев может быть результатом прохождения через заземлитель больших токов. Высушивание грунта происходит и под воздействием температуры окружающего воздуха, т. е. при температуре почвы значительно меньше 100°C . Правда, в этом случае влаги лишается лишь верхний слой почвы толщиной обычно 50–60 см. Поэтому при устройстве заземлений в целях экономии металла заземлители размещают в земле ниже этого уровня.

При 0°C , т. е. при замерзании влаги в грунте, его удельное сопротивление возрастает скачкообразно в несколько раз, так как сопротивление льда, как правило, выше сопротивления воды, причем с увеличением содержания солей в воде возрастает разница между значениями сопротивлений воды и льда. Лишь при отсутствии солей вода (например, дистиллированная) и лед обладают практически одинаковым сопротивлением (около $10^6 - 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$)*.

Таким образом, образовавшийся в грунте лед в виде линз и тонких прослоек не только не проводит ток, но препятствует его прохождению по грунту, уменьшая проводящее сечение и удлиняя путь тока.

При дальнейшем понижении температуры грунта (ниже 0°C) рост удельного сопротивления продолжается, но менее интенсивно, чем при 0°C (рис. 3.37).

В районах вечной мерзлоты, которые занимают около 25% суши земного шара, слой вечномерзлого грунта, простираясь в глубину на десятки и сотни метров, обладает очень большим удельным сопротивлением, которое практически никогда не изменяется. Лишь у верхнего слоя земли толщиной 0,5–4,5 м ρ снижается в летнее время в не-

* Чистый лед из-за присутствия в его решетке ионов H^+ и OH^- обладает удельной ионной проводимостью, которая при -10°C составляет $1,4 \cdot 10^{-7} \text{ См/м}$.

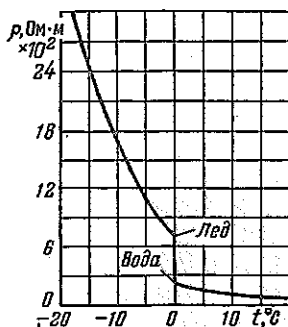


Рис. 3.37. Зависимость удельного сопротивления грунта (суглинок влажностью 15 % по массе) от температуры

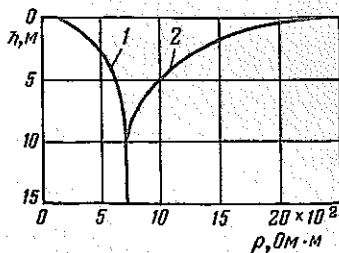


Рис. 3.38. Удельное сопротивление грунта (глина) в районе вечной мерзлоты на разных глубинах:

1 — летом при оттаившем верхнем слое грунта; 2 — зимой

сколько раз, достигая обычных значений. Однако зимой, когда температура этого слоя опускается ниже температуры глубинных слоев, его ρ оказывается в несколько раз больше удельного сопротивления этих слоев (рис. 3.38). Поэтому в районах вечной мерзлоты очень трудно создать качественное, т. е. обладающее малым сопротивлением, заземление.

г) Влияние рода грунта на его удельное сопротивление

Существует много родов грунта — глина, суглинок, песок, супесь, чернозем, садовая земля, торф, лёсс и др., сильно различающихся физической структурой и химическими свойствами.

Род грунта непосредственно не оказывает влияния на его удельное сопротивление, поскольку сухой грунт любого рода тока практически не проводит. Однако различные грунты содержат неодинаковое количество растворимых веществ, обладают различной дисперсностью, имеют различную способность удерживать свободную воду и поэтому, будучи увлажненными, оказывают различное сопротивление электрическому току (табл. 3.10).

Содержание в грунте растворимых веществ — солей, кислот, оснований — оказывает прямое влияние на его сопротивление: чем больше таких веществ, тем ниже ρ .

Дисперсность — степень измельченности твердых частишек грунта — обуславливает соотношение между количествами свободной и связанной воды, содержащейся в нем: в тонкодисперсных грунтах, имеющих большую поверхность, связанной

Таблица 3.10. Приближенные значения удельных электрических сопротивлений различных грунтов и воды

Грунт, вода	Удельное сопротивление, Ом · м		Грунт, вода	Удельное сопротивление, Ом · м	
	возможные пределы колебаний	при влажности 10–20 % массы грунта		возможные пределы колебаний	при влажности 10–20 % массы грунта
Глина	8–70	40	Скалистый	10 ⁴ –10 ⁷	—
Суглинок	40–150	100	Вода:		
Песок	400–700	700	морская	0,2–1	—
Супесь	150–400	300	речная	10–100	—
Торф	10–30	20	прудовая	40–50	—
Чернозем	9–53	20	грунтовая	20–70	—
Садовая земля	30–60	40	в ручьях	10–60	—
Каменистый	500–800	—			

воды больше, чем в грубодисперсных при тех же условиях. Следовательно, при невысокой влажности грунта (менее 50%), когда значительно повышается доля связанной воды, удельное сопротивление тонкодисперсного грунта будет значительно выше (см. рис. 3.36), чем грубодисперсного.

Способность грунта удерживать свободную воду весьма ценна, поскольку ρ обычно понижается с увеличением влажности грунта.

На практике при одних и тех же погодных условиях разные грунты содержат различное количество воды. Например, песок очень быстро лишается влаги, в то время как глина удерживает ее долго.

Для примера приведем краткие характеристики некоторых грунтов — глины, песка и чернозема.

Глина — осадочная порода, состоящая из плотных и очень мелких (размером 0,005 мм) частиц, образующих с водой пластическую массу, хорошо задерживающую влагу; богата солями, кислотами и основаниями; обладает весьма малой пористостью; содержит много связанной воды; при обычной влажности имеет относительно низкое сопротивление; является хорошим грунтом для устройства заземлений.

Песок — рыхлая смесь зерен горных пород размером 0,15–5 мм, образовавшихся главным образом вследствие разрушения этих пород. Содержит преимущественно кварц, а также глинозем, известь и окись железа. Обладает большой плотностью, малым содержанием связанной воды и растворимых веществ, плохо удерживает влагу. При обыч-

ной влажности имеет высокое сопротивление и является плохим грунтом для устройства заземлений.

Чернозем — рыхлая почва с большим содержанием гумуса (перегноя), представляющего собой совокупность продуктов микробиологической деятельности, в том числе продуктов разложения растительных остатков. Богат растворимыми веществами. Нередко обладает высокой степенью дисперсности, поэтому содержит большое количество связанной воды. Пористость его колеблется в широких пределах, он хорошо удерживает воду и часто имеет удельное сопротивление, близкое к сопротивлению глины. Является хорошим грунтом для устройства заземлений.

д) Зависимость ρ грунта от его уплотненности

Степень уплотненности грунта (плотность взаимного прилегания частиц) оказывает непосредственное влияние на его удельное сопротивление: чем выше плотность, т. е. чем лучше утрамбован грунт, тем меньше его удельное сопротивление. Объясняется это тем, что с уплотнением грунта исчезают свободные пространства между его частицами, благодаря чему увеличивается токопроводящее сечение грунта и повышается его способность удерживать влагу, а следовательно, и проводимость грунта. Например, при повышении давления на грунт с 2 до 20 кПа (с 0,2 до 2 тс/м²), что в какой-то мере характеризует рост его плотности, удельное сопротивление грунта снижается на 10–40% (в зависимости от его состава и влажности).

В связи с этим при устройстве заземлений необходимо тщательно трамбовать грунт, что в конечном итоге даст реальную экономию металла. Хорошо поддаются трамбовке чернозем, хотя при разработке он разрыхляется до 45%, а также глина, разрыхляющая на 10–30%; плохо трамбуется песок, у которого способность к разрыхлению составляет всего 5–15%.

е) Зависимость ρ грунта от времени года

Время года влияет на удельное сопротивление грунта, поскольку вследствие изменения атмосферных условий в течение года изменяются содержание влаги в грунте, его температура и количество растворенных в нем солей, кислот и оснований.

Степень и характер изменений ρ в течение года зависят от многих факторов — рода грунта, климатических условий местности, погодных условий и т. п. Поэтому заранее определить, как будет изменяться ρ в течение года в интересующем нас месте, строго говоря, невозможно. Однако опытом установлен ряд простых закономерностей, которые с достаточной для

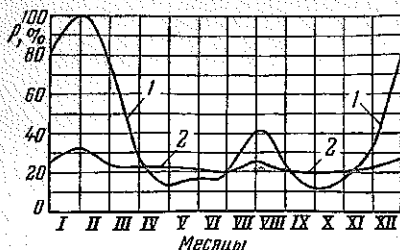


Рис. 3.39. Изменение удельного сопротивления грунта в течение года:

1 — на глубине 0,7 м; 2 — на глубине 2,5 м

практики точною позволяют оценить ожидаемое изменение ρ . Так, снижение удельного сопротивления происходит, как правило, в весенние и осенние месяцы года, когда тающий снег и дожди резко увеличивают содержание влаги в почве. Благоприятное влияние оказывает весной и повышение температуры почвы.

Увеличение ρ происходит зимой и летом вследствие замерзания и испарения влаги, причем более высокие значения ρ наблюдаются зимой (рис. 3.39).

Наибольшему влиянию погодных условий подвержены верхние слои грунта, которые зимой промерзают, весной и осенью раньше и обильнее других слоев насыщаются влагой, а летом раньше прогреваются и высыхают. В верхних слоях может иметь место вымывание растворимых веществ и, наоборот, увеличение их содержания за счет веществ, принесенных водой.

Более глубокие слои земли значительно меньше подвержены указанным влияниям, благодаря чему они обладают более стабильным удельным сопротивлением. Поэтому заземлители, глубоко закопанные в грунт, в том числе вертикальные стержневые, выполняют свою задачу лучше, чем горизонтальные заземлители, прокладываемые вблизи поверхности земли.

При проектировании заземляющих устройств необходимо в качестве расчетного брать наибольшее возможное в течение года значение ρ , т. е. ориентироваться на худший случай.

Однако измерение ρ в самое неблагоприятное время и при наиболее неблагоприятной погоде связано на практике с серьезными затруднениями, поэтому эти измерения производят, как правило, в теплое время года (май — октябрь). Измеренное удельное сопротивление $\rho_{\text{изм}}$ умножается на коэффициент сезонности ψ , учитывающий возможное повышение сопротивления в течение года.

В итоге получается расчетное значение удельного сопротивления для однородной земли, Ом·м,

$$\rho_{\text{расч}} = \rho_{\text{изм}} \psi. \quad (3.113)$$

Таблица 3.11. Признаки климатических зон для определения коэффициентов сезонности ψ

Характеристика климатической зоны	Климатические зоны СССР			
	I	II	III	IV
Средняя многолетняя низшая температура (январь), °C	От -20 до -15	От -14 до -10	От -10 до 0	От 0 до +5
Средняя многолетняя высшая температура (июль), °C	От +16 до +18	От +18 до +22	От +22 до +24	От +24 до +26
Среднегодовое количество осадков, см	~40	~50	~50	30-50
Продолжительность замерзания вод, дни	190-170	~150	~100	0

Таблица 3.12. Коэффициенты сезонности ψ для однородной земли

Климатическая зона по табл. 3.11	Влажность земли во время измерений ее сопротивления			Климатическая зона по табл. 3.11	Влажность земли во время измерений ее сопротивления		
	повышенная	нормальная	малая		повышенная	нормальная	малая

Вертикальный электрод длиной 3 м

I	1,9	1,7	1,5
II	1,7	1,5	1,3
III	1,5	1,3	1,2
IV	1,3	1,1	1,0

Горизонтальный электрод длиной 10 м

I	9,3	5,5	4,1
II	5,9	3,5	2,6
III	4,2	2,5	2,0
IV	2,5	1,5	1,1

Вертикальный электрод длиной 5 м

I	1,5	1,4	1,3
II	1,4	1,3	1,2
III	1,3	1,2	1,1
IV	1,2	1,1	1,0

Горизонтальный электрод длиной 50 м

I	7,2	4,5	3,6
II	4,8	3,0	2,4
III	3,2	2,0	1,6
IV	2,2	1,4	1,12

Примечания: I. Земля считается повышенной влажности, если измерению ее сопротивления предшествовало выпадение большого количества (свыше нормы) осадков (дождей); нормальной (средней) влажности — если измерению предшествовало выпадение небольшого количества (близкое к норме) осадков; малой влажности — если земля сухая, количество осадков в предшествующий измерению период было ниже нормы.

2. Заглубление электродов, т. е. расстояние от поверхности земли до верхнего конца вертикального электрода и до горизонтального электрода, равно 0,7-0,8 м.

Таблица 3.13. Коэффициенты сезонности ψ для слоя сезонных изменений в многослойной земле

Климатическая зона по табл. 3.11	Условная толщина слоя сезонных изменений h_c , м	Влажность земли во время измерений ее сопротивления		
		повышенная	нормальная	малая
I	2,2	7,0	4,0	2,7
II	2,0	5,0	2,7	1,9
III	1,8	4,0	2,0	1,5
IV	1,6	2,5	1,4	1,1

* См. примечание 1 к табл. 3.12.

Если измерения проводились для многослойной земли, т. е. получены значения удельных сопротивлений $\rho_{изм}$ нескольких слоев, то на коэффициент сезонности умножаются значения $\rho_{изм}$ лишь тех слоев, которые лежат в пределах толщины слоя сезонных изменений. Порядок выполнения этих вычислений указан в § 3.7, ж.

Коэффициенты сезонности ψ в значительной степени зависят от характеристики климатических зон, в которых сооружаются заземлители. Признаки климатических зон указаны в табл. 3.11. Значения ψ берутся из таблиц: для однородной земли — из табл. 3.12; для слоя сезонных изменений многослойной земли — из табл. 3.13.

ж) Измерение удельного сопротивления грунта

При проектировании заземляющего устройства необходимо знать ρ грунта в том месте, где будет сооружаться заземлитель. Пользоваться для этой цели данными таблиц, например табл. 3.10, нельзя, так как в них приводятся ориентировочные значения ρ , которые могут отличаться от истинных в десятки и сотни раз.

Удельное сопротивление однородной земли (измеренное) определяется методом разового (или глубокого) зондирования* с помощью контрольного зонда в два этапа. Вначале контрольный зонд — стержневой электрод в виде сплошного стержня или трубы диаметром $d = 4 \div 5$ см с острым наконечником — погружают в землю вертикально на

* Называется также методом простого пробного электрода.

глубину l , м, предполагаемого заложения заземлителей так, чтобы верхний его конец возвышался над землей, и замеряют его сопротивление растеканию $R_{\text{изм}}$, Ом. Затем по соответствующей формуле (см. табл. 3.1, п. 3) определяют искомое среднее измеренное удельное сопротивление земли, Ом·м,

$$\rho_{\text{изм}} = R_{\text{изм}} \frac{2\pi l}{\ln(4l/d)} \quad (3.114)$$

Для большей точности измерений контрольный зонд погружают в землю в трех-четыре места исследуемой площадки и в качестве $R_{\text{изм}}$ принимают их среднее арифметическое значение.

Пример 3.18. На участке земли в III климатической зоне предполагается выполнить заземлитель из стержней длиной 5 м, погружаемых в землю вертикально. При этом верхние концы стержней должны быть опущены на глубину 0,8 м и соединены горизонтальным полосовым заземлителем длиной 50 м. Требуется определить удельные сопротивления однородной земли — измеренное $\rho_{\text{изм}}$ и расчетные для вертикального и горизонтального заземлителей $\rho_{\text{расч.в}}$ и $\rho_{\text{расч.г}}$. Измерение сопротивлений растеканию производилось в четырех местах участка методом разового зондирования с помощью стержневого электрода диаметром $d = 4$ см с глубиной погружения его в землю $l = 6$ м (что соответствует предполагаемой глубине погружения вертикальных электродов заземлителя). Во время измерений земля была сухая, количество осадков — ниже нормы. Результаты измерения сопротивлений растеканию зонда: $R_1 = 20$ Ом, $R_2 = 16$ Ом, $R_3 = 19$ Ом, $R_4 = 17$ Ом.

Решение. Находим среднее арифметическое значение измеренного сопротивления растеканию зонда

$$R_{\text{изм}} = (20 + 16 + 19 + 17)/4 = 18 \text{ Ом.}$$

Измеренное значение удельного сопротивления земли по (3.114) будет

$$\rho_{\text{изм}} = 18 \frac{2\pi \cdot 6}{\ln(4 \cdot 6/0,04)} = 110 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

По табл. 3.12 согласно условию задачи находим коэффициенты сезонности для вертикального электрода $\psi = 1,1$ и для горизонтального электрода $\psi = 1,6$. Тогда расчетные удельные сопротивления земли по (3.113) будут: для вертикального электрода $\rho_{\text{расч.в}} = 120$ Ом·м, для горизонтального $\rho_{\text{расч.г}} = 176$ Ом·м.

Удельное сопротивление многослойной земли определяется методом послойного (или ступенчатого) зондирования* с помощью контрольного

* Называется также методом ступенчатого погружения электрода или методом погружаемого пробного электрода.

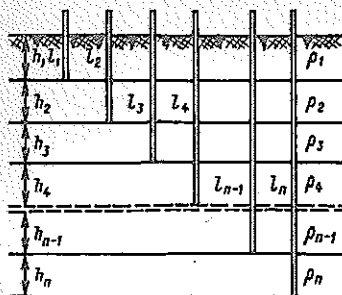


Рис. 3.40. Схема размещения контрольного зонда в земле для измерения ее удельного сопротивления методом послойного (ступенчатого) зондирования:

l — глубина погружения зонда; ρ — удельное сопротивление данного слоя земли; h — толщина (мощность) слоя земли

ного зонда, погружаемого в землю не сразу на всю длину, а в несколько приемов участками (ступенями) длиной $h_n = 0,5 \div 1,5$ м (рис. 3.40). Каждая такая ступень представляет собой как бы отдельный слой земли, сопротивление которого надо измерить. После очередного погружения измеряется сопротивление растеканию зонда $R_{n, \text{изм}}$, Ом, при данной глубине его погружения l_n , м. Затем для каждого значения $R_{n, \text{изм}}$ по (3.114) вычисляется измеренное удельное сопротивление $\rho_{n, \text{изм}}$, соответствующее данной глубине погружения зонда, Ом·м,

$$\rho_{n, \text{изм}} = R_{n, \text{изм}} \frac{2\pi l_n}{\ln(4l_n/d)}, \quad (3.115)$$

где d — диаметр зонда, м.

После этого вычисляются измеренные удельные сопротивления каждой ступени (слоя) земли, Ом·м, по выражению

$$\rho_{n, \text{изм}} = \frac{h_n}{l_n/\rho_{n, \text{изм}} - l_{n-1}/\rho_{(n-1), \text{изм}}}. \quad (3.116)$$

Зная климатическую зону местности, в которой производились измерения, и состояние земли в это время, находим по табл. 3.13 толщину слоя сезонных изменений h_c и коэффициент сезонности ψ , на который умножаем вычисленные по (3.116) $\rho_{n, \text{изм}}$ тех ступеней (слоев) грунта, которые находятся в пределах h_c .

В итоге получаем расчетные значения удельных сопротивлений верхних ступеней (слоев) грунта

$$\rho_{h, \text{расч}} = \rho_{h, \text{изм}} \psi. \quad (3.117)$$

Все остальные ступени (слои), лежащие ниже h_c , считаются не подверженными сезонным изменениям, поэтому их расчетные $\rho_{h, \text{расч}}$ оказываются равными измеренным, т. е.

$$\rho_{h, \text{расч}} = \rho_{h, \text{изм}}$$

Приведение многослойной земли к двухслойной производится путем отнесения к верхнему слою тех ступеней (слоев), у которых $\rho_{h, \text{расч}}$ имеет большие значения, а к нижнему слою — тех, у которых $\rho_{h, \text{расч}}$ имеет малые значения. При этом расчетные удельные сопротивления верхнего и нижнего слоев двухслойной земли $\rho_{1 \text{ расч}}$ и $\rho_{2 \text{ расч}}$ Ом·м, определяются следующими уравнениями:

$$\rho_{1 \text{ расч}} = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_k}{h_1/\rho_1 + h_2/\rho_2 + \dots + h_k/\rho_k}; \quad (3.118)$$

$$\rho_{2 \text{ расч}} = \frac{h_{k+1} + h_{k+2} + \dots + h_n}{h_{k+1}/\rho_{k+1} + h_{k+2}/\rho_{k+2} + \dots + h_n/\rho_n}. \quad (3.119)$$

Здесь индексы от 1 до k обозначают номера ступеней (слоев), вошедших в верхний слой двухслойной земли, а от $(k+1)$ до n — вошедших в нижний слой; $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_k, \rho_{k+1}, \rho_n$ — расчетные значения удельных сопротивлений соответствующих ступеней (слоев) земли (т. е. $\rho_{h, \text{изм}}$).

Пример 3.19. Определить расчетные удельные сопротивления двухслойной земли $\rho_{1 \text{ расч}}$ и $\rho_{2 \text{ расч}}$ на участке земли в III климатической зоне. При сооружении заземлителя предполагается использовать вертикальные стержневые электроды длиной 5 м с заглублением в землю верхних концов на 0,8–0,9 м. Измерения сопротивлений земли проводились методом послойного зондирования с использованием зонда диаметром $d = 12$ мм. Во время измерений земля была сухая, количество осадков — ниже нормы.

В итоге измерений $R_{n, \text{изм}}$ и вычислений $\rho_{n, \text{изм}}$ и $\rho_{h, \text{изм}}$ по (3.116) и (3.115) получены следующие данные:

n	1	2	3	4	5	6
h_n , м	0,8	1	1	1	1	1,2
l_n , м	0,8	1,8	2,8	3,8	4,8	6,0
$R_{n, \text{изм}}$, Ом	230	100	60	40	30	20
$\rho_{n, \text{изм}}$, Ом·м	215	177	155	133	122	110
$\rho_{h, \text{изм}}$, Ом·м	215	155	193	95	93	65

Здесь n — порядковый номер измерения (погружения) ступени; l_n — глубина погружения зонда (длина части зонда, находящейся в земле); h_n — толщина ступени (слоя), т. е. глубина очередного погружения (см. рис. 3.40).

Решение. По табл. 3.13 в соответствии с условиями задачи находим $h_c = 1,8$ м и $\psi = 1,5$. Следовательно, лишь первые две ступени (слоя) оказываются в пределах h_c , и их $\rho_{h, \text{изм}}$ умножаем на ψ . Получаем значения расчетных удельных сопротивлений всех слоев грунта: $\rho_{h1, \text{расч}} = 215 \cdot 1,5 = 322$ Ом·м; $\rho_{h2, \text{расч}} = 155 \cdot 1,5 = 232$ Ом·м; $\rho_{h3, \text{расч}} = 193$ Ом·м; $\rho_{h4, \text{расч}} = 95$ Ом·м; $\rho_{h5, \text{расч}} = 93$ Ом·м; $\rho_{h6, \text{расч}} = 65$ Ом·м.

Очевидно, что в данном случае первые три ступени (слоя), имеющие значительно большие ρ , следует отнести к верхнему слою двухслойной земли, а другие три — к нижнему. Мощность верхнего слоя при этом $h_1 = 2,8$ м.

Искомые расчетные удельные сопротивления верхнего и нижнего слоев двухслойной земли согласно (3.118) и (3.119) будут

$$\rho_{1\text{расч}} = \frac{0,8 + 1 + 1}{0,8/322 + 1/232 + 1/193} \approx 230 \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$\rho_{2\text{расч}} = \frac{1 + 1 + 1,2}{1/95 + 1/93 + 1,2/65} \approx 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Эквивалентное удельное сопротивление двухслойной земли для некоторых типов электродов определяется по указаниям, приведенным в § 3.6, б, а для сложных заземлений — в § 3.6, в.

Методы измерения сопротивления растеканию контрольного зонда различны. Наиболее широкое распространение получил простой метод амперметра — вольтметра. Сущность его заключается в том, что с помощью амперметра измеряется ток I_x , проходящий через контрольный зонд (вертикальный электрод) в землю, а с помощью вольтметра — потенциал этого зонда ϕ_x . В результате получаем искомое сопротивление растеканию контрольного зонда, Ом,

$$R_{\text{изм}} = \phi_x / I_x.$$

На рис. 3.41, а приведена схема измерения $R_{\text{изм}}$ указанным методом, из которой видно, что кроме контрольного зонда X требуются еще два вспомогательных электрода: токовый электрод T , предназначенный для создания цепи тока I_x , и потенциальный электрод $П$, служащий для подключения одного из проводов вольтметра к точке земли с нулевым потенциалом.

Эта же схема может быть использована для измерения сопротивления группового заземлителя. При этом расстояния между заземлителем и электродами должны быть не меньше указанных на рис. 3.41, б.

В качестве источника тока применяется однофазный понижающий трансформатор, например сварочный. Питание непосредственно от сети недопустимо, так как всякая связь сети с землей (заземленная нейтраль, плохая изоляция и т. п.) существенно искажает результаты измерений.

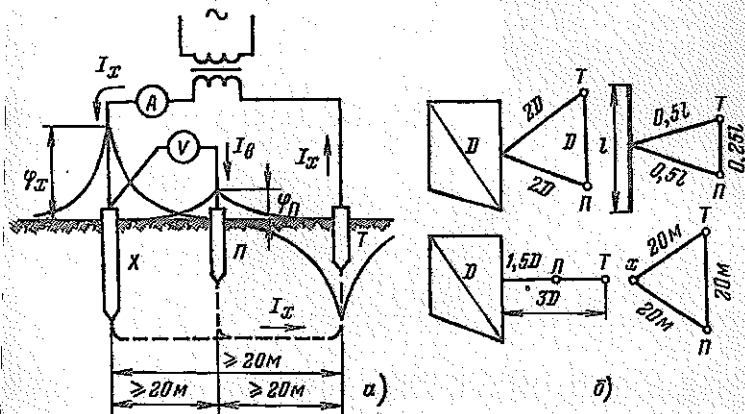


Рис. 3.41. Измерение сопротивления растеканию контрольного зонда (электрода) X и заземлителей различной конфигурации методом амперметра – вольтметра:

a – схема измерения; b – рекомендуемое взаимное расположение электродов (зондов) и минимальные расстояния между шпиль и испытуемым заземлителем

Строго говоря, вольтметр показывает не весь потенциал контрольного зонда φ_x , а лишь большую его часть. В самом деле, из схемы, приведенной на рис. 3.41, a , видно, что показание вольтметра, B ,

$$U = \varphi_x - \varphi_n = \varphi_x - I_B R_n,$$

где φ_n – потенциал вспомогательного (потенциального) электрода, B ; I_B – ток вольтметра, A ; R_n – сопротивление растеканию потенциального электрода, Ом.

Для повышения точности измерений необходимо предельно снизить φ_n , что достигается уменьшением R_n и применением вольтметра с сопротивлением R_B , значительно большим, чем R_n .

Ошибка измерений γ , %, определяется из уравнения

$$\gamma = \frac{R_n}{R_B + R_n} 100. \quad (3.120)$$

Из этого уравнения видно, что для того чтобы γ не превышала 2%, R_B должно в 50 раз превышать R_n .

Уравнение (3.120) получено следующим путем.

Имея в виду, что $\varphi_n = I_B R_n$, а ток вольтметра $I_B = (\varphi_x - \varphi_n) / R_B$ (рис. 3.41, a), получим $\varphi_n (R_B + R_n) = \varphi_x R_n$, откуда $\varphi_n / \varphi_x = R_n / (R_B + R_n)$. Тогда γ , %, будет

$$\gamma = \frac{R_n}{R_B + R_n} 100.$$

Сопротивление растеканию контрольного зонда, а также сопротивление заземляющих устройств можно измерять различными приборами, в том числе специальными измерителями сопротивления заземления М-416, выпускаемыми взамен широко известных приборов МС-08.

Глава 4

АНАЛИЗ ОПАСНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ ТОКОМ В РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

4.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Все случаи поражения человека током в результате электрического удара, т. е. прохождения тока через человека, являются следствием его прикосновения не менее чем к двум точкам электрической цепи, между которыми существует некоторое напряжение. Опасность такого прикосновения, оцениваемая, как известно, током, проходящим через тело человека I_h , или напряжением, под которым он оказывается, т. е. напряжением прикосновения $U_{пр}$, зависит от ряда факторов: схемы включения человека в электрическую цепь, напряжения сети, схемы самой сети, режима ее нейтрали, степени изоляции токоведущих частей от земли, а также емкости токоведущих частей относительно земли и т. п.

Таким образом, указанная опасность не однозначна: в одних случаях включение человека в электрическую цепь будет сопровождаться прохождением через него малых токов и окажется неопасным, в других токи могут достигать больших значений, способных вызвать смертельное поражение человека.

В настоящей главе мы определим зависимость опасности включения человека в электрическую цепь, т. е. значения напряжения прикосновения и тока, протекающего через человека, от перечисленных факторов. Эту зависимость необходимо знать при оценке той или иной сети по условиям техники безопасности, выборе и расчете соответствующих мер защиты, в частности заземления, зануления, защитного отключения, устройств контроля изоляции сети и т. п. При этом во всех случаях, кроме особо оговоренных, будем считать, что сопротивление основания, на котором стоит человек (грунт, пол и пр.), а также сопротивление его обуви незначительны и поэтому приняты равными нулю.

Материал этой главы распространяется на сети всех напряжений, однако большую практическую значимость он имеет для сетей до 1000 В.

Сети переменного тока бывают однофазными и многофазными. В промышленности применяют преимущественно трехфазные и значительно реже однофазные сети. Некоторые из них будут рассмотрены в настоящей главе.

Однофазные сети могут быть двухпроводными изолированными от земли или с заземленным проводом и однопроводными, когда роль второго провода играет земля, рельс и т. п. (рис. 4.1).

Двухпроводные сети используют для питания малым напряжением — 12, 24, 36 и 42 В — ручных переносных ламп, электрифицированных инструментов и подобных им потребителей, а при более высоких напряжениях — 127, 220, 380 В и выше — для питания сварочных трансформаторов, испытательных установок и других однофазных потребителей.

Однопроводные сети применяют на электрифицированном транспорте, в испытательных устройствах и т. п.

Трехфазные сети в зависимости от режима нейтрали источника тока* и наличия нейтрального или нулевого проводника могут быть выполнены по четырем схемам: 1) трехпроводной с изолированной нейтралью; 2) трехпроводной с заземленной нейтралью; 3) четырехпроводной с изолированной нейтралью; 4) четырехпроводной с заземленной нейтралью (рис. 4.2).

Нейтраль, а правильное — нейтральная точка обмотки источника или потребителя энергии, есть точка, напряжения которой относительно всех внешних выводов обмотки одинаковы по абсолютному значению. Нейтралью обладают многофазные источники и потребители энергии, обмотка которых соединена звездой. Обмотки нескольких однофазных источников или потребителей, соединенные последовательно или звездой, также могут иметь нейтральную точку, но лишь одну, общую для всех обмоток (рис. 4.3).

В сетях однофазных и многофазных, питающихся от источников энергии, не имеющих нейтральной точки**, может быть создана так называемая искусственная нейтральная точка с помощью резисторов, трансформаторов и т. п.

* То есть в зависимости от того, изолирована от земли или заземлена нейтраль.

** Например, трансформатор трехфазного тока, обмотки которого соединены треугольником.

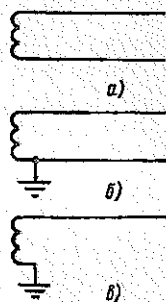


Рис. 4.1. Схемы однофазных сетей:

а — двухпроводная изолированная от земли; б — двухпроводная с заземленным проводом; в — однопроводная

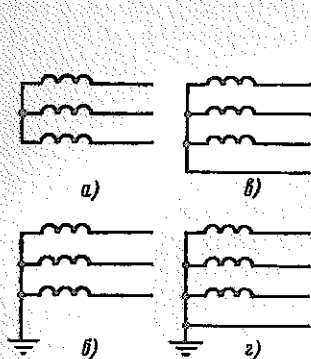


Рис. 4.2. Схемы трехфазных сетей:

трехпроводная с изолированной (а) и заземленной (б) нейтралью; четырехпроводная с изолированной (в) и заземленной (г) нейтралью

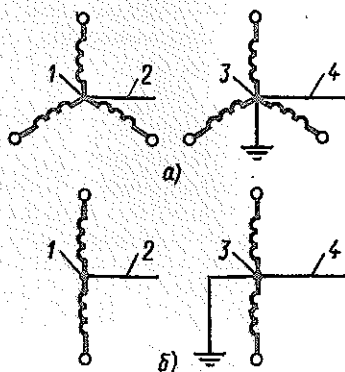


Рис. 4.3. Нейтральные и нулевые точки и проводники обмоток источников (потребителей) энергии — трехфазных (а) и однофазных, соединенных последовательно (б);

1 — нейтральная точка; 2 — нейтральный проводник; 3 — нулевая точка; 4 — нулевой проводник

Заземленная нейтральная точка носит название нулевой точки. Нейтраль, заземленная путем непосредственного присоединения к заземлителю или через малое сопротивление (трансформатор тока и т. п.), называется также глухозаземленной нейтралью.

Проводник, присоединенный к нейтральной точке, называется нейтральным проводником, а к нулевой точке — нулевым проводником*.

При напряжении до 1000 В в нашей стране применяют в основном две из указанных схем сетей трехфазного тока — первую и четвертую, т. е. трехпроводную с изолированной нейтралью напряжением 36, 42, 127, 220, 380 и 660 В и четырехпроводную с заземленной нейтралью напряжением 220/127, 380/220 и 660/380 В. При этом в четырехпроводной сети заземление нейтрали источника тока (генератора, трансформатора) осуществляют соединением ее с заземлителем непосредственно либо через малое сопротивление (например, через трансформатор тока), и поэтому такую сеть принято называть сетью с глухозаземленной нейтралью. Наиболее распространенными в СССР являются сети 380/220 В.

Другие две из указанных схем сетей — вторую и третью (т. е. трехпроводную с заземленной нейтралью и четырехпроводную с изолиро-

* Согласно указаниям ПУЭ нулевым проводником называется также проводник, присоединенный к глухозаземленному выводу обмотки источника однофазного тока. Подробнее об этом см. в § 6.1.

анной нейтралью) при напряжении до 1000 В, как правило, не применяют, потому что в трехпроводной сети с заземленной нейтралью в случае замыкания фазы на корпус, а в четырехпроводной с изолированной нейтралью при замыкании фазы на землю невозможно обеспечить безопасность персоналу обычными способами (защитным заземлением, занулением). Эти обстоятельства подробно рассмотрены в § 6.2. Вторую и третью схемы выполняют иногда лишь в специальных установках (передвижных, лабораторных и т. п.).

Уместно отметить, что за рубежом при напряжении до 1000 В применяют и другие схемы. Так, в Голландии и Франции имеются трехфазные трехпроводные сети, нейтральная точка которых заземлена через сравнительно малое активное сопротивление. В Австралии имеются сети с так называемым переменным режимом нейтрали: при нормальной работе сети нейтраль изолирована, а в момент аварии она автоматически заземляется. Таким образом используются положительные свойства сети с изолированной нейтралью при нормальной работе и положительные свойства сети с заземленной нейтралью — в аварийный период.

При напряжении выше 1000 В в СССР применяют также две схемы трехфазных сетей: трехпроводную с изолированной нейтралью (т. е. не присоединенной к заземлителю или присоединенной через большое сопротивление) при напряжении до 35 кВ включительно и трехпроводную с нейтралью, заземленной через малое сопротивление, при напряжении 110 кВ и выше*. Третью и четвертую схемы (четырепроводные) при напряжении выше 1000 В не используют, поскольку при таких напряжениях нет необходимости в четвертом проводе.

Схемы включения человека в цепь тока могут быть различными. Однако наиболее характерны две схемы включения: между двумя фазами электрической сети и между одной фазой и землей (рис. 4.4).

Разумеется, во втором случае предполагается электрическая связь между сетью и землей. Такая связь может быть обусловлена несовершенством изоляции проводов относительно земли, наличием емкости между проводами и землей и, наконец, заземлением нейтрали источника тока, питающего данную сеть.

Применительно к сетям переменного тока первая схема соответствует двухфазному прикосновению, а вторая — однофазному.

Двухфазное прикосновение, как правило, более опасно, поскольку к телу человека прикладывается наибольшее в данной сети напряжение — линейное, а ток, A , проходящий

* Подробнее о режиме нейтрали в сетях напряжением выше 1000 В см. на с. 181.

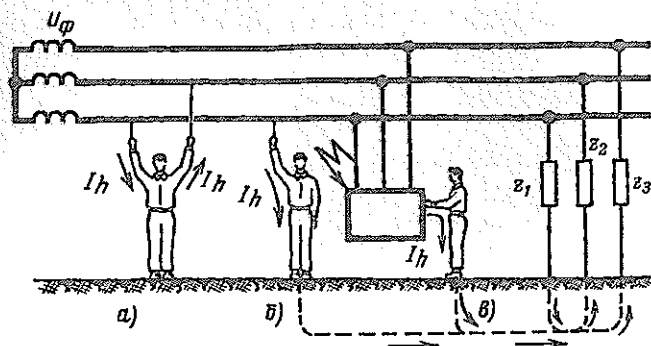


Рис. 4.4. Случаи прикосновения человека к проводам трехфазной электрической сети:

a — двухфазное прикосновение; *б* и *в* — однофазные прикосновения; z_1 , z_2 , z_3 — полные сопротивления проводов относительно земли

через человека, оказываясь не зависимым от схемы сети, режима ее нейтрали и других факторов, имеет наибольшее значение

$$I_h = U_{\text{л}}/R_h = U_{\text{ф}}\sqrt{3}/R_h,$$

где $U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}\sqrt{3}$ — линейное напряжение, В; $U_{\text{ф}}$ — фазное напряжение, В; R_h — сопротивление тела человека, Ом.

Случаи двухфазного прикосновения происходят очень редко. Они являются, как правило, результатом работы под напряжением в электроустановках до 1000 В — на щитах, сборках, воздушных линиях электропередачи (например, при замене сгоревшего предохранителя на вводе в здание) и т. п.; применения неисправных индивидуальных электрозащитных средств — диэлектрических перчаток с проколами или разрывами резины, монтерского инструмента с поврежденной изоляцией рукояток и пр.; эксплуатации оборудования с неограженными незаизолированными токоведущими частями (открытые рубильники, поврежденные штепсельные розетки, провод с поврежденной изоляцией, незащищенные зажимы сварочных трансформаторов и т. п.).

Однофазное прикосновение, как правило, менее опасно, чем двухфазное, поскольку ток, проходящий через человека, ограничивается влиянием многих факторов.

Однако однофазное прикосновение возникает во много раз чаще. Поэтому в рассматриваемых нами сетях анализируются лишь случаи однофазного прикосновения. При этом в целях упрощения принимаем, что тело человека обладает лишь ак-

тивным сопротивлением R_h , а сопротивление растеканию ног человека $R_{осн}$ и сопротивление его обуви $R_{об}$ принимаем, как указывалось, равными нулю (за исключением особо оговоренных случаев).

4.2. ОДНОФАЗНЫЕ СЕТИ

а) Сеть, изолированная от земли

Рассмотрим одну из простейших сетей — однофазную двухпроводную, изолированную от земли, у которой емкость проводов относительно земли можно принять равной нулю (рис. 4.5). Такой может быть, например, воздушная сеть до 1000 В небольшой протяженности.

Нам требуется оценить опасность прикосновения человека к одному из проводов этой сети, т. е. определить напряжение $U_{пр}$, под которым окажется человек, и ток I_h , проходящий через него, как при нормальном режиме работы сети, так и при аварийном (т. е. при замыкании какого-либо провода на землю).

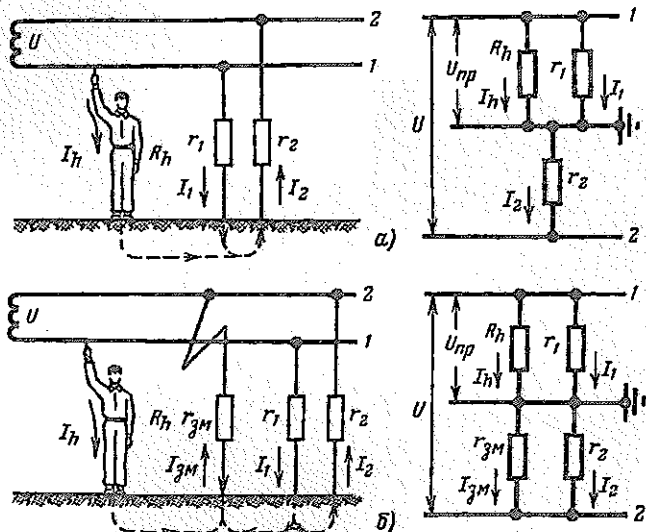


Рис. 4.5. Прикосновение человека к проводу однофазной двухпроводной сети:

а — при нормальном режиме ее работы; б — при аварийном режиме; 1, 2 — номера проводов

Считаем, что нам известны напряжения сети U , B , и сопротивления, Ом, изоляции проводов относительно земли r_1 и r_2 тела человека R_h и замыкания провода на землю $r_{зм}$.

При нормальном режиме работы сети напряжение прикосновения, т. е. напряжение, под которым оказывается человек, прикоснувшийся к одному из проводов сети, например к проводу I (рис. 4.5, а), можно определить следующим образом.

Из схемы замещения можно написать

$$U = U_{пр} + I_2 r_2 = U_{пр} + (I_h + I_1) r_2,$$

где I_1 и I_2 — токи, проходящие через сопротивления изоляции r_1 и r_2 соответственно, А.

Учитывая, что

$$I_h = U_{пр}/R_h \text{ и } I_1 = U_{пр}/r_1,$$

получаем

$$U = U_{пр} + (U_{пр}/R_h + U_{пр}/r_1) r_2 = U_{пр} (r_1 r_2 + r_1 R_h + r_2 R_h) / r_1 R_h,$$

откуда искомое напряжение прикосновения, В,

$$U_{пр} = U r_1 R_h / (r_1 r_2 + r_1 R_h + r_2 R_h), \quad (4.1)$$

а ток, проходящий через человека, А,

$$I_h = U_{пр}/R_h = U r_1 / (r_1 r_2 + r_1 R_h + r_2 R_h). \quad (4.2)$$

Из этих выражений можно сделать два вывода:

1. Чем лучше изоляция проводов относительно земли, тем меньше опасность однофазного прикосновения к проводу. Этот вывод будет особенно очевиден, если положить $r_1 = r_2 = r$; тогда (4.1) и (4.2) примут вид

$$\left. \begin{aligned} U_{пр} &= U R_h / (2 R_h + r); \\ I_h &= U / (2 R_h + r). \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Подтвердим этот вывод примером.

Пример 4.1. Человек прикоснулся к проводу однофазной двухпроводной линии, изолированной от земли (рис. 4.5, а). Дано: $R_h = 1000$ Ом; $r_1 = r_2 = r$. Определить $U_{пр}$ при $r = (1, 10, 20 \text{ и } 40) \cdot 10^3$ Ом.

Решение. По (4.3) находим, В:

$$\text{при } r = 1000 \text{ Ом } U_{пр} = U \cdot 1000 / (2 \cdot 1000 + 1000) = U/3;$$

$$\text{при } r = 10 \cdot 10^3 \text{ Ом } U_{пр} = U/12;$$

$$\text{при } r = 20 \cdot 10^3 \text{ Ом } U_{пр} = U/22;$$

$$\text{при } r = 40 \cdot 10^3 \text{ Ом } U_{пр} = U/42.$$

Следовательно, чем выше значение r , тем меньше $U_{пр}$.

2. Прикосновение человека к проводу с большим сопротивлением изоляции более опасно.

Пример 4.2. Определить I_h при прикосновении человека к проводу 1 (рис. 4.5, а) для двух случаев: $r_1 = 40$ кОм, $r_2 = 10$ кОм; $r_1 = 10$ кОм, $r_2 = 40$ кОм. Принять $R_h = 1000$ Ом, $U = 1000$ В.

Решение. По (4.2) находим:
для первого случая

$$I_h = 1000 \cdot 40 / (40 \cdot 10 + 40 \cdot 1 + 10 \cdot 1) = 91 \text{ мА};$$

для второго

$$I_h = 1000 \cdot 10 / (10 \cdot 40 + 10 \cdot 1 + 40 \cdot 1) = 22 \text{ мА}.$$

Следовательно, второй случай (прикосновение к проводу с меньшим сопротивлением изоляции) менее опасен.

Следует подчеркнуть, что эти выводы справедливы и для других сетей, в том числе трехфазных.

При аварийном режиме, когда один из проводов сети, например 2, замкнут на землю через сопротивление $r_{3м}$ (рис. 4.5, б), напряжение прикосновения и ток, протекающий через человека, прикоснувшегося к исправному проводу, определяются полученными выражениями (4.1) и (4.2), в которых r_2 должно быть заменено на r_3 — эквивалентное сопротивление параллельно включенных сопротивлений r_2 и $r_{3м}$, Ом:

$$r_3 = r_2 r_{3м} / (r_2 + r_{3м}). \quad (4.4)$$

Однако поскольку $r_{3м}$ обычно мало по сравнению с r_1 , r_2 и R_h и может быть принято равным нулю, согласно указанным выражениям напряжение $U_{пр}$ и ток I_h будут иметь наибольшие возможные значения:

$$U_{пр} \approx U, \quad I_h \approx U/R_h.$$

Пример 4.3. Определить $U_{пр}$ при прикосновении человека к проводу при аварийном режиме (рис. 4.5, б). Дано: $R_h = 1000$ Ом; $r_1 = r_2 = 1000$ Ом, сопротивление замыкания провода на землю $r_{3м} = 25$ Ом.
Решение. По (4.4) находим эквивалентное сопротивление

$$r_3 = 1000 \cdot 25 / (1000 + 25) = 24,4 \text{ Ом}.$$

Из (4.1), в котором заменяем r_2 на r_3 , получим

$$U_{пр} = U \cdot 1000 \cdot 1000 / (1000 \cdot 24,4 + 1000 \cdot 1000 + 24,4 \cdot 1000) = 0,954 U.$$

При других значениях r_1 и r_2 напряжение $U_{пр}$ практически не изменится.

Таким образом, при замыкании провода на землю человек, прикоснувшийся к исправному проводу, оказывается под напряжением, равным почти полному напряжению линии независимо от сопротивления изоляции проводов. Следовательно, при аварийном режиме защитная роль изоляции проводов практически полностью утрачена и поэтому опасность поражения человека током значительно выше, чем в случае прикосновения к тому же проводу сети в период ее нормальной работы.

б) Сеть с заземленным проводом

Рассмотрим однофазную двухпроводную сеть с заземленным проводом, емкостью которой относительно земли можно пренебречь.

При прикосновении к незаземленному проводу этой сети (рис. 4.6, а) через человека проходит ток, A ,

$$I_h = U / (R_h + r_0), \quad (4.5)$$

а напряжение прикосновения, B , равно

$$U_{пр} = UR_h / (R_h + r_0),$$

где r_0 — сопротивление заземления провода, Ом.

Из этих выражений видно, что при $r_0 \ll R_h$ человек оказывается практически под полным напряжением сети, а ток, проходящий через него, имеет наибольшее значение. В данном случае мы не учитываем сопротивлений изоляции r_1 и r_2 , влияние которых весьма незначительно.

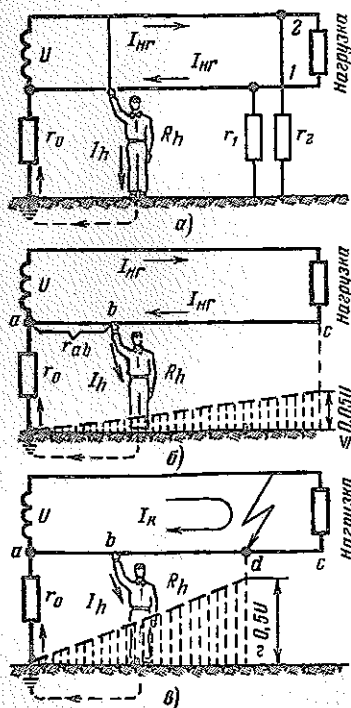


Рис. 4.6. Прикосновение человека к проводам однофазной двухпроводной сети с заземленным проводом:

а — прикосновение к незаземленному проводу; б — прикосновение к заземленному проводу при нормальном режиме работы сети; в — прикосновение к заземленному проводу при коротком замыкании между проводами

Здесь уместно отметить исключительно большое значение изолирующих полов и обуви для безопасности людей от поражения током.

В самом деле, сопротивления пола r_n и обуви $r_{об}$ включаются последовательно с сопротивлением тела человека R_h . С учетом их выражение (4.5) будет иметь вид

$$I_h = U / (R_h + r_n + r_{об} + r_0). \quad (4.6)$$

Пример 4.4. Определить I_h при прикосновении человека к проводу (рис. 4.6, а) для двух случаев: без учета и с учетом r_n и $r_{об}$. Дано: $U = 220$ В; $R_h = 1000$ Ом; $r_0 = 10$ Ом; $r_n = 30 \cdot 10^3$ Ом; $r_{об} = 20 \cdot 10^3$ Ом.

Решение. 1-й случай. Из (4.5) находим

$$I_h = 220 / (1000 + 10) = 0,22 \text{ А.}$$

Безусловно, такой ток опасен для жизни человека.

2-й случай. Из (4.6) определяем

$$I_h = 220 / (1000 + 30 \cdot 10^3 + 20 \cdot 10^3 + 10) = 0,0043 \text{ А} = 4,3 \text{ мА.}$$

Такой ток безопасен для жизни человека.

Прикосновение к заземленному проводу нередко считают безопасным, полагая, что напряжение этого провода относительно земли незначительно. В действительности это не всегда так. В самом деле, при прикосновении к заземленному проводу (рис. 4.6, б) человек оказывается под воздействием напряжения $U_{пр}$, В, равного потере напряжения в заземленном проводе на участке от места его заземления a до места касания b :

$$U_{пр} = I_{нг} r_{ab},$$

где $I_{нг}$ — ток нагрузки, проходящий по проводу, А; r_{ab} — сопротивление провода на участке ab , Ом.

В нормальных условиях $U_{пр}$ невелико; наибольшее его значение соответствует прикосновению человека к точке c и составляет не более 5% напряжения сети U (поскольку сечения проводов выбираются из условия потери напряжения не более 10%).

При коротком замыкании между проводами (рис. 4.6, в) ток резко возрастает и потеря напряжения в проводах достигает почти 100% U . При одинаковом сечении обоих проводов напряжение в точке d близко к половине напряжения сети.

Очевидно, что $U_{пр}$ возрастает практически пропорционально увеличению тока в проводе и при коротких замыканиях может достигать опасных для человека значений.

4.3. ТРЕХФАЗНЫЕ СЕТИ

а) Трехфазная четырехпроводная сеть с нейтралью, заземленной через активное и индуктивное сопротивления

Определение напряжения прикосновения и тока, проходящего через тело человека, в случае прикосновения его к одной из фаз трехфазной сети оказывается более сложным, чем в рассмотренных выше случаях.

Для упрощения расчетов воспользуемся символическим методом. Вначале рассмотрим прикосновение человека к фазному проводу трехфазной четырехпроводной сети, у которой нейтраль заземлена через активное и индуктивное сопротивления r_0 и x_L (рис. 4.7), а сопротивления изоляции проводов r , Ом, так

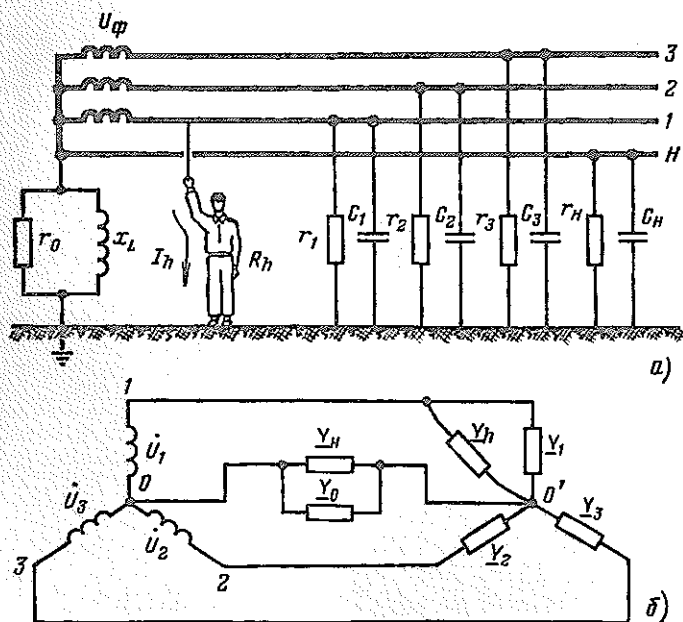


Рис. 4.7. Прикосновение человека к фазному проводу трехфазной четырехпроводной сети с нейтралью, заземленной через активное и индуктивное сопротивления:

a — схема сети; b — эквивалентная схема: 1, 2, 3 — номера фазных проводов; H — нулевой провод

же как и емкости проводов C , Φ , относительно земли, не равны между собой:

$$r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq r_n;$$

$$C_1 \neq C_2 \neq C_3 \neq C_n \neq 0.$$

Это общий и в то же время наиболее сложный случай, однако выводы, полученные при его рассмотрении, могут быть распространены путем простейших преобразований на другие трехфазные сети.

На рис. 4.7 показаны рассматриваемая сеть и ее эквивалентная схема в момент прикосновения человека к фазному проводу.

Полные проводимости, C_m , изоляции фазных и нулевого проводов относительно земли $\underline{Y}_1$, $\underline{Y}_2$, $\underline{Y}_3$, $\underline{Y}_n$ и заземления нейтрали $\underline{Y}_0$ в комплексной форме равны

$$\underline{Y}_1 = 1/r_1 + j\omega C_1 = 1/r_1 + j/x_{C1};$$

$$\underline{Y}_2 = 1/r_2 + j\omega C_2 = 1/r_2 + j/x_{C2};$$

$$\underline{Y}_3 = 1/r_3 + j\omega C_3 = 1/r_3 + j/x_{C3};$$

$$\underline{Y}_n = 1/r_n + j\omega C_n = 1/r_n + j/x_{C,n};$$

$$\underline{Y}_0 = 1/r_0 - j/\omega L = 1/r_0 - j/x_L$$

а полная проводимость тела человека

$$\underline{Y}_h = 1/R_h.$$

Здесь $\omega = 2\pi f$ — угловая частота, c^{-1} ; f — частота тока, Гц; $x_C = 1/\omega C$ — емкостное сопротивление провода относительно земли, Ом; L — индуктивность цепи заземления нейтрали, Гн; $x_L = \omega L$ — индуктивное сопротивление заземления нейтрали, Ом; R_h — сопротивление тела человека, Ом.

При прикосновении человека к одной из фаз, например фазе 1 (рис. 4.7), напряжение прикосновения, V , определится выражением

$$\dot{U}_{пр} = \dot{U}_1 - \dot{U}_0, \quad (4.7)$$

а ток, проходящий через тело человека, A , будет равен

$$I_h = \dot{U}_{пр} \underline{Y}_h = (\dot{U}_1 - \dot{U}_0) \underline{Y}_h,$$

где $\dot{U}_1$ — комплексное напряжение фазы 1 (фазное напряжение), В; $\dot{U}_0$ — комплексное напряжение между нейтралью источника тока и землей (т. е. между точками OO' на эквивалентной схеме), В.

Согласно известному методу двух узлов $\dot{U}_0$, В, можно выразить следующей зависимостью:

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_1(\underline{Y}_1 + \underline{Y}_h) + \dot{U}_2 \underline{Y}_2 + \dot{U}_3 \underline{Y}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 + \underline{Y}_h + \underline{Y}_0 + \underline{Y}_h}.$$

С учетом того, что для симметричной трехфазной системы

$$\dot{U}_1 = U_\phi; \dot{U}_2 = a^2 U_\phi; \dot{U}_3 = a U_\phi,$$

где a — фазный оператор трехфазной системы, учитывающий сдвиг фаз:

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2},$$

будем иметь

$$\dot{U}_0 = U_\phi \frac{\underline{Y}_1 + a^2 \underline{Y}_2 + a \underline{Y}_3 + \underline{Y}_h}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 + \underline{Y}_h + \underline{Y}_0 + \underline{Y}_h}.$$

Подставив это значение в (4.7), получим в комплексной форме уравнение напряжения, В, приложенного к телу человека, прикоснувшегося к фазе I трехфазной четырехпроводной сети с нейтралью, заземленной через активное и индуктивное сопротивления:

$$\dot{U}_{пр} = U_\phi \frac{\underline{Y}_2(1 - a^2) + \underline{Y}_3(1 - a) + \underline{Y}_h + \underline{Y}_0}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 + \underline{Y}_h + \underline{Y}_0 + \underline{Y}_h}. \quad (4.8)$$

Ток, проходящий через человека, получим, если умножим это выражение на $\underline{Y}_h$:

$$\dot{I}_h = \dot{U}_{пр} \underline{Y}_h = U_\phi \underline{Y}_h \frac{\underline{Y}_2(1 - a^2) + \underline{Y}_3(1 - a) + \underline{Y}_h + \underline{Y}_0}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 + \underline{Y}_h + \underline{Y}_0 + \underline{Y}_h}. \quad (4.9)$$

Пользуясь уравнениями (4.8) и (4.9), определим $U_{пр}$ и I_h при прикосновении человека к фазе наиболее распространенных трехфазных сетей: четырехпроводной с нейтралью, заземленной через малое активное сопротивление, т. е. с глухозаземленной нейтралью, и трехпроводной с изолированной нейтралью.

б) Трехфазная четырехпроводная сеть с глухозаземленной нейтралью

Выражения для $U_{пр}$ и I_h в случае прикосновения человека к фазе этой сети аналогичны (4.8) и (4.9); лишь полная проводимость заземления нейтрали имеет иное значение, а именно:

$$\underline{Y}_0 = 1/r_0. \quad (4.10)$$

При нормальном режиме работы сети проводимости фазных и нулевого проводов относительно земли по сравнению с $\underline{Y}_0$ имеют малые значения и с некоторым допущением могут быть приравнены к нулю, т. е.

$$\underline{Y}_1 = \underline{Y}_2 = \underline{Y}_3 = \underline{Y}_n = 0.$$

В этом случае (4.8) и (4.9) значительно упростятся. Так, напряжение прикосновения, $\underline{U}$, в действительной форме будет

$$\underline{U}_{\text{пр}} = U_{\phi} \frac{\underline{Y}_0}{\underline{Y}_0 + \underline{Y}_h}$$

или

$$\underline{U}_{\text{пр}} = U_{\phi} \frac{R_h}{R_h + r_0}, \quad (4.11)$$

а ток через человека, $\underline{I}$,

$$\underline{I}_h = U_{\phi} / (R_h + r_0). \quad (4.12)$$

Согласно требованиям «Правил устройства электроустановок» (ПУЭ) наибольшее значение r_0 составляет 60 Ом; сопротивление же тела человека R_h не опускается ниже нескольких сотен Ом. Следовательно, без большой ошибки в (4.11) и (4.12) можно пренебречь значением r_0 и считать, что при прикосновении к одной из фаз трехфазной четырехпроводной сети с глухозаземленной нейтралью человек оказывается практически под фазным напряжением U_{ϕ} , а ток, проходящий через него, равен частному от деления U_{ϕ} на R_h .

Пример 4.5 Человек прикоснулся к фазному проводу трехфазной четырехпроводной сети 380/220 В с глухозаземленной нейтралью. Определить ток $\underline{I}_h$, проходящий через человека. Дано: $r_0 = 4$ Ом; $R_h = 1000$ Ом; $r_1 = r_2 = r_3 = r_n = r = 10^4$ Ом; $C_1 = C_2 = C_3 = C_n = C = 0,1$ мкФ ($x_C = 32 \cdot 10^3$ Ом).

Решение. Поскольку полные проводимости каждой фазы и нулевого провода $\underline{Y}$ весьма малы по сравнению с проводимостью заземления нейтрали $\underline{Y}_0$, т. е. $\underline{Y} \ll \underline{Y}_0$ и, следовательно,

$$\left(\frac{1}{10^4} + j \frac{1}{32 \cdot 10^3} \right) \ll \frac{1}{4},$$

принимаем, что $\underline{Y}_1 = \underline{Y}_2 = \underline{Y}_3 = \underline{Y}_n = 0$. Поэтому мы вправе применить (4.12).

Тогда ток через человека

$$\underline{I}_h = 220 / (1000 + 4) \approx 220 \text{ мА}.$$

Очевидно, что и при других значениях r и C , но при условии, что $\underline{Y} \ll \underline{Y}_0$, ток через человека будет иметь практически то же значение.

Из (4.12) вытекает еще один вывод: ток, проходящий через человека, прикоснувшегося к фазе трехфазной сети с глухозаземленной нейтралью в период нормальной ее работы, практически не изменяется с изменением сопротивления изоляции и емкости проводов относительно земли, если сохраняется условие, что полные проводимости проводов относительно земли весьма малы по сравнению с проводимостью заземления нейтрали.

Этот вывод иллюстрируется кривыми 1 и 2 на рис. 4.8, построенными по данным примера 4.5.

При аварийном режиме, когда одна из фаз сети, например фаза 3 (рис. 4.9, а), замкнута на землю через относительно малое активное сопротивление $r_{3м}$, (4.8) имеет следующий вид:

$$U_{пр} = U_{\phi} \frac{Y_{3м}(1-a) + Y_0}{Y_{3м} + Y_0 + Y_h}.$$

Здесь мы также приняли, что Y_1 , Y_2 и Y_h малы по сравнению с Y_0 , а Y_3 — по сравнению с Y_0 и $Y_{3м}$, т.е. приравнены нулю.

Выполнив соответствующие преобразования и учтя, что $Y_{3м} = 1/r_{3м}$, $Y_0 = 1/r_0$; $Y_h = 1/R_h$, получим напряжение прикосновения в действительной форме, В:

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

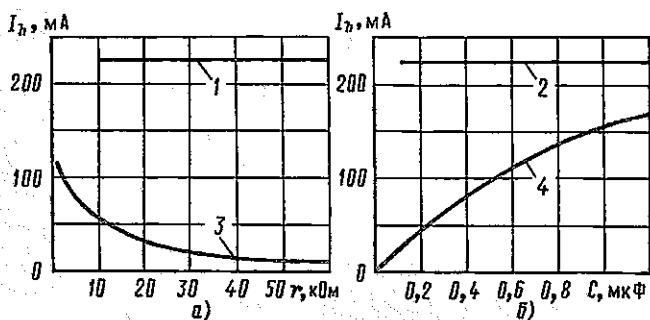


Рис. 4.8. Изменение тока I_h , проходящего через человека, при прикосновении к фазному проводу трехфазной четырехпроводной сети с заземленной нейтралью 380/220 В и трехпроводной с изолированной нейтралью 380 В в период нормальной их работы:

а — в зависимости от изменения сопротивления изоляции проводов относительно земли при условии, что $r_1 = r_2 = r_3 = r_h = r$ и $C_1 = C_2 = C_3 = C_h = 0$; б — в зависимости от изменения емкости проводов относительно земли при условии, что $r_1 = r_2 = r_3 = r_h = \infty$ и $C_1 = C_2 = C_3 = C_h = C$; 1 и 2 — четырехпроводная сеть с заземленной нейтралью; 3 и 4 — трехпроводная сеть с изолированной нейтралью

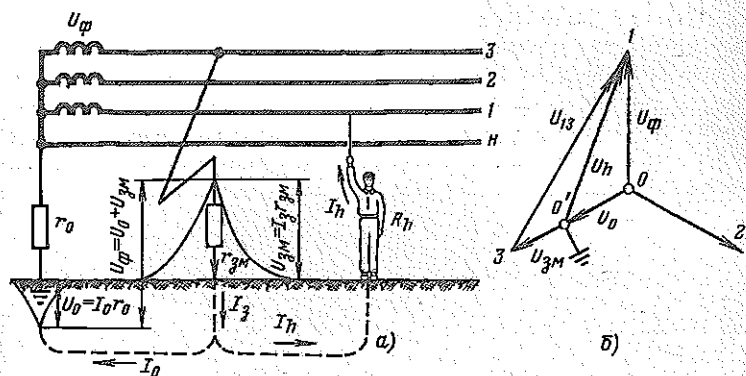


Рис. 4.9 Прикосновение человека к фазному проводу трехфазной четырехпроводной сети с заземленной нейтралью при аварийном режиме

а — схема сети; б — векторная диаграмма напряжений

В целях упрощения этого выражения допустим, что $3r_{3M}r_0 = 2\sqrt{3}r_{3M}r_0$.

В результате получим

$$U_{пр} = U_{\phi} R_h \frac{r_{3M} + r_0 \sqrt{3}}{r_{3M} r_0 + R_h (r_{3M} + r_0)}. \quad (4.13)$$

Ток через человека, А,

$$I_h = U_{\phi} \frac{r_{3M} + r_0 \sqrt{3}}{r_{3M} r_0 + R_h (r_{3M} + r_0)}. \quad (4.14)$$

Рассмотрим два характерных случая.

1. Если принять, что сопротивление замыкания провода на землю r_{3M} равно нулю, то (4.13) примет вид

$$U_{пр} = U_{\phi} \sqrt{3}.$$

Следовательно, в данном случае человек окажется под воздействием линейного напряжения сети.

2. Если принять равным нулю сопротивление заземления нейтрали r_0 , то

$$U_{пр} = U_{\phi}.$$

т. е. напряжение, под которым окажется человек, будет равно фазному напряжению.

Однако в практических условиях сопротивления $r_{зм}$ и r_0 всегда больше нуля, поэтому напряжение, под которым оказывается человек, прикоснувшийся в аварийный период к исправному фазному проводу трехфазной сети с глухозаземленной нейтралью, всегда меньше линейного, но больше фазного:

$$U_{\phi}/\sqrt{3} > U_{\text{пр}} > U_{\phi}. \quad (4.15)$$

Это положение иллюстрируется векторной диаграммой, приведенной на рис. 4.9, б и соответствующей рассматриваемому случаю.

Этот вывод вытекает также из (4.13). Так, при небольших значениях $r_{зм}$ и r_0 по сравнению с R_h первым слагаемым в знаменателе можно пренебречь. Тогда дробь при любых соотношениях $r_{зм}$ и r_0 будет всегда больше 1, но меньше $\sqrt{3}$, т. е. получим выражение (4.15).

Таким образом, прикосновение человека к исправному фазному проводу сети с глухозаземленной нейтралью в аварийный период более опасно, чем при нормальном режиме.

Пример 4.6. Человек прикоснулся к фазному проводу трехфазной четырехпроводной электрической сети напряжением 380/220 В в аварийный период, т. е. когда другой фазный провод был замкнут на землю через сопротивление $r_{зм} = 100, 50, 4$ и $0,5$ Ом (рис. 4.9, а). Определить ток I_h , проходящий через человека. Дано: $r_0 = 4$ Ом; $r_h = 1000$ Ом; $r_1 = r_2 = r_3 = r_n = r = 10^4$ Ом; $C_1 = C_2 = C_3 = C_n = C = 0,1$ мкФ ($x_C = 32 \cdot 10^3$ Ом).

Решение. Поскольку $Y_1 \ll Y_{зм}$, т. е.

$$\left(\frac{1}{10^4} + j \frac{1}{32 \cdot 10^3} \right) \ll \frac{1}{100},$$

принимая проводимости всех проводов относительно земли равными нулю. Тогда ток через человека определится уравнением (4.14). При $r_{зм} = 100$ Ом этот ток будет

$$I_h = 220 \frac{100 + 4\sqrt{3}}{100 \cdot 4 + 1000(100 + 4)} = 226 \text{ мА.}$$

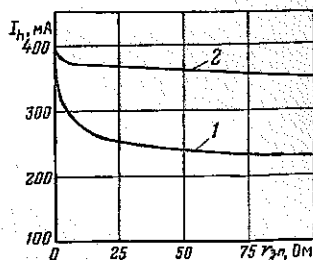
Так же определим I_h для других значений $r_{зм}$:

$r_{зм}$, Ом	100	50	4	0,5
I_h , мА	226	232	300	362

На рис. 4.10 эти данные представлены кривой 1. Нетрудно убедиться, что в этом примере ток I_h практически не изменится, если принять иные значения R_h .

Рис. 4.10. Зависимость тока I_h , проходящего через человека, при прикосновении к фазному проводу трехфазной сети 380 В при аварийном режиме от сопротивления заземления фазы $r_{3\text{м}}$:

1 — в четырехпроводной сети с заземленной нейтралью; 2 — в трехпроводной сети с изолированной нейтралью



в) Трехфазная трехпроводная сеть с изолированной нейтралью

При нормальном режиме работы рассматриваемой сети напряжение $U_{\text{пр}}$ и ток I_h в период касания человека к одной фазе, например фазе 1 (рис. 4.11), определяются уравнениями (4.8) и (4.9), в которых надо принять $\underline{Y}_n = \underline{Y}_0 = 0$.

Так, согласно (4.9) выражение для тока, А, в комплексной форме будет

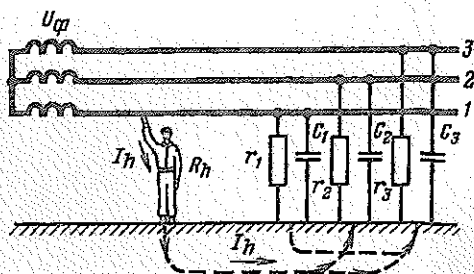
$$\underline{i}_h = U_{\phi} \underline{Y}_h \frac{\underline{Y}_2(1 - a^2) + \underline{Y}_3(1 - a)}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 + \underline{Y}_h} \quad (4.16)$$

Пользуясь этим выражением, оценим опасность прикосновения к фазному проводу для следующих трех случаев.

1. При равенстве сопротивлений изоляции и емкостей проводов относительно земли, т.е. при $r_1 = r_2 = r_3 = r$; $C_1 = C_2 = C_3 = C$, а следовательно, при $\underline{Y}_1 = \underline{Y}_2 = \underline{Y}_3 = \underline{Y}$. Ток, А, через человека в комплексной форме

$$\underline{i}_h = U_{\phi} \underline{Y}_h \frac{\underline{Y}(1 - a^2 + 1 - a)}{3\underline{Y} + \underline{Y}_h} = \frac{U_{\phi}}{1/\underline{Y}_h + 1/3\underline{Y}}$$

Рис. 4.11. Прикосновение человека к проводу трехфазной трехпроводной сети с изолированной нейтралью при нормальном режиме работы



если иметь в виду, что $(a^2 + a + 1) = 0$. Или

$$I_h = \frac{U_\Phi}{R_h + \underline{Z}/3}, \quad (4.17)$$

где $\underline{Z}$ — комплекс полного сопротивления провода относительно земли, Ом:

$$\underline{Z} = 1/\underline{Y} = \frac{1}{1/r + j\omega C}.$$

В действительной форме этот ток, A , равен

$$I_h = \frac{U_\Phi}{R_h} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r(r + 6R_h)}{9R_h^2(1 + r^2\omega^2 C^2)}}}. \quad (4.18)$$

2. При равенстве сопротивлений изоляции и отсутствии емкостей, т.е. при $r_1 = r_2 = r_3 = r$; $C_1 = C_2 = C_3 = 0$ и, следовательно, при $\underline{Y} = 1/r$ и $\underline{Z} = r$, что может иметь место в коротких воздушных сетях, ток, проходящий через человека, A , согласно (4.16) будет в действительной форме

$$I_h = \frac{U_\Phi}{R_h + r/3}. \quad (4.19)$$

Это выражение можно получить также из (4.17), в котором $\underline{Z}$ надо заменить на r , или из (4.18), приравняв в нем емкость C нулю.

3. При равенстве емкостей и весьма больших сопротивлениях изоляции, т.е. при $C_1 = C_2 = C_3 = C$; $r_1 = r_2 = r_3 = \infty$ и, следовательно, при $\underline{Y} = j\omega C = j/x_C$ и $\underline{Z} = 1/\underline{Y} = -jx_C$, что может иметь место в кабельных сетях, ток, A , через человека в комплексной форме согласно (4.16) будет

$$I_h = \frac{U_\Phi}{R_h + 1/j \cdot 3\omega C} = \frac{U_\Phi}{R_h - jx_C/3},$$

где $x_C = 1/\omega C$ — емкостное сопротивление, Ом.

Это выражение может быть получено также из (4.17), в котором $\underline{Z}$ надо заменить на $-jx_C$.

В действительной форме ток, A ,

$$I_h = \frac{U_\Phi \cdot 3\omega C}{\sqrt{9R_h^2\omega^2 C^2 + 1}} = \frac{U_\Phi}{\sqrt{R_h^2 + (x_C/3)^2}}. \quad (4.20)$$

Это выражение можно получить также из (4.18). Для этого надо открыть скобки у дробного выражения под корнем, а затем разделить числитель и знаменатель этой дроби на r^2 .

Пример 4.7. Человек прикоснулся к фазе трехфазной трехпроводной сети с изолированной нейтралью 380 В; $R_h = 1000$ Ом. Определить I_h для двух случаев:

1) при $C_1 = C_2 = C_3 = 0$ и $r_1 = r_2 = r_3 = r$; сопротивление $r = (3, 5, 10, 20, 40$ и $60) \cdot 10^3$ Ом;

2) при $C_1 = C_2 = C_3 = C$ и $r_1 = r_2 = r_3 = \infty$; емкость $C = 0,03; 0,05; 0,1; 0,3; 0,6; 1,2$ мкФ, а соответствующие ей емкостные сопротивления $x_C = (100; 64; 32; 10,6; 5,3; 2,7) \cdot 10^3$ Ом.

Решение. I_h определяем по (4.19) и (4.20).

При $r = 3000$ Ом имеем

$$I_h = \frac{220}{1000 + 3000/3} = 0,11 \text{ А} = 110 \text{ мА}.$$

При $C = 0,03$ мкФ, т. е. при $x_C = 100 \cdot 10^3$ Ом, получим

$$I_h = \frac{220}{\sqrt{1000^2 + (100 \cdot 10^3/3)^2}} = 0,0066 \text{ А} = 6,6 \text{ мА}.$$

Так же определим I_h для других значений r и C :

$r, 10^3 \text{ Ом}$	3	5	10	20	40	60
$I_h, \text{ мА}$	110	83	51	29	16	10
$C, \text{ мкФ}$	0,03	0,05	0,1	0,3	0,6	1,2
$I_h, \text{ мА}$	6,6	10	20	60	110	165

Этот пример и выражения (4.17) – (4.20) показывают, что в сетях с изолированной нейтралью опасность для человека, прикоснувшегося к одному из фазных проводов в период нормальной работы сети, зависит от сопротивления проводов относительно земли: с увеличением сопротивления опасность уменьшается. Вместе с тем этот случай, как правило, менее опасен, чем прикосновение в сети с заземленной нейтралью [ср. уравнения (4.12) и (4.19)]. Этот вывод иллюстрируется кривыми 3 и 4 на рис. 4.8, построенными по данным примера 4.7.

При аварийном режиме работы сети (рис. 4.12), когда возникло замыкание фазы (например, фазы 3) на землю через малое активное сопротивление $r_{зм}$, проводимости двух других фаз можно принять равными нулю. Тогда, подставив в (4.16) $\underline{Y}_1 = \underline{Y}_2 = 0$, получим ток, протекающий через человека, А,

$$I_h = U_{\phi} \underline{Y}_h \frac{\underline{Y}_3 (1 - a)}{\underline{Y}_3 + \underline{Y}_h}.$$

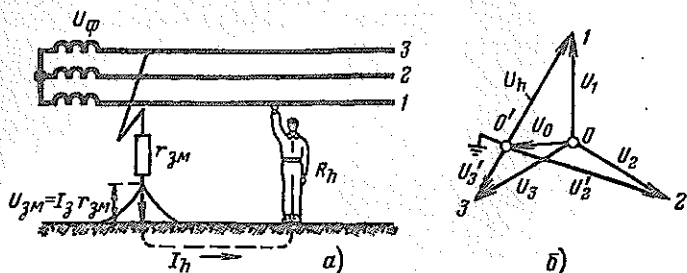


Рис. 4.12. Прикосновение человека к проводу трехфазной трехпроводной сети с изолированной нейтралью при аварийном режиме:

а — схема сети; б — векторная диаграмма напряжений (при условии, что $\underline{Y}_1 = \underline{Y}_2 = \underline{Y}_3 = 0$)

Произведя соответствующие преобразования и имея в виду, что $\underline{Y}_3 = 1/r_{3M}$ и $\underline{Y}_h = 1/R_h$, получим выражение для тока в действительной форме, А,

$$I_h = \frac{U_\phi \sqrt{3}}{R_h + r_{3M}}. \quad (4.21)$$

Напряжение прикосновения, В,

$$U_{пр} = I_h R_h = U_\phi \sqrt{3} \frac{R_h}{R_h + r_{3M}}. \quad (4.22)$$

Если принять, что $r_{3M} = 0$, или по крайней мере считать, что $r_{3M} \ll R_h$ (так обычно бывает на практике), то согласно (4.22) получим

$$U_{пр} = U_\phi \sqrt{3},$$

т. е. человек окажется под линейным напряжением сети.

В действительных условиях r_{3M} всегда больше 0, поэтому напряжение, под которым окажется человек, прикоснувшийся в аварийный период к исправной фазе трехфазной сети с изолированной нейтралью, будет значительно больше фазного и несколько меньше линейного напряжения сети.

Таким образом, это прикосновение во много раз опаснее прикосновения к той же фазе сети при нормальном режиме работы [ср. уравнения (4.19) и (4.21), имея в виду, что $r_{3M} \ll r/3$]. Вместе с тем такое прикосновение является также более опасным, чем прикосновение к исправной фазе трехфазной сети с заземленной нейтралью [ср. уравнения (4.14) и (4.21), имея в виду, что r_0 мало по сравнению с r_{3M}].

В подтверждение полученных выводов решим пример с данными, аналогичными данным примера 4.6.

Пример 4.8. Человек прикоснулся к проводу трехфазной трехпроводной сети 380 В с изолированной нейтралью в период, когда другой провод был замкнут на землю через сопротивления $r_{3M} = 100; 50; 4$ и $0,5$ Ом (рис. 4.12, а).

Дано: $r_1 = r_2 = r_3 = r = 10^4$ Ом; $C_1 = C_2 = C_3 = C = 0,1$ мкФ ($x_C = 32 \cdot 10^3$ Ом); $R_h = 1000$ Ом.

Определить ток, проходящий через человека при указанных значениях сопротивления замыкания провода на землю.

Решение. Поскольку полная проводимость, Ом, относительно земли исправного провода $\underline{Y} = 1/10^4 + j/(32 \cdot 10^3)$ значительно меньше полной проводимости замыкания провода на землю $\underline{Y}_{3M} = 1/r_{3M}$, т. е. $(1/10^4 + j/(32 \cdot 10^3)) \ll 1/r_{3M} = 1/100$, можно принять $\underline{Y}_1 = \underline{Y}_2 = 0$ и $\underline{Y}_3 = \underline{Y}_{3M} = 1/r_{3M}$.

Следовательно, мы вправе воспользоваться уравнением (4.21). Тогда при $r_{3M} = 100$ Ом

$$I_h = 220\sqrt{3}/(1000 + 100) = 0,345 \text{ А.}$$

При других значениях r_{3M} ток I_h будет:

r_{3M} , Ом	100	50	4	0,5
I_h , мА	345	362	370	380

На рис. 4.10 эти данные изображены кривой 2.

4.4. ВЫБОР СХЕМЫ СЕТИ И РЕЖИМА НЕЙТРАЛИ

Схема сети, а следовательно, и режим нейтрали источника тока, питающего эту сеть, выбираются по технологическим требованиям, а также по условиям безопасности.

При напряжении до 1000 В в нашей стране, как указывалось в § 4.1, распространение получили две схемы трехфазных сетей: трехпроводная с изолированной нейтралью и четырехпроводная с глухозаземленной нейтралью.

По технологическим требованиям предпочтение, как правило, отдается четырехпроводной сети, поскольку она позволяет использовать два рабочих напряжения — линейное и фазное. Например, от четырехпроводной сети 380 В можно питать как силовую нагрузку — трехфазную или однофазную, включая ее между фазными проводами на линейное напряжение 380 В, так и осветительную, включая ее между фазным и нулевым проводами, т. е. на фазное напряжение

220 В*. При этом достигается значительное удешевление электроустановки в целом благодаря применению меньшего числа трансформаторов, меньшего сечения проводов и т. п.

По условиям безопасности выбор одной из двух схем производится с учетом выводов, полученных при рассмотрении этих сетей в § 4.3, б и в, а именно: по условиям прикосновения к фазному проводу в период нормального режима работы сети более безопасна, как правило, сеть с изолированной нейтралью, а в аварийный период — сеть с глухозаземленной нейтралью.

Поэтому по условиям безопасности сети с изолированной нейтралью целесообразно применять на объектах с повышенной опасностью поражения током и в тех случаях, когда имеется возможность поддерживать высокий уровень изоляции проводов сети относительно земли и когда емкость проводов относительно земли незначительна. Такими являются сравнительно короткие сети, не подверженные воздействию агрессивной среды и находящиеся под постоянным надзором электротехнического персонала. ПУЭ рекомендуют использовать трехфазные трехпроводные сети с изолированной нейтралью при повышенных требованиях безопасности (для передвижных установок, торфяных разработок, шахт и т. п.).

Сети с глухозаземленной нейтралью (четырёхпроводные) следует применять там, где невозможно обеспечить хорошую изоляцию проводов (из-за высокой влажности, агрессивной среды, большой протяженности и т. п.), когда нельзя быстро отыскать или устранить повреждение изоляции или когда емкостные токи замыкания на землю достигают больших значений, опасных для человека. Примером таких сетей могут служить сети крупных промышленных предприятий, городские и сельские сети, сети собственного расхода электростанций и т. п.

* Согласно указаниям действующих «Правил устройства электроустановок» (ПУЭ) для питания светильников должно применяться напряжение не выше 220 В. Лишь для питания специальных ламп (ксеноновых, ДРЛ, ДРИ, натриевых, рассчитанных на напряжение 380 В) и пускорегулирующих аппаратов (ПРА) для газоразрядных ламп, имеющих специальные схемы (например, трехфазные) с последовательным соединением ламп, допускается напряжение до 380 В включительно, в том числе фазное напряжение системы 660/380 В с заземленной нейтралью с соблюдением ряда условий, предусмотренных ПУЭ (§ VI-1-7).

При напряжении выше 1000 В технологические требования к выбору режима нейтрали обусловлены рядом обстоятельств, в том числе влиянием режима нейтрали на характер и уровень внутренних перенапряжений.

В системе с изолированной нейтралью при дуговом замыкании на землю одной из фаз переход от нормального режима работы сети, при котором потенциал нейтрали $\phi_0 = 0$, к режиму с заземленной фазой, при котором $\phi_0 \approx U_{\phi}$, совершается в результате затухания колебаний с частотой, зависящей от индуктивностей и емкостей системы.

Прохождение дугового тока через нулевое значение может приводить к обрыву дуги с последующим ее зажиганием при повышенном напряжении. Этот процесс сопровождается возникновением на исправных фазах перенапряжения, которое может превысить фазное напряжение в 3—4 раза и вызвать пробой или перекрытие изоляции, т. е. замыкание фаз между собой или на землю. Опасность для изоляции этих перенапряжений усугубляется еще и тем, что они могут быть весьма длительными и охватывать не отдельный участок сети, как это имеет место при атмосферных перенапряжениях, а всю электрически связанную сеть. В результате в местах с ослабленной изоляцией могут возникать новые замыкания на землю, которые в свою очередь будут способствовать повышению уровня перенапряжения.

В сетях с нейтралью, заземленной через настроенные индуктивности, перенапряжения дуговых замыканий на землю не превышают $3U_{\phi}$ и, что особенно важно для изоляции, длятся обычно не более полупериода.

В сетях с нейтралью, заземленной через малое активное сопротивление, замыкание фазы на землю вызывает быстрое отключение поврежденного участка релейной защитой и не сопровождается возникновением перенапряжений.

Таким образом, заземление нейтрали источника тока — эффективная мера, предупреждающая возникновение опасных для изоляции внутренних перенапряжений при дуговых замыканиях на землю.

В соответствии с этим и с учетом других обстоятельств ПУЭ предписывают для трехфазных сетей напряжением 110 кВ и выше так называемое *эффективное заземление нейтрали*, т. е. заземление через малое сопротивление*, при котором в случае замыкания одной или двух фаз на землю напряжения неповрежденных фаз относительно земли в месте замыкания не превышают $1,4U_{\phi}$. Для сетей напряжением выше 1000 В до 35 кВ включительно Правилами установлен режим работы с изолированной нейтралью, т. е. с нейтралью, не присоединенной к заземляющему устройству или присоединенной к нему через приборы сигнализации, измерения, защиты, заземляющие дуго-

* Путем присоединения к заземлителю непосредственно (наглухо) или через реакторы с небольшим индуктивным сопротивлением

гающие реакторы и подобные им устройства, обладающие большим сопротивлением.

По условиям безопасности в сетях напряжением выше 1000 В заземленная нейтраль также предпочтительна несмотря на то что в таких сетях вследствие большой емкости проводов относительно земли защитная роль их изоляции полностью утрачивается и для человека одинаково опасно прикосновение к проводу сети как с изолированной, так и с заземленной нейтралью.

Дело в том, что в сетях выше 1000 В с изолированной нейтралью при дуговых замыканиях фазы на землю вокруг места замыкания могут возникать и длительно существовать высокие потенциалы и разности потенциалов, т. е. большие напряжения прикосновения и шага, опасные для людей. В случае же заземленной нейтрали произойдет быстрое отключение поврежденного участка релейной защитой и тем самым будет устранена возникшая опасность.

В целях уменьшения опасности, возникшей при замыкании фазы на землю, действующие ПУЭ требуют предусматривать в сетях выше 1000 В с изолированной нейтралью возможность быстрого отыскания замыканий на землю. Кроме того, в тех случаях, когда на объектах, питаемых электроэнергией по линиям выше 1000 В с изолированной нейтралью, вероятность замыканий на землю по тем или иным причинам велика (торфяные разработки, передвижные подстанции и механизмы и т. п.), эти линии снабжаются защитой от замыканий на землю с действием на отключение (по всей электрически связанной сети).

Глава 5

ЗАЩИТНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ

5.1. НАЗНАЧЕНИЕ, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Защитное заземление — преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением вследствие замыкания на корпус* и по другим причинам (индуктивное влияние соседних токоведущих частей, вынос потенциала, разряд молнии и т. п.).

* Определение термина «замыкание на корпус» см. в сноске на с. 114.

Эквивалентом земли может быть вода реки или моря, каменный уголь в коренном залегании и т. п.

Назначение защитного заземления — устранение опасности поражения током в случае прикосновения к корпусу электроустановки и другим нетоковедущим металлическим частям, оказавшимся под напряжением вследствие замыкания на корпус и по другим причинам.

Защитное заземление следует отличать от рабочего заземления и заземления молниезащиты.

Рабочее заземление — преднамеренное соединение с землей отдельных точек электрической цепи, например нейтральных точек обмоток генераторов, силовых и измерительных трансформаторов, дугогасящих аппаратов, реакторов поперечной компенсации в дальних линиях электропередачи, а также фазы при использовании земли в качестве фазного или обратного провода. Рабочее заземление предназначено для обеспечения надлежащей работы электроустановки в нормальных или аварийных условиях и осуществляется непосредственно (т. е. путем соединения проводником заземляемых частей с заземлителем) или через специальные аппараты — пробивные предохранители, разрядники, резисторы и т. п.

Заземление молниезащиты — преднамеренное соединение с землей молниеприемников и разрядников в целях отвода от них токов молнии в землю.

Принцип действия защитного заземления — снижение до безопасных значений напряжений прикосновения и шага, обусловленных замыканием на корпус и другими причинами. Это достигается путем уменьшения потенциала заземленного оборудования (уменьшением сопротивления заземлителя), а также путем выравнивания потенциалов основания, на котором стоит человек, и заземленного оборудования (подъемом потенциала основания, на котором стоит человек, до значения, близкого к значению потенциала заземленного оборудования).

Область применения защитного заземления:

сети напряжением до 1000 В переменного тока — трехфазные трехпроводные с изолированной нейтралью, однофазные двухпроводные, изолированные от земли, а также постоянного тока двухпроводные с изолированной средней точкой обмоток источника тока;

сети напряжением выше 1000 В переменного и постоянного тока с любым режимом нейтральной или средней точки обмоток источников тока (рис. 5.1).

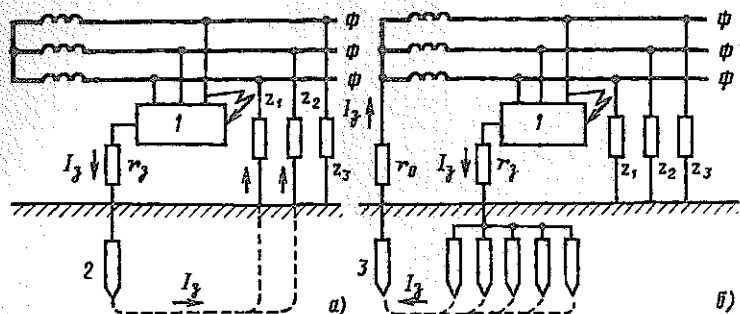


Рис. 5.1. Принципиальные схемы защитного заземления в сетях трехфазного тока:

а — в сети с изолированной нейтралью до 1000 В и выше; б — в сети с заземленной нейтралью выше 1000 В; 1 — заземленное оборудование; 2 — заземлитель защитного заземления; 3 — заземлитель рабочего заземления; r_0 , r_z — сопротивления рабочего и защитного заземлений

Защитное заземление является наиболее простой и в то же время весьма эффективной мерой защиты от поражения током при появлении напряжения на металлических нетоковедущих частях.

5.2. ТИПЫ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Заземляющим устройством называется совокупность заземлителя — проводников (электродов), соединенных между собой и находящихся в непосредственном соприкосновении с землей, и заземляющих проводников, соединяющих заземляемые части электроустановки с заземлителем.

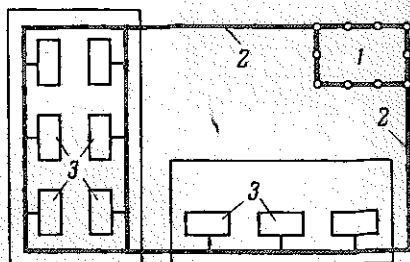
В зависимости от места размещения заземлителя относительно заземляемого оборудования различают два типа заземляющих устройств: выносное и контурное*.

Выносное заземляющее устройство (рис. 5.2) характеризуется тем, что заземлитель его вынесен за пределы площадки, на которой размещено заземляемое оборудование, или сосредоточен на некоторой части этой площадки. Поэтому выносное заземляющее устройство называют также сосредоточенным.

* Соответственно и заземлители бывают двух типов: выносные и контурные.

Рис. 5.2. Выносное заземляющее устройство:

1 — заземлитель; 2 — заземляющие проводники (магистраль); 3 — заземляемое оборудование



Существенный недостаток выносного заземляющего устройства — отдаленность заземлителя от защищаемого оборудования, вследствие чего на всей или на части защищаемой территории коэффициент прикосновения $\alpha_1 = 1$. Поэтому заземляющие устройства этого типа применяются лишь при малых токах замыкания на землю, в частности в установках до 1000 В, где потенциал заземлителя не превышает значения допустимого напряжения прикосновения $U_{\text{пр. доп.}}$ В (с учетом коэффициента напряжения прикосновения, учитывающего падение напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек α_2):

$$\varphi_3 = I_3 r_3 \leq U_{\text{пр. доп.}} / \alpha_2.$$

Кроме того, при большом расстоянии до заземлителя может значительно возрасти сопротивление заземляющего устройства в целом за счет сопротивления соединительного, т. е. заземляющего, проводника.

Достоинством выносного заземляющего устройства является возможность выбора места размещения электродов заземлителя с наименьшим сопротивлением грунта (сырое, глинистое, в низинах и т. п.).

Необходимость в устройстве выносного заземления может возникнуть в следующих случаях: при невозможности по каким-либо причинам разместить заземлитель на защищаемой территории; при высоком сопротивлении земли на данной территории (например, песчаный или скалистый грунт) и наличии вне этой территории мест со значительно лучшей проводимостью земли; при рассредоточенном расположении заземляемого оборудования (например, в горных выработках) и т. п.

Контурное заземляющее устройство характеризуется тем, что электроды его заземлителя размещаются по контуру (периметру) площадки, на которой находится заземляемое оборудова-

ние, а также внутри этой площадки. Часто электроды распределяются на площадке по возможности равномерно, и поэтому контурное заземляющее устройство называется также *распределенным*.

Безопасность при распределенном заземляющем устройстве может быть обеспечена не только уменьшением потенциала заземлителя, а и выравниванием потенциала на защищаемой территории до такого значения, чтобы максимальные напряжения

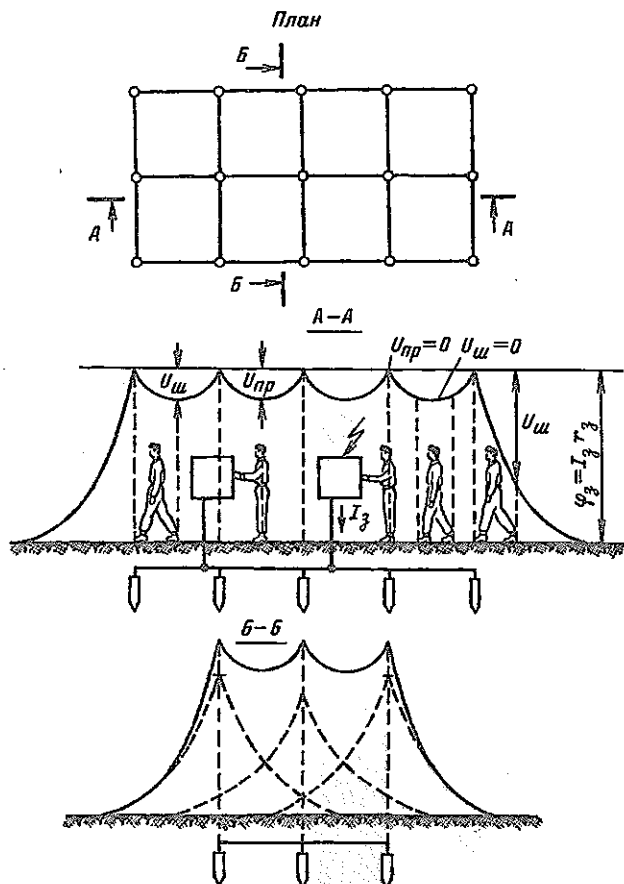
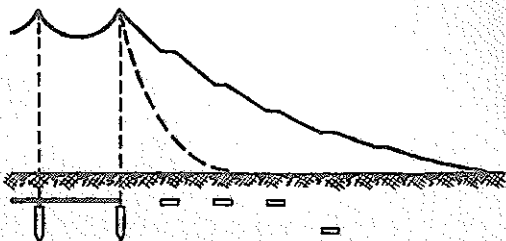


Рис. 5.3. Контурное заземляющее устройство:

$U_{пр}$, $U_{ш}$ — напряжения прикосновения и шага; φ_z — потенциал заземлителя; I_z — ток, стекающий в землю через заземлитель; r_z — сопротивление заземлителя растеканию тока

Рис. 5.4. Пример размещения дополнительных стальных полос в земле у края контура заземлителя за его пределами для снижения напряжения шага



прикосновения и шага не превышали допустимых. Это достигается путем соответствующего размещения одиночных заземлителей на защищаемой территории.

В качестве примера на рис. 5.3 показано распределение потенциала в момент замыкания фазы на заземленный корпус на открытой подстанции, имеющей контурное заземление.

Как видно из рисунка, изменение потенциала в пределах площадки, на которой размещены электроды заземлителя, происходит плавно; при этом напряжение прикосновения $U_{пр}$ и напряжение шага $U_{ш}$ имеют небольшие значения по сравнению с потенциалом заземлителя ϕ_3 . Однако за пределами контура по его краям наблюдается крутой спад ϕ . Чтобы исключить в этих местах опасные напряжения шага, которые особенно высоки при больших токах замыкания на землю, по краям контура за его пределами, в первую очередь в местах проходов и проездов, укладывают в землю на различной глубине дополнительные стальные полосы, соединенные с заземлителем. Благодаря этому спад потенциала в этих местах происходит по пологой кривой (рис. 5.4).

Внутри помещений выравнивание потенциала происходит естественным путем благодаря металлическим конструкциям, трубопроводам, кабелям и подобным им проводящим предметам, связанным с разветвленной сетью заземления. Арматура железобетонных зданий также оказывает благоприятное влияние на выравнивание потенциала.

5.3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

а) Заземлители

Различают заземлители искусственные, предназначенные исключительно для целей заземления, и естественные — находящиеся в земле металлические предметы иного назначения.

Для искусственных заземлителей применяют обычно вертикальные и горизонтальные электроды.

В качестве вертикальных электродов используют стальные трубы диаметром 5–6 см с толщиной стенки не менее 3,5 мм и угловую сталь с толщиной полок не менее 4 мм (обычно это угловая сталь размером от 40 × 40 до 60 × 60 мм отрезками длиной 2,5–3,0 м. Широкое применение находят также прутковая сталь диаметром не менее 10 мм, длиной до 10 м, а иногда и более.

Для связи вертикальных электродов и в качестве самостоятельного горизонтального электрода применяют полосовую сталь сечением не менее 4 × 12 мм и сталь круглого сечения диаметром не менее 6 мм.

Размещение электродов выполняют в соответствии с проектом. Заземлители не следует размещать вблизи горячих трубопроводов и других объектов, вызывающих высыхание почвы, а также в местах, где возможна пропитка грунта нефтью, маслами и т. п., поскольку в таких местах сопротивление грунта резко возрастает.

В случае опасности усиленной коррозии заземлителей необходимо применять электроды увеличенного сечения либо оцинкованные или омедненные. В некоторых (довольно редких) случаях целесообразно выполнить электрическую защиту заземлителей от коррозии.

Для установки вертикальных заземлителей предварительно роют траншею глубиной 0,7–0,8 м, после чего трубы или уголки забивают механизмами – копрами, гидропрессами и т. п. (рис. 5.5). Стальные стержни диаметром 10–12 мм, длиной 4–4,5 м ввертывают в землю с помощью специальных приспособлений, а более длинные заглубляют вибраторами (рис. 5.6).

Верхние концы погруженных в землю вертикальных электродов соединяют стальной полосой на сварке. При этом полосу устанавливают на ребро, так как в таком положении ее удобнее приварить к вертикальным электродам и она имеет лучший контакт с землей.

В таких же траншеях прокладывают и горизонтальные электроды. В этом случае электроды из полосовой стали также рекомендуется ставить на ребро.

Траншеи засыпают землей, очищенной от щебня и строительного мусора, с последующей тщательной трамбовкой, что снижает сопротивление растеканию заземлителя, а следовательно, дает экономию металла.

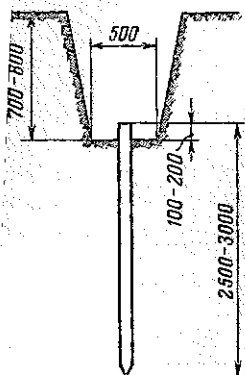


Рис. 5.5. Установка стержневого электрода в траншею

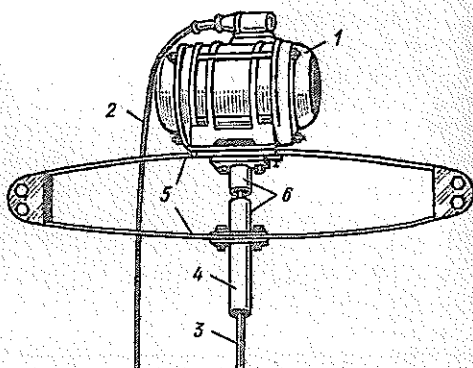


Рис. 5.6. Вибрационный электродозаглубитель системы Б. С. Гаврилова:

1 — электровибратор; 2 — электропровод; 3 — заглубляемый электрод; 4 — держатель электрода; 5 — рессоры стальные, вибрирующие при работе вибратора; 6 — верхний и нижний молотки, соударяющиеся при вибрации рессор и тем самым заглубляющие электрод

Искусственные заземлители могут быть выполнены также из электропроводящего бетона.

В качестве естественных заземлителей могут использоваться проложенные в земле водопроводные и другие металлические трубы (за исключением трубопроводов горючих жидкостей, горючих или взрывоопасных газов), обсадные трубы артезианских колодцев, скважин, шурфов и т. п.; металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений, имеющие соединения с землей; свинцовые оболочки кабелей, проложенных в земле*; металлические шпунты гидротехнических сооружений и т. п.

В качестве естественных заземлителей подстанций и распределительных устройств (РУ) рекомендуется использовать заземлители опор отходящих воздушных линий электропередачи, соединенные с помощью грозозащитных тросов линий с заземляющим устройством подстанции или РУ.

В последние годы в качестве естественных заземлителей начали использовать железобетонные фундаментные элементы опор воздушных линий электропередачи. Благодаря капилляр-

* Алюминиевые оболочки кабелей и алюминиевые проводники не допускается использовать в качестве естественных заземлителей.

ному подсосу влаги защитный слой бетона указанных конструкций обретает проводимость, близкую к проводимости окружающих слоев земли, что обеспечивает стабильные значения сопротивления растеканию металлической арматуры, играющей роль электродов заземлителя опоры.

Естественные заземлители обладают, как правило, малым сопротивлением растеканию тока, и поэтому использование их для заземления дает весьма ощутимую экономию металла. Естественные заземлители можно использовать без искусственных, если они обеспечивают требуемое ПУЭ сопротивление растеканию тока.

Недостатками естественных заземлителей являются доступность некоторых из них неэлектротехническому персоналу и возможность нарушения непрерывности соединения протяженных заземлителей (при ремонтных работах и т. п.).

Устройство заземлителей в плохо проводящих грунтах встречает серьезные трудности по условиям обеспечения определенного сопротивления растеканию R_z . Поэтому ПУЭ допускают для таких установок повышенное значение сопротивления заземляющих устройств $R_{z,y}$ вплоть до десятикратного установленного сопротивления*. Тем не менее часто приходится прибегать к специальным мерам для снижения R_z , в частности применять глубинные заземлители, производить укладку вокруг электродов грунта с повышенной проводимостью или специальную обработку почвы, делать заземления выносными и т. п.

Глубинные заземлители — стальные стержни длиной 10–12 м и более — позволяют иногда достигнуть слоев земли с хорошей проводимостью; эти заземлители применяют, в частности, в песчаных грунтах, а также в районах вечной мерзлоты. В последнем случае глубинные заземлители дополняют протяженными, прокладываемыми на глубине около 0,5 м и предназначенными для работы в летнее время, когда верхний слой земли оттаивает и, следовательно, имеет хорошую проводимость.

Укладка вокруг электродов грунта с повышенной проводимостью дает хорошие результаты в скальных структурах, где прокладывают, как правило, лишь горизонтальные электроды. В этом случае вокруг электродов

* Для районов с удельным сопротивлением земли более 500 Ом·м.

укладывают влажную глину с последующей трамбовкой и засыпкой щебнем поверх траншеи. В подобных условиях и для укладки вокруг вертикальных заземлителей весьма успешно может применяться бентонит*, обладающий малым удельным сопротивлением (не более 10 Ом·м), хорошо удерживающий влагу и не вызывающий коррозии заземлителей. Его применяют в виде вязкой тестообразной массы (одна часть бентонита на 10–12 частей воды).

Обработка почвы, как и укладка грунта с повышенной проводимостью, производится обычно вокруг электродов, поскольку, как известно, основное сопротивление току оказывают ближайшие к электроду слои грунта.

Материалом для обработки может служить, в частности, поваренная соль, предварительно растворенная в воде. Соль значительно снижает сопротивление грунта. Так, при добавлении 0,1% соли к массе влаги, содержащейся в суглинке, удельное сопротивление его снижается на 60–80%. Однако соль вызывает интенсивную коррозию заземлителей и может вымываться из грунта атмосферными осадками.

Устройство выносных заземлителей является часто наиболее эффективным и экономически приемлемым решением. В этом случае заземлители размещают на участках с хорошо проводящим грунтом, укладывают (забивают) на дно непромерзающих рек, озер или морей, размещают в артезианских скважинах и т. п.

Однако выносные заземлители целесообразно сооружать при наличии мест с меньшим удельным сопротивлением земли не далее 2 км от участка, на котором размещено заземляемое оборудование.

В районах вечной мерзлоты применяют также рудные, таликовые и другие выносные заземлители.

Заземлитель рудного типа — это электроды, размещенные в зоне залегания рудной жилы (не имеющей промы-

* Бентонит — коллоидная глина, состоящая в основном из минералов группы монтмориллонита (глинистый минерал, слоистый водный алюмосиликат). Используется в нефтяной промышленности для приготовления буровых растворов, как отбеливающая глина, как связующий материал в литейных формовочных смесях и керамических массах. Свое название бентонит получил по месторождению в районе г. Бентона (США), а монтмориллонит — по месторождению в районе г. Монтморийона (Франция). В нашей стране бентонит добывается в Туркменской ССР (пос. Огланлы) и Грузинской ССР (Асканское месторождение).

шленного значения). При этом жила играет роль естественного заземлителя и может обеспечить малое значение R_3 .

При таликовом заземлителе электроды размещают на участке, где грунт на всей площади и глубине в несколько метров смочен и подсолон до такой степени, что круглый год находится в талом состоянии. Благодаря этому обеспечивается хороший контакт электродов с талым грунтом, а сам талый грунт, имея хорошую проводимость и большую поверхность соприкосновения с мерзлым грунтом, играет роль большого единичного электрода и обеспечивает малое значение R_3 .

Искусственные талые зоны можно создавать также путем укрытия на зиму толстым слоем торфа оттаявшего за лето участка земли, на котором расположены электроды заземлителя, и раскрытия этого участка на летнее время.

б) Заземляющие проводники

В качестве заземляющих проводников, предназначенных для соединения заземляемых частей с заземлителями, применяют, как правило, полосовую сталь и сталь круглого сечения.

Сечение заземляющих проводников в электроустановках напряжением выше 1000 В с эффективно заземленной нейтралью* определяется их термической стойкостью при прохождении по ним наибольших токов однофазного замыкания на землю. При этом кратковременный нагрев проводников, соответствующий времени действия основной релейной защиты и полному времени отключения выключателя, не должен превышать 400°C.

В сетях напряжением до и выше 1000 В с изолированной нейтралью заземляющие проводники должны обладать проводимостью не менее 1/3 проводимости фазных проводников, а сечение их не должно быть меньше установленного ПУЭ. Например, наименьшее сечение стальной прямоугольной шины составляет 24 мм² при прокладке ее внутри здания и 48 мм² при прокладке вне здания или в земле; для круглой стали наименьший диаметр равен 5 мм при прокладке в зданиях, 6 мм — в наружных установках, 10 мм — в земле.

В производственных помещениях с электроустановками напряжением до и выше 1000 В магистрали заземления (зазе-

* Определение термина «эффективно заземленная нейтраль» приведено в § 4.4 (с. 181).

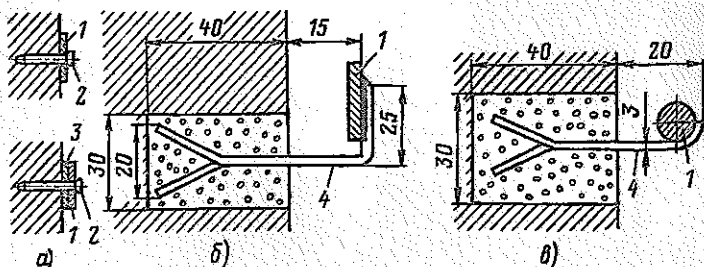


Рис. 5.7. Примеры крепления стальных заземляющих проводников на стене:

а — непосредственно по стене (в помещениях без агрессивной среды); б, в — на расстоянии от стен (во влажных, сырых и особо сырых помещениях, а также в помещениях с агрессивной средой); 1 — заземляющий проводник; 2 — дюбель; 3 — подкладка; 4 — скоба

мляющий проводник с двумя или более ответвлениями) из стальной полосы должны иметь сечение не менее 100 мм^2 . Допускается применение стали круглого сечения той же проводимости. Во всех случаях применения медных проводников сечение их должно быть не более 25 мм^2 , алюминиевых — не более 35 мм^2 и стальных — не более 120 мм^2 .

Рекомендуется в целях экономии металла использовать в качестве заземляющих проводников так называемые естественные проводники — металлические конструкции зданий и сооружений: фермы, колонны, подкрановые пути, каркасы распределительных устройств, шахты подъемников, лифтов и элеваторов, а также обрамления каналов, стальные трубы электропроводок, алюминиевые оболочки кабелей, металлические кожухи и опорные конструкции шинопроводов, металлические стационарные открыто проложенные трубопроводы всех назначений (кроме трубопроводов горючих и взрывоопасных веществ и смесей, канализации и центрального отопления).

Прокладка заземляющих проводников производится открыто по конструкциям зданий, в том числе по стенам. При этом в помещениях сухих без агрессивной среды заземляющие проводники допускается прокладывать непосредственно по стенам. Во влажных, сырых и особо сырых помещениях, а также в помещениях с агрессивной средой заземляющие проводники следует прокладывать на расстоянии не менее 10 мм от стен (рис. 5.7).

В наружных установках и помещениях магистрали заземления и ответвления от них должны быть доступны для осмотра.

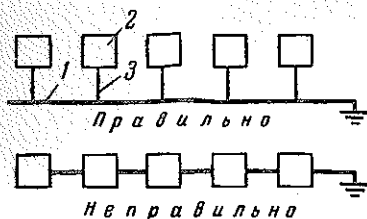


Рис. 5.8. Схема присоединения заземляемых объектов к заземляющей магистрали:

1 — заземляющая магистраль; 2 — заземляемое оборудование; 3 — проводник — ответвление от заземляющей магистрали

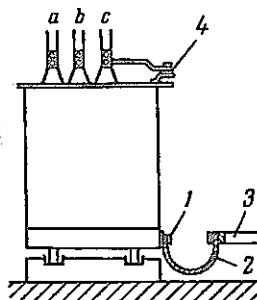


Рис. 5.9. Заземление бака силового трансформатора:

1 — заземляющий болт; 2 — гибкая перемычка; 3 — ответвление от заземляющей магистрали; 4 — пробивной предохранитель

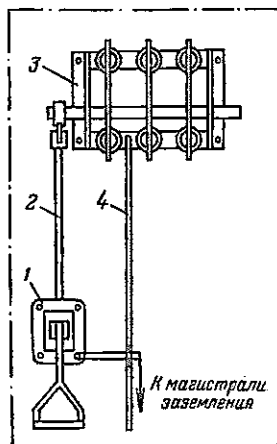


Рис. 5.10. Заземление рамы и привода трехполюсного разъединителя:

1 — плита привода; 2 — тяга; 3 — рама; 4 — заземляющая шина

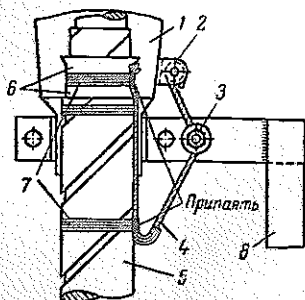


Рис. 5.11. Заземление оболочки и брони кабеля в концевой заделке:

1 — воронка стальная; 2 — пластинка, с помощью которой производится заземление воронки; 3 — болт заземления; 4 — медный неизолированный гибкий провод; 5 — броня кабеля; 6 — свинцовая оболочка; 7 — бандаж; 8 — заземляющая шина

Это требование не распространяется на оболочки кабелей, арматуру железобетонных конструкций, а также на заземляющие проводники, проложенные в трубах, коробах и непосредственно в теле строительных конструкций (замоноличенные).

Ответвления от магистралей к электроприемникам напряжением до 1000 В допускается прокладывать скрыто непосредственно в стене, под чистым полом и т. п. с предварительной защитой их от воздействия агрессивных сред. Такие ответвления не должны иметь соединений.

В наружных установках заземляющие проводники допускается прокладывать в земле, в полу, а также по краю площадок фундаментов технологических установок и т. п.

Присоединение заземляемого оборудования к магистрали заземления осуществляется с помощью отдельных проводников. При этом последовательное включение заземляемого оборудования не допускается (рис. 5.8).

Заземление отдельных электродвигателей, аппаратов и другого оборудования, установленных непосредственно на металлических станках и имеющих с металлом станков надежный контакт, может осуществляться путем присоединения станины станков к заземляющей магистрали.

Соединения заземляющих проводников между собой, а также с заземлителями и заземляемыми конструкциями выполняются, как правило, сваркой, а с корпусами аппаратов, машин и другого оборудования — сваркой или с помощью болтов (рис. 5.9—5.11). При этом присоединение заземляющей магистрали к заземлителю — искусственному или естественному — выполняется в двух местах.

в) Оборудование, подлежащее защитному заземлению

Защитному заземлению подлежат металлические нетокопроводящие части электрооборудования, которые вследствие неисправности изоляции и других причин могут оказаться под напряжением и к которым возможно прикосновение людей и животных. В помещениях с повышенной опасностью и особо опасных, а также в наружных установках заземление обязательно при номинальном напряжении электроустановки выше 42 В переменного и 110 В постоянного тока, а в помещениях без повышенной опасности — при напряжении 380 В и выше пере-

менного и 440 В и выше постоянного тока*. Лишь во взрывоопасных зонах всех классов** заземление выполняется независимо от значения напряжения электроустановки.

В частности, защитному заземлению подлежат:

1) металлические корпуса электрических машин, трансформаторов, аппаратов, светильников, передвижных и переносных электроприемников, пусковых и регулировочных реостатов и т. п.;

2) приводы электрических аппаратов — разъединителей, отделителей, выключателей и т. п.;

3) каркасы распределительных щитов, щитов управления, щитков и шкафов, а также их съемные или открывающиеся части, если на них установлено электрооборудование напряжением выше 42 В переменного тока или выше 110 В постоянного тока;

4) металлические конструкции распределительных устройств, кабельные конструкции, кабельные соединительные муфты, оболочки и броня контрольных и силовых кабелей, оболочки проводов, рукава и трубы электропроводок, кожухи и опорные конструкции шинопроводов, лотки, короба, струны, тросы и стальные полосы, на которых укреплены кабели и провода (кроме струн, тросов и полос, по которым проложены кабели с заземленной или зануленной металлической оболочкой или броней), а также другие металлические конструкции, на которых устанавливается электрооборудование;

5) металлические оболочки и броня контрольных и силовых кабелей и проводов напряжением до 42 В переменного и до 110 кВ постоянного тока, проложенных на общих металлических конструкциях, в том числе в общих трубах, коробах, лотках и т. п. с кабелями и проводами, металлические оболочки и броня которых подлежат заземлению;

6) электрооборудование, размещенное на движущихся частях станков, машин и механизмов;

7) железобетонные и металлические опоры воздушных линий (ВЛ) электропередачи напряжением 3—35 кВ и опоры, на которых установлены силовые или измерительные трансформаторы, разъединители, предохранители или другие аппараты; крюки и штыри фазных проводов, устанавливаемых на железобетонных опорах ВЛ напряжением до 1000 В, а также арматура этих опор.

В целях уравнивания потенциалов в тех помещениях и наружных установках, в которых применяют заземление, строительные и производственные конструкции, стационарно проложенные трубопроводы всех назначений, металлические корпуса технологического оборудования, подкрановые и железнодорожные рельсовые пути и т. п. должны

* Классификация помещений по степени опасности поражения электрическим током приведена в § 12.1.е (с. 401).

** Взрывоопасной зоной называется помещение или ограниченное пространство в помещении или наружной установке, в котором имеются или могут образовываться взрывоопасные смеси. Существует шесть классов взрывоопасных зон: В-I, В-Ia, В-Iб, В-Iг, В-II, В-IIa.

быть присоединены к сети заземления. При этом достаточно естественных контактов в сочленениях.

Защитному заземлению не подлежат:

1) корпуса электрооборудования, аппаратов и электромонтажных конструкций, установленных на заземленных металлических конструкциях, распределительных устройствах, на щитах, шкафах, щитках, станинах станков, машин и механизмов, при условии обеспечения надежного электрического контакта с заземленными основаниями *;

2) конструкции, указанные в п. 4 (в перечне частей, подлежащих заземлению), при условии надежного электрического контакта между этими конструкциями и установленным на них заземленным электрооборудованием.

При этом указанные конструкции не могут быть использованы для заземления размещенного на них другого электрооборудования;

3) арматура изоляторов всех типов, оттяжек, кронштейнов и осветительной арматуры при установке их на деревянных опорах воздушных линий электропередачи или на деревянных конструкциях открытых подстанций, если это не требуется по условиям защиты от атмосферных перенапряжений.

При прокладке кабеля с металлической заземленной оболочкой или неизолированного заземляющего проводника на деревянной опоре перечисленные части, расположенные на этой опоре, заземляются;

4) съемные или открывающиеся части металлических каркасов камер распределительных устройств, шкафов, ограждений и т. п., если на этих частях не установлено электрооборудование или если напряжение установленного электрооборудования не превышает 42 В переменного или 110 В постоянного тока;

5) корпуса электроприемников с двойной изоляцией;

6) металлические скобы, крепежи, отрезки труб механической защиты кабелей в местах их прохода через стены и перекрытия и другие подобные детали, в том числе протяжные и ответвительные коробки размером до 100 см², и электропроводок, выполняемых кабелями или изолированными проводами, прокладываемыми по стенам, перекрытиям и другим элементам строений.

г) Связь между заземляющими устройствами нескольких аналогичных установок и установок разных напряжений и назначений

Защитные заземляющие устройства аналогичных электроустановок, получающих энергию от одной и той же сети с изолированной нейтралью, целесообразно соединять электрически или выполнять их как

* Во взрывоопасных зонах любого класса необходимо заземлять электрооборудование, установленное на заземленных металлических конструкциях, за исключением оборудования, размещенного внутри заземленных корпусов шкафов и пультов.

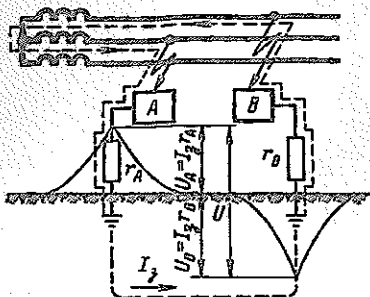


Рис. 5.12. Двойное замыкание на землю при раздельном заземлении установок, питающихся от одной сети с изолированной нейтралью

одно целое устройство. Дело в том, что при замыкании на корпус разных фаз в двух установках, имеющих раздельные заземляющие устройства (рис. 5.12), возникает двойное замыкание на землю и заземленное оборудование оказывается под напряжением относительно земли, В:

в установке А

$$U_A = I_3 R_A = \frac{U}{R_A + R_B} R_A;$$

в установке В

$$U_B = I_3 R_B = \frac{U}{R_A + R_B} R_B,$$

где U — линейное напряжение сети, В; R_A , R_B — сопротивления заземляющих устройств установок А и В соответственно, Ом.

При этом $U_A + U_B = U$, а при равенстве R_A и R_B напряжения, возникшие на заземленном оборудовании обеих установок, оказываются одинаковыми:

$$U_A = U_B = 0,5U.$$

Такое напряжение на заземленных элементах установок опасно в отношении поражения током, тем более что двойное замыкание в этом случае может существовать длительно.

Если же заземляющие устройства установок А и В соединить с помощью металлических шин или заземлителя их выполнить как одно целое, то двойное замыкание на землю превратится в КЗ между фазами, что вызовет быстрое отключение электроустановок от сети максимальной токовой защитой, т. е. обеспечит кратковременность аварийного режима. Вместе с тем в течение аварийного периода резко уменьшится напряжение на оборудовании, так как при этом значительно увеличится падение напряжения в сопротивлениях обмоток трансформатора и фазных проводов вследствие прохождения через них большого тока КЗ.

При невозможности соединить заземляющие устройства (из-за больших расстояний и по другим причинам) необходимо оснастить эти установки релейной защитой от однофазных или двойных замыканий на землю.

Защитные заземляющие устройства установок разных напряжений, например до 1000 В и выше, вследствие разных значений токов замыкания на землю, проходящих через них, оказываются в аварийный период под разными потенциалами: на заземленных частях установок напряжением до 1000 В возникающий потенциал не превышает не-

скольких десятков вольт, а на заземленных частях установок напряжением выше 1000 В он может достигать нескольких киловольт. Это обстоятельство делает целесообразным сооружение отдельных заземляющих устройств для установок разных напряжений.

Однако наличие в одном цехе или на одной площадке оборудования разного номинального напряжения вынуждает размещать заземляющие проводники разных заземляющих устройств по соседству либо на одних и тех же или связанных конструкциях. Вследствие этого в обычных условиях практически невозможно избежать непреднамеренных соединений между этими проводниками. В редких случаях, когда необходимая изоляция достигнута, возникает угроза поражения человека из-за возможности одновременного прикосновения в аварийный период к двум предметам, связанным с разными заземляющими устройствами и обладающими поэтому разными потенциалами. По указанным причинам заземляющие устройства установок разных напряжений, размещаемых на одной территории, выполняют совместно, как одно целое.

Заземлители рабочего и защитного заземлений следует соединять с помощью шин или выполнять как одно целое.

Исключение составляют заземлители рабочего заземления в установках напряжением выше 1000 В при использовании земли в качестве фазного или обратного провода. В этом случае заземлители для прохождения через них рабочего тока надо располагать отдельно от заземлителей иных назначений на участках, недоступных для людей и животных.

Это требование продиктовано тем, что данный рабочий заземлитель постоянно имеет значительный потенциал, равный примерно половине фазного напряжения электроустановки.

Заземление молниеотводов обычно выполняют совместно с защитным и рабочим заземлением электрооборудования. Исключение составляют отдельно стоящие или изолированные от здания молниеотводы*, заземлители которых должны быть обособлены от заземлителей других назначений, а элементы их размещены на определенном расстоянии от защищаемого объекта. Эти требования обусловлены необходимостью исключить занос в защищаемый объект потенциалов, которые вследствие больших токов молнии достигают высоких значений (десятков и сотен тысяч вольт) и могут явиться причиной взрывов и пожаров.

Электрические станции, подстанции и промышленные предприятия, не относящиеся по условиям молниезащиты к первой категории, защищают от прямых ударов молнии молниеотводами, размещаемыми

* Такими молниеотводами защищают здания и сооружения первой категории, т. е. те, в которых находятся взрывчатые вещества, длительно сохраняются или систематически образуются смеси газов, паров или пыли с воздухом, способные взорваться от электрической искры с разрушительными последствиями или с человеческими жертвами.

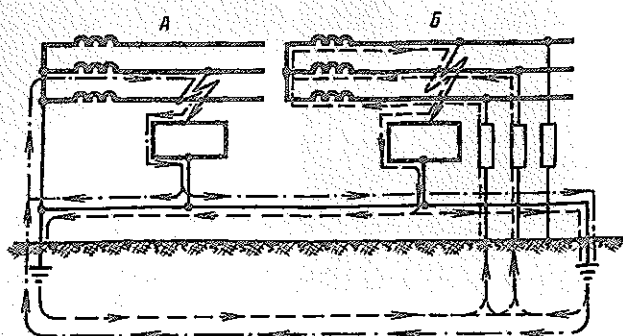


Рис. 5.13. Совместное использование заземляющих устройств для двух сетей:

А — до 1000 В с системой зануления; Б — до 1000 В или выше с системой защитного заземления

ми обычно на защищаемых сооружениях, а иногда и отдельно стоящими молниеотводами. Во всех указанных случаях молниеотводы присоединяют к общему заземлителю, сопротивление которого, как правило, удовлетворяет и требованиям молниезащиты. Тем не менее в месте установки молниеотводов устраивают местный заземлитель из двух-трех электродов, соединенных стальной полосой.

Сети защитного заземления и зануления, т. е. заземляющие и нулевые защитные проводники, а также заземлители, являющиеся принадлежностью двух электрических сетей, питающихся от отдельных трансформаторов (один с изолированной, другой с глухозаземленной нейтралью), могут быть общими при любых напряжениях установок. При этом системы заземления и зануления работают независимо друг от друга, хотя аварийные токи их протекают по одним и тем же защитным проводникам и общему заземлителю (рис. 5.13).

5.4. РАСЧЕТ ЗАЩИТНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ

Расчет защитного заземления имеет целью определить основные параметры заземления — число, размеры и порядок размещения одиночных заземлителей и заземляющих проводников, при которых напряжения прикосновения и шага в период замыкания фазы на заземленный корпус не превышают допустимых значений. При этом расчет производится обычно для случаев размещения заземлителя в однородной земле. В последние годы разработаны и начали применяться инженерные способы расчета заземлителей в многослойном грунте.

При расчете заземлителей в однородной земле учитывается, однако, иное сопротивление верхнего

слоя земли (слоя сезонных изменений), обусловленное промерзанием или высыханием грунта. Расчет производят способом, основанным на применении коэффициентов использования проводимости заземлителя и называемым поэтому *способом коэффициентов использования*. Его выполняют как при простых, так и при сложных конструкциях групповых заземлителей.

При расчете заземлителей в многослойной земле обычно принимают двухслойную модель земли с удельными сопротивлениями верхнего и нижнего слоев ρ_1 и ρ_2 соответственно и толщиной (мощностью) верхнего слоя h_1 (см. рис. 3.31). Расчет производится способом, основанным на учете потенциалов, наведенных на электроды, входящие в состав группового заземлителя, и называемым поэтому *способом наведенных потенциалов*. Расчет заземлителей в многослойной земле более трудоемок, но зато дает более точные результаты. Его целесообразно применять при сложных конструкциях групповых заземлителей, что обычно имеет место в электроустановках с эффективно заземленной нейтралью*, т. е. в установках напряжением 110 кВ и выше.

Расчет заземлителей как в однородной, так и в многослойной земле можно выполнять по допустимому сопротивлению растеканию гока заземлителя или по допустимым напряжениям прикосновения (и шага).

Для электроустановок с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В, а также выше 1000 В до 35 кВ включительно расчет заземлителя производится обычно по допустимому сопротивлению растеканию.

Для электроустановок с эффективно заземленной нейтралью напряжением 110 кВ и выше заземлитель можно рассчитывать как по допустимому сопротивлению, так и по допустимым напряжениям прикосновения (и шага). В обоих случаях потенциал заземляющего устройства при стекании с него тока замыкания на землю не должен превышать 10 кВ, если возможен вынос потенциала за пределы зданий и внешних ограждений электроустановки. При потенциале заземляющего устройства выше 5 до 10 кВ должны быть предусмотрены меры по защите изоляции отходящих кабелей связи и телемеханики и предотвращению выноса опасных потенциалов за пределы электроустановки.

Порядок расчета: а) уточняют исходные данные; б) определяют расчетный ток замыкания на землю; в) вычисляют тре-

* См. сноску на с. 192.

буемое сопротивление заземляющего устройства; г) рассчитывают необходимое сопротивление растеканию искусственного заземлителя; д) выбирают тип заземлителя и составляют предварительную схему (проект) заземляющего устройства, т. е. размещают на плане установки принятые для сооружения заземлителя электроды и заземляющие проводники; е) уточняют параметры заземлителя.

а) Исходные данные для расчета

Для расчета заземления необходимы следующие сведения

1) характеристика электроустановки — тип установки, виды основного оборудования, рабочие напряжения, способы заземления нейтралей трансформаторов и генераторов и т. п.;

2) план электроустановки с указанием основных размеров и размещения оборудования;

3) формы и размеры электродов, из которых предусмотрено соорудить проектируемый групповой заземлитель, а также предполагаемая глубина погружения их в землю;

4) данные измерений удельного сопротивления грунта на участке, где должен быть сооружен заземлитель, и сведения о погодных (климатических) условиях, при которых производились эти измерения, а также характеристика климатической зоны (в соответствии с табл. 3.11); если земля принимается двухслойной, необходимы данные измерений удельного сопротивления обоих слоев земли и толщина верхнего слоя;

5) данные о естественных заземлителях: какие сооружения могут быть использованы для этой цели и сопротивления их растеканию тока, полученные непосредственным измерением; если по каким-либо причинам измерить сопротивление естественного заземлителя невозможно, должны быть даны сведения, позволяющие определить это сопротивление расчетом;

6) расчетный ток замыкания на землю; если ток неизвестен, его вычисляют обычными способами, при этом следует учитывать указания, приведенные в § 5.46;

7) расчетные значения допустимых напряжений прикосновения (и шага) и время действия защиты, если расчет производится по напряжениям прикосновения (и шага).

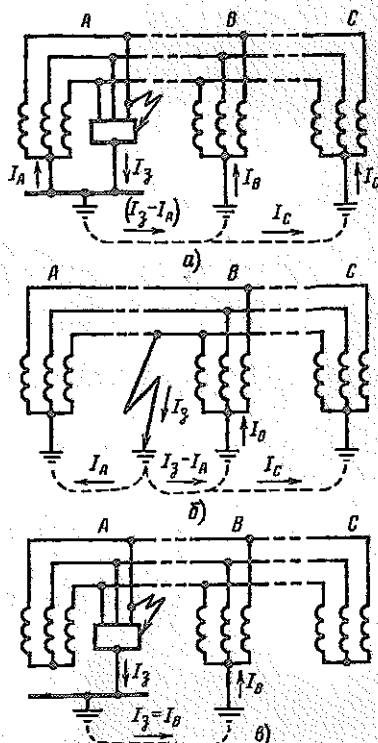
б) Определение расчетного тока замыкания на землю

Током замыкания на землю называется ток, проходящий через место замыкания на землю, т. е. в месте случайного электрического соединения токоведущей части непосред-

ис. 5.14. К определению расчетного тока замыкания на землю в установках выше 1000 В эффективно заземленной нейтралью (с большими токами замыкания на землю)

твенно с землей или нетоковедущими проводящими конструкциями или предметами, не изолированными от земли.

В электросети напряжением выше 1000 В с эффективно заземленной нейтралью обмоток источника тока, т. е. с большим током замыкания на землю, к которым относятся сети 110 кВ и выше, расчетным является наибольший из токов однофазного замыкания (установившееся значение тока), проходящих через заземляющее устройство. При определении этого тока должны быть учтены: возможность замыкания фазы на землю как в пределах проектируемой электроустановки, так и вне ее; распределение тока замыкания на землю между заземленными нейтральями сети; различные варианты схем работы сети, возможные при эксплуатации.



Покажем это на примере сети с несколькими подстанциями (А, В, С), приведенной на рис. 5.14:

а) пусть нейтрали трансформаторов заземлены на всех подстанциях (рис. 5.14, а). Тогда при замыкании одной из фаз на землю ток I_3 , стекающий в землю, будет равен сумме токов, идущих к месту замыкания от каждой подстанции, т. е.

$$I_3 = I_A + I_B + I_C.$$

Если замыкание произошло в пределах одной подстанции, например А, то токи, проходящие через заземления подстанций, будут: для подстанции А I_3 , а для других — соответственно I_B и I_C ;

б) если замыкание фазы на землю произошло вне подстанции (рис. 5.14, б), то через заземления подстанций будут проходить токи I_B и I_C соответственно;

в) если на подстанциях A и C нейтрали изолированы, то при замыкании фазы на землю на подстанции A (рис. 5.14, в) через заземляющие устройства подстанций A и B пройдет полный ток замыкания на землю $I_3 = I_B$ от подстанции B . Очевидно, при этой схеме во всех случаях замыкания наибольший ток для каждой подстанции — ток I_B ; он и является расчетным током.

В электросети напряжением выше 1000 В с изолированной нейтралью обмоток источника тока, т. е. с малым током замыкания на землю, к которым относятся сети до 35 кВ включительно, расчетный ток зависит от наличия аппаратов, компенсирующих емкостный ток сети.

В установках без компенсации емкостных токов расчетным током является полный ток замыкания на землю. Для сети с нейтралью, не присоединенной к заземляющему устройству, это будет емкостный ток однофазного замыкания на землю, A , который приближенно может быть определен из выражения

$$I_3 = \frac{U}{350} (35l_{к.л} + l_{в.л}), \quad (5.1)$$

где U — линейное напряжение сети, кВ; $l_{к.л}$, $l_{в.л}$ — длины электрически связанных кабельных и воздушных линий, км.

В установках с компенсацией емкостных токов в качестве расчетного тока принимают:

1) для заземляющих устройств, к которым присоединены компенсирующие аппараты, ток, равный 1,25 номинального тока этих аппаратов $I_{ном}$. В действительных условиях при пробое на корпус в установке, имеющей компенсирующий аппарат (рис. 5.15, а), через заземлитель будет проходить лишь полный емкостный ток I_{C3} однофазного замыкания на землю; однако поскольку возможна перекомпенсация емкостных токов (которая применяется для исключения резонанса напряжений при отключении части сети), за расчетный ток принимается 1,25 $I_{ном}$;

2) для заземляющих устройств, к которым не присоединены компенсирующие аппараты, остаточный ток замыкания на землю, возможный в данной сети при отключении наиболее мощного компенсирующего аппарата или наиболее разветвленного участка сети; в самом деле, при пробое на корпус в установке B , не имеющей компенсирующих аппаратов (рис. 5.15, б), через ее заземлитель пойдет остаточный, т. е. некомпенсированный, ток I_0 , равный разности емкостного тока I_{C3} и тока компенсирующего аппарата I_L установки A . Ток I_0 и является расчетным током.

Для установок с малыми токами замыкания на землю, т. е. с изолированной нейтралью, в целях упрощения допускается принимать

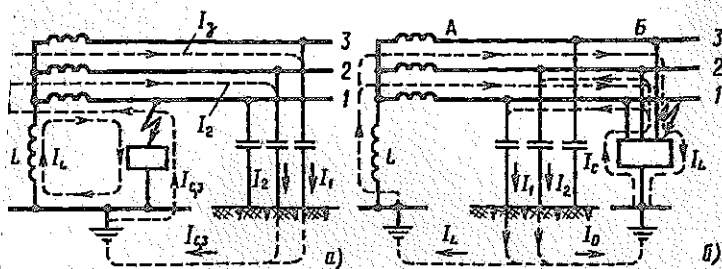


Рис. 5.15. К определению расчетного тока замыкания на землю в установках выше 1000 В с изолированной нейтралью (с малыми токами замыкания на землю) и компенсацией емкостных токов

в качестве расчетного ток плавления предохранителей или ток срабатывания релейной защиты от однофазных замыканий на землю или междуфазных замыканий, если эта защита обеспечивает отключение замыкания на землю. В этом случае ток замыкания на землю должен быть не менее 1,5-кратного тока срабатывания релейной защиты или 3-кратного номинального тока предохранителя.

Расчетный ток замыкания на землю должен быть определен для той из возможных в эксплуатации схем сети, при которой этот ток имеет наибольшее значение.

в) Определение требуемого сопротивления заземляющего устройства

Как указывалось, расчет заземления производят по заранее заданным наибольшим допустимым значениям сопротивления заземляющего устройства $R_{з.у}$ или напряжения прикосновения $U_{пр, доп}$ (и шага $U_{ш, доп}$).

Наибольшие допустимые значения $R_{з.у}$, установленные «Правилами устройства электроустановок», составляют:

для установок до 1000 В:

10 Ом при суммарной мощности генераторов или трансформаторов, питающих данную сеть, не более 100 кВт·А;
4 Ом во всех остальных случаях;

для установок выше 1000 В:

0,5 Ом при эффективно заземленной нейтрали (т. е. при больших токах замыкания на землю);

$250/I_3 \leq 10$ Ом при изолированной нейтрали (т. е. при малых токах замыкания на землю) и условии, что заземлитель используется только для электроустановок напряжением выше 1000 В;

$125/I_3 \leq 10$ Ом при изолированной нейтрали и условии, что заземлитель используется одновременно для установок напряжением до 1000 В. В этих выражениях I_3 — расчетный ток замыкания на землю, А.

При расчете заземлителя в однородной земле (способ коэффициентов использования) по напряжениям прикосновения (и шага), располагая наибольшими допустимыми их значениями, находят наибольшее допустимое расчетное сопротивление заземлителя из (3.82), (3.95)

$$U_{\text{пр, доп}} = \varphi_3 \alpha_1 \alpha_2; \quad U_{\text{ш, доп}} = \varphi_3 \beta_1 \beta_2, \quad (5.2)$$

а также из (3.1) $\varphi_3 = I_3 R_3$.

Заменив в первых двух уравнениях φ_3 его значением из (3.1) получают искомое сопротивление заземлителя, Ом:

по напряжению прикосновения

$$R_3 = U_{\text{пр, доп}} / I_3 \alpha_1 \alpha_2; \quad (5.3)$$

по напряжению шага

$$R_3 = U_{\text{ш, доп}} / I_3 \beta_1 \beta_2. \quad (5.4)$$

Меньшее значение R_3 и будет расчетным сопротивлением заземлителя.

При контурном (распределенном) заземлителе, когда сопротивление заземляющих проводников обычно мало, сопротивление заземляющего устройства $R_{3,y}$ можно считать равным R_3 . Если же заземлитель выносной, то вследствие его удаленности от заземляемого оборудования сопротивление заземляющего проводника может оказаться значительным и должно учитываться при вычислении R_3 и $R_{3,y}$. В этом случае полное сопротивление заземляющего устройства, Ом,

$$z_{3,y} = \sqrt{(R_3 + R_{3,n})^2 + X_{3,n}^2}, \quad (5.5)$$

где $R_{3,n}$ и $X_{3,n}$ — активное и индуктивное сопротивления заземляющего проводника соответственно, Ом.

Коэффициенты α_1 и β_1 , необходимые для вычисления, берут из таблиц (см., например, табл. 3.6). Для этого требуется предварительно выбрать тип заземлителя (контурный или выносной), задаться формой, размером и числом электродов и, наконец, условно разместить их на предоставленной площадке.

Коэффициенты α_2 и β_2 определяют из (3.86) и (3.96), считая, что ρ — расчетное удельное сопротивление основания,

на котором стоит человек (пола, гравийной засыпки или грунта), Ом·м; R_h — сопротивление тела человека, которое обычно принимают равным 1000 Ом.

При расчете сложного заземлителя в двухслойной земле (способом наведенных потенциалов) по заданному допустимому напряжению прикосновения $U_{\text{пр. доп}}$ сопротивление заземлителя R_3 , Ом, определяют также по (5.3). При этом, однако, коэффициент прикосновения α_1 находят не из таблиц, а вычисляют с помощью (3.111), а для случаев, когда $\rho_1/\rho_2 \geq 1$, — по упрощенному выражению (3.112).

Коэффициент прикосновения α_2 вычисляют, как и в предыдущем случае, по (3.86), в котором ρ надо заменить на ρ_1 — расчетное удельное сопротивление верхнего слоя земли, Ом·м:

$$\alpha_2 = R_h / (R_h + 1,5\rho_1). \quad (5.6)$$

г) Определение требуемого сопротивления искусственного заземлителя

При использовании естественных заземлителей (а это дает значительную экономию средств и предписывается ПУЭ) сопротивление искусственного заземлителя $R_{\text{и}}$, Ом, меньше требуемого R_3 , Ом, и равно

$$R_{\text{и}} = R_e R_3 / (R_e - R_3), \quad (5.7)$$

где R_e — сопротивление растеканию естественного заземлителя, Ом.

Сопротивление естественных заземлителей можно вычислять по формулам, выведенным для искусственных заземлителей аналогичной формы (см. табл. 3.1), или специальными формулам, встречающимся в технической литературе. Например, сопротивление растеканию системы грозозащитный трос — опоры R_e , Ом (при числе опор с тросом более 20), определяют по приближенной формуле

$$R_e = \sqrt{r_{\text{оп}} r_{\text{т}} / n_{\text{т}}}, \quad (5.8)$$

где $r_{\text{оп}}$ — расчетное, т. е. наибольшее (с учетом сезонных колебаний), сопротивление заземления одной опоры, Ом; $r_{\text{т}}$ — активное сопротивление троса на длине одного пролета, Ом; $n_{\text{т}}$ — число тросов на опоре.

Для стального троса сечением s , мм², при длине пролета m , активное сопротивление, Ом,

$$r_T = 0,15l/s. \quad (5)$$

Поскольку на сопротивление естественных заземлителей влияют многие факторы, которые не учитываются этими формулами (антикоррозийная изоляция на трубах или резиновые прокладки в стыках труб, различная глубина заложения протяженного заземлителя в земле и т. п.), указанные вычисления дают, как правило, очень большую ошибку. Поэтому сопротивление естественных заземлителей следует определять непосредственно измерениями. Если заземлители при этом находятся на глубине промерзания, то результат измерения умножают на коэффициент сезонности (см. табл. 3.12 и 3.13).

д) Выбор типа заземлителя и составление предварительной схемы заземляющего устройства

На основании данных о территории, на которой возможно размещение искусственного заземлителя, и значений I_z , R_n , ρ и др. выбирают тип заземляющего устройства — выносной или контурный. Затем после выбора формы электродов (обычно стержневые и полосовые) их ориентировочно размещают на плане участка.

В установках напряжением выше 1000 В с эффективно заземленной нейтралью при выполнении заземляющего устройства с соблюдением требований, предъявляемых к его сопротивлению, размещение электродов должно обеспечить возможно полное выравнивание потенциала на площадке, занятой электрооборудованием.

С этой целью заземлитель должен быть выполнен в виде горизонтальной сетки из продольных и поперечных проводников, уложенных в земле на глубине 0,5 — 0,7 м, и вертикальных электродов. При этом контурный электрод, образующий периметр сетки, должен охватывать как распределительные устройства, так и производственные здания и сооружения защищаемого объекта.

Продольные проводники сетки прокладывают вдоль осей электрооборудования и конструкций со стороны обслуживания на расстоянии 0,8 — 1,0 м от фундамента или основания оборудования.

Поперечные заземлители следует прокладывать в удобных местах между оборудованием на глубине 0,5 — 0,7 м от поверхности земли.

Расстояние между ними рекомендуется принимать увеличивающимся от периферии к центру заземляющей сетки. При этом первое и последующее расстояния, начиная от периферии, не должны превышать соответственно 4; 5; 6; 7,5; 9; 11; 13,5; 16 и 20 м. Размеры ячеек заземляющей сетки, примыкающих к местам присоединения нейтралей силовых трансформаторов и короткозамыкателей к заземляющему устройству, не должны превышать 6×6 м.

Если контур заземляющего устройства располагается в пределах внешнего ограждения электроустановки, то у входов и въездов на ее территорию следует выравнивать потенциал путем установки двух вертикальных заземлителей у внешнего горизонтального заземлителя напротив входов и въездов. Вертикальные заземлители должны иметь длину 3–5 м, а расстояние между ними должно быть равно ширине входа или въезда.

Заземляющее устройство, которое выполняется с соблюдением требований, предъявляемых к напряжению прикосновения, также должно иметь заземлитель в виде сетки. При этом размещение продольных и поперечных заземлителей должно определяться требованиями ограничения напряжений прикосновения до нормированных значений и удобством присоединения заземляемого оборудования.

Расстояния между продольными и поперечными горизонтальными искусственными заземлителями не должно превышать 30 м, а глубина их заложения в грунт должна быть не менее 0,3 м. У рабочих мест допускается прокладка заземлителей на меньшей глубине, если необходимость этого подтверждается расчетом, а наличие их не снижает удобства обслуживания электроустановки и срока службы заземлителей. Для снижения напряжения прикосновения у рабочих мест в обоснованных случаях может быть сделана подсыпка щебня слоем толщиной 0,1–0,2 м.

Во всех случаях следует:

заземляющие проводники, присоединяющие оборудование или конструкции к заземлителю, прокладывать в земле на глубине не менее 0,3 м;

вблизи мест расположения заземляемых нейтралей силовых трансформаторов, короткозамыкателей прокладывать продольные и поперечные горизонтальные заземлители (в четырех направлениях);

при выходе заземляющего устройства за пределы ограждения электроустановки горизонтальные заземлители, находящиеся вне территории электроустановки, прокладывать на глубине не менее 1 м. Внешний контур заземляющего устройства в этом случае рекомендуется выполнять в виде многоугольника с тупыми или скругленными углами.

Внешнюю ограду электроустановок не рекомендуется присоединять к заземляющему устройству. Если от электроустанов-

ки отходят воздушные линии электропередачи напряжением 110 кВ и выше, то ограду следует заземлять с помощью вертикальных заземлителей длиной 2–3 м, установленных у ее стоек по всему периметру через 20–50 м. Такие заземлители не требуются для ограды с металлическими стойками и со стойками из железобетона, арматура которых электрически соединена с металлическими звеньями ограды.

Для исключения электрической связи внешней ограды с заземляющим устройством расстояние от ограды до элементов заземляющего устройства, расположенных вдоль нее с внутренней, внешней или с обеих сторон, должно быть не менее 2 м. Выходящие за пределы ограды горизонтальные заземлители, трубы и кабели с металлической оболочкой и другие металлические коммуникации должны быть проложены посередине между стойками ограды на глубине не менее 0,5 м. В местах примыкания внешней ограды к зданиям и сооружениям, а также в местах примыкания к внешней ограде внутренних металлических ограждений должны быть выполнены кирпичные или деревянные вставки длиной не менее 1 м.

Не следует устанавливать на внешней ограде электроприемники напряжением до 1000 В, которые питаются непосредственно от понижающих трансформаторов, расположенных на территории электроустановки. При размещении электроприемников на внешней ограде их питание следует осуществлять через разделяющие трансформаторы. Эти трансформаторы не допускается устанавливать на ограде. Линия, соединяющая вторичную обмотку разделяющего трансформатора с электроприемником, расположенным на ограде, должна быть изолирована от земли исходя из расчетного значения напряжения на заземляющем устройстве.

Если выполнение хотя бы одного из указанных мероприятий невозможно, то металлические части ограды следует присоединить к заземляющему устройству и провести выравнивание потенциалов так, чтобы напряжение прикосновения с внешней и внутренней сторон ограды не превышало допустимых значений. При выполнении заземляющего устройства по допустимому сопротивлению с внешней стороны ограды на расстоянии 1 м от нее и на глубине 1 м должен быть проложен горизонтальный заземлитель. Этот заземлитель следует присоединять к заземляющему устройству не менее чем в четырех точках.

Во избежание выноса потенциала не допускается питание электроприемников, находящихся за пределами заземляющих устройств электроустановок напряжением выше 1000 В сети с эффективно заземленной нейтралью, от обмоток напряжением до 1000 В с заземленной нейтралью трансформаторов, находящихся в пределах контура заземляющего устройства.

е) Уточнение параметров заземлителя

На основании предварительной схемы заземлителя и имеющихся данных о расчетных удельных сопротивлениях грунта вычисляют расчетное сопротивление этого заземлителя R и результат сравнивают с ранее определенным расчетным значением требуемого сопротивления искусственного заземлителя $R_{\text{н}}$.

Если значения R и $R_{\text{н}}$ совпадают, или, по крайней мере, отличаются незначительно, значит, все основные параметры принятого нами заземлителя — форма, размеры, размещение электродов в земле и один относительно другого — выбраны правильно и, следовательно, напряжения прикосновения и шага находятся в допустимых пределах.

При значительных расхождениях в значениях R и $R_{\text{н}}$ необходимо внести поправки в предварительную схему заземлителя — изменить количество и размещение электродов, а иногда их размеры, площадь, занимаемую заземлителем, и т. п. — и вновь вычислить R .

Таким образом, вычисление R является *поверочным и производится путем постепенного приближения*.

После вычисления окончательного значения сопротивления искусственного заземлителя R определяют сопротивление заземлителя в целом, т. е. с учетом сопротивления естественного заземлителя $R_{\text{с}}$:

$$R_3 = RR_{\text{с}} / (R + R_{\text{с}}).$$

Затем для электроустановок с эффективно заземленной нейтралью (в которых сопротивление заземляющего устройства $R_{3, \text{у}}$ практически равно сопротивлению заземлителя R_3) вычисляют потенциал заземляющего устройства в аварийный период $\varphi_{3, \text{у}}$, В, по выражению

$$\varphi_{3, \text{у}} = I_3 R_{3, \text{у}} = I_3 R_3,$$

где I_3 — ток замыкания на землю, А.

Как указывалось, этот потенциал не должен превышать 10 кВ.

При расчете заземлителя в однородной земле способом коэффициентов использования значение R определяют в следующем порядке:

1) по предварительной схеме заземлителя, нанесенной на план установки, определяют длину горизонтальных и количество n вертикальных электродов;

2) по соответствующим формулам (см. табл. 3.1) вычисляют расчетные сопротивления горизонтальных электродов (суммарное сопротивление) R_{Γ} и одного вертикального $R_{\text{в}}$;

3) по данным табл. 3.2 и 3.3 находят коэффициенты использования для вертикальных и горизонтальных электродов $\eta_{\text{в}}$ и η_{Γ} ;

4) вычисляют расчетное сопротивление заземлителя R по уравнению (3.64), в которое подставляют полученные расчетные значения n , R_{Γ} , $R_{\text{в}}$, $\eta_{\text{в}}$ и η_{Γ} :

$$R = \frac{R_{\text{в}} R_{\Gamma}}{R_{\text{в}} \eta_{\Gamma} + R_{\Gamma} \eta_{\text{в}} n}. \quad (5.10)$$

Сопротивление заземлителей в виде горизонтальной сетки с вертикальными электродами (см. рис. 3.21) можно вычислить по выражению (3.65).

Если заземлитель представляет собой горизонтальную сетку без вертикальных электродов, то его сопротивление определяют с помощью формулы Оллендорфа — Лорана (3.69), а при некоторых его конфигурациях — по (3.71).

При расчете сложного заземлителя в двухслойной земле способом наведенных потенциалов значение R вычисляют в следующем порядке:

1) по предварительной схеме заземлителя (рис. 5.16, а) определяют площадь территории, занимаемой заземлителем (площадь заземлителя), S , м²; суммарную длину горизонтальных электродов L_{Γ} , м; количество n вертикальных электродов и их суммарную длину, м

$$L_{\text{в}} = n l_{\text{в}}; \quad (5.11)$$

2) составляют условную, так называемую расчетную модель заземлителя (рис. 5.16, б), представляющую собой горизонтальную квадратную сетку из взаимно пересекающихся полос с вертикальными электродами. Расчетная модель имеет одинаковые с принятой схемой заземлителя площадь S ; суммарную длину горизонтальных, количество и длины вертикальных электродов L_{Γ} , n , $l_{\text{в}}$, $L_{\text{в}}$; глубину заложения в землю $t_{\text{в}}$, м. Она погружена в однородную землю с расчетным эквивалентным удельным сопротивлением ρ , Ом·м, при котором искомое R имеет то же значение, что и в принятой схеме заземлителя в двухслойной земле;

3) вычисляют:

а) длину одной стороны модели, равную $\sqrt{S}$, м;

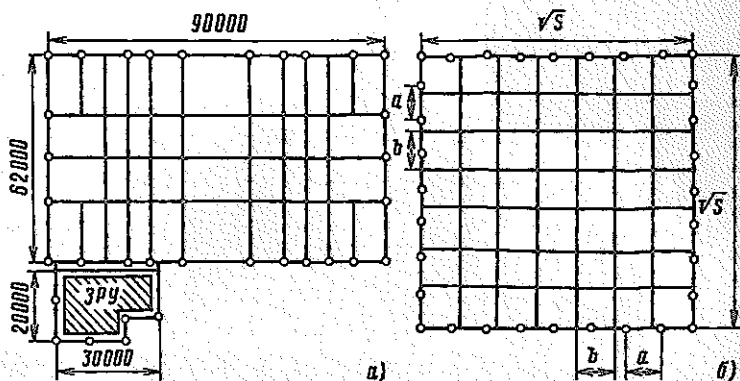


Рис. 5.16. К расчету сложного заземлителя в двухслойной земле:
 а – предварительная схема заземлителя; б – расчетная модель

б) количество ячеек m по одной стороне модели

$$m = \frac{L_r}{2\sqrt{S}} - 1; \quad (5.12)$$

если m окажется дробным числом, его округляют до целых чисел, после чего уточняют значение L_r , м:

$$L_r = 2(m + 1)\sqrt{S}; \quad (5.13)$$

в) длину стороны ячейки в модели b , м,

$$b = \sqrt{S}/m; \quad (5.14)$$

г) количество вертикальных электродов n , задавшись расстоянием a , м, между ними, или, если n известно, – расстояние a ; предварительно намечают размещение этих электродов в схеме модели. Обычно их располагают по периметру заземлителя, и в этом случае n или a вычисляют по формуле

$$na = 4\sqrt{S}; \quad (5.15)$$

д) суммарную длину L_v , м, вертикальных электродов по (5.11);

е) относительную глубину погружения в землю вертикальных электродов $t_{отн}$ по (3.68);

ж) относительную длину $l_{отн}$, м, верхней части вертикального заземлителя, т. е. части, находящейся в верхнем слое земли, по (3.110);

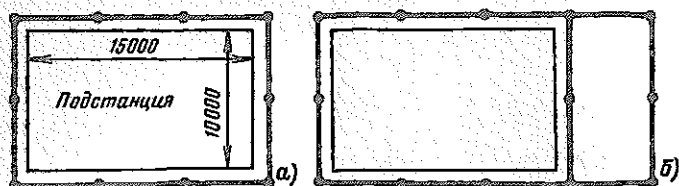


Рис. 5.17. К примеру расчета заземлителя подстанции:

а — план подстанции и предварительная схема заземлителя; *б* — окончательная схема заземлителя

3) расчетное эквивалентное удельное сопротивление земли ρ_z , Ом·м, для сложного заземлителя (горизонтальная сетка с вертикальными электродами) по (3.107);

4) вычисляют искомое расчетное сопротивление R , Ом, по (3.65) или, если заземлитель не имеет вертикальных электродов, — по (3.69) либо (3.71).

ж) Примеры расчета заземлителей

Пример 5.1. Расчет заземлителя в однородной земле методом коэффициентов использования по допустимому сопротивлению.

Задание. Рассчитать заземлитель подстанции 6/0,4 кВ.

Исходные данные. Подстанция понижающая, имеет два трансформатора 6/0,4 кВ с заземленными нейтральными на стороне 0,4 кВ; размещена в отдельно стоящем одноэтажном кирпичном здании, размеры которого в плане указаны на рис. 5.17, *а*.

В качестве естественного заземлителя будет использована металлическая технологическая конструкция, частично погруженная в землю; ее расчетное сопротивление растеканию (с учетом сезонных изменений) $R_c = 15$ Ом. Ток замыкания на землю неизвестен, однако известна протяженность линий 6 кВ — кабельных $l_{к.л} = 70$ км, воздушных $l_{в.л} = 65$ км. Заземлитель предполагается выполнить из вертикальных стержневых электродов длиной $l_v = 5$ м, диаметром $d = 12$ мм, верхние концы которых соединяются с помощью горизонтального электрода — стальной полосы суммарной длиной $L_T = 50$ м, сечением 4×40 мм, уложенной в землю на глубине $t_0 = 0,8$ м. Расчетные удельные сопротивления земли, полученные в результате измерений на участке, где предполагается сооружение заземлителя, и расчета, равны (см. пример 3.17): для вертикального электрода длиной 5 м $\rho_{расч.в} = 120$ Ом·м; для горизонтального длиной 50 м $\rho_{расч.г} = 176$ Ом·м.

Решение. Расчетный ток замыкания на землю на стороне 6 кВ определяем по приближенной формуле (5.1):

$$I_3 = \frac{6}{350} (35 \cdot 70 + 65) = 43 \text{ А.}$$

Требуемое сопротивление растеканию заземлителя, который принимаем общим для установок 6 и 0,4 кВ, согласно требованиям ПУЭ (см. с. 206)

$$R_3 = 125/I_3 = 125/43 = 2,9 \text{ Ом.}$$

Требуемое сопротивление искусственного заземлителя согласно (5.7)

$$R_{\text{н}} = 15 \cdot 2,9 / (15 - 2,9) = 3,6 \text{ Ом.}$$

Тип заземлителя выбираем контурный, размещенный по периметру подстанции. Предварительную схему заземлителя наносим на план подстанции с ее основными размерами (рис. 5.17, а). При этом вертикальные электроды размещаем на расстоянии $a = 5$ м один от другого.

Уточняем параметры заземлителя путем поверочного расчета. Из предварительной схемы видно, что в принятом нами заземлителе суммарная длина горизонтального электрода $L_r = 50$ м, а количество вертикальных электродов $n = 10$ шт.

Определяем расчетные сопротивления растеканию электродов — вертикального R_v и горизонтального R_r по формулам, приведенным в табл. 3.1, пп. 4 и 6:

$$\begin{aligned} R_v &= \frac{\rho_{\text{расч. в}}}{2\pi l_v} \left(\ln \frac{2l_v}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t + l_v}{4t - l_v} \right) = \\ &= \frac{120}{2\pi \cdot 5} \left(\ln \frac{2,5}{0,012} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 3,3 + 5}{4 \cdot 3,3 - 5} \right) = 27,1 \text{ Ом;} \\ R_r &= \frac{\rho_{\text{расч. г}}}{2\pi L_r} \ln \frac{L_r^2}{0,5bt} = \frac{176}{2\pi \cdot 50} \ln \frac{50^2}{0,5 \cdot 0,04 \cdot 0,8} = 6,7 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Далее, имея в виду, что принятый нами заземлитель контурный и что $n = 10$ шт., а отношение $a/l_v = 5/5 = 1$, определяем по табл. 3.2 и 3.3 коэффициенты использования электродов заземлителя — вертикальных $\eta_v = 0,56$, горизонтального $\eta_r = 0,34$.

Теперь по (3.64) находим сопротивление растеканию принятого нами группового заземлителя

$$R = \frac{27,1 \cdot 6,7}{27,1 \cdot 0,34 + 6,7 \cdot 10 \cdot 0,56} = 4,1 \text{ Ом.}$$

Это сопротивление оказывается больше, чем требуемое $R_{\text{н}}$ (3,6 Ом), поэтому принимаем решение увеличить в контуре заземлителя количество вертикальных электродов до 13 шт. Затем вновь по табл. 3.2 и 3.3 находим коэффициенты использования η_v и η_r , принимая отношение a/l_v равным единице, и вычисляем R .

В этом случае $\eta_b = 0,53$ и $\eta_r = 0,31$, а сопротивление заземлителя растеканию тока по (3.64)

$$R = \frac{27,1 \cdot 6,7}{27,1 \cdot 0,31 + 6,7 \cdot 13 \cdot 0,53} = 3,33 \text{ Ом.}$$

Это сопротивление меньше требуемого, но так как разница между ними невелика (0,27 Ом) и она повышает условия безопасности, принимаем этот результат как окончательный.

Итак: проектируемый заземлитель — контурный, состоит из 13 вертикальных стержневых электродов длиной 5 м и диаметром 12 мм и горизонтального электрода в виде стальной полосы длиной 70 м, сечением 4 × 40 мм, заглубленных в землю на 0,8 м (рис. 5.17, б).

Пример 5.2. Расчет заземлителя в двухслойной земле методом наведенных потенциалов по допустимому сопротивлению.

Задание. Рассчитать заземлитель подстанции 110/35/6 кВ.

Исходные данные: 1) подстанция понижающая, имеет два трансформатора 110/35/6 кВ с эффективно заземленной нейтралью со стороны 110 кВ; для питания собственных нужд имеется трансформатор 6/0,4 кВ с глухозаземленной нейтралью со стороны низшего напряжения; распределительные устройства 110 и 35 кВ открытого типа, 6 кВ — закрытого (рис. 5.16, а).

2) территория подстанции занимает площадь $S = 6300 \text{ м}^2$;

3) заземлитель предполагается выполнить из горизонтальных полюсовых электродов сечением 4 × 40 мм и вертикальных стержневых электродов длиной $l_b = 5 \text{ м}$, диаметром $d = 12 \text{ мм}$; глубина заложения электродов в землю $t = 0,8 \text{ м}$;

4) расчетные удельные сопротивления верхнего и нижнего слоев земли $\rho_1 = 230 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\rho_2 = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; мощность верхнего слоя земли $h_1 = 2,8 \text{ м}$ (см. пример 3.18);

5) в качестве естественного заземлителя предполагается использовать систему трос — опоры двух подходящих к подстанции воздушных линий электропередачи 110 кВ на металлических опорах с длиной пролета $l = 250 \text{ м}$; каждая линия имеет один стальной грозозащитный трос сечением $s = 50 \text{ мм}^2$; расчетное (с учетом сезонных колебаний) сопротивление заземления одной опоры $r_{оп} = 12 \text{ Ом}$; число опор с тросом на каждой линии больше 20; данные измерений сопротивления системы трос — опоры отсутствуют;

6) расчетный ток замыкания на землю на стороне 110 кВ составляет 5 кА, на стороне 35 кВ — 40 А, на стороне 6 кВ — 30 А.

Решение. Сопротивление заземлителя растеканию тока R_z согласно требованиям ПУЭ должно быть не более 0,5 Ом (см. с. 205).

Сопротивление естественного заземлителя для двух линий R_e определяем по (5.8) и (5.9):

$$R_e = \frac{1}{2} \sqrt{r_{оп} \frac{0,15 I}{sn_r}} = \frac{1}{2} \sqrt{12 \frac{0,15 \cdot 250}{50 \cdot 1}} = 1,5 \text{ Ом.}$$

Требуемое сопротивление искусственного заземлителя R_n получим из (5.7) с учетом того, что $R_3 = 0,5 \text{ Ом}$ и $R_c = 1,5 \text{ Ом}$:

$$R_n = \frac{1,50 \cdot 0,5}{1,50 - 0,5} = 0,75 \text{ Ом.}$$

Составляем предварительную схему заземлителя и наносим ее на план подстанции, приняв контурный (распределенный) тип заземлителя, т. е. в виде сетки из горизонтальных полосовых и вертикальных стержневых (длиной $l_b = 5 \text{ м}$) электродов. При этом руководствуемся указаниями § 5.4, д. Вертикальные электроды размещаем по периметру заземлителя (рис. 5.16, а).

По предварительной схеме определяем суммарную длину горизонтальных и количество вертикальных электродов: $L_r = 1310 \text{ м}$; $n = 32 \text{ шт.}$

Составляем расчетную модель заземлителя в виде квадратной сетки площадью $S = 6300 \text{ м}^2$. Длина одной стороны ее будет $\sqrt{S} = 80 \text{ м}$ (рис. 5.16, б).

Количество ячеек по одной стороне модели согласно (5.12)

$$m = \frac{1310}{2 \cdot 80} - 1 = 7,2.$$

Принимаем $m = 7$.

Уточняем суммарную длину горизонтальных электродов по (5.13):

$$L_r = 2(7 + 1) \cdot 80 = 1280 \text{ м.}$$

Длина стороны ячейки в модели (5.14)

$$b = 80/7 = 11,4 \text{ м.}$$

Расстояние между вертикальными электродами согласно (5.15)

$$a = 4 \cdot 80/32 = 10 \text{ м.}$$

Суммарная длина вертикальных электродов по (5.11)

$$L_b = 32 \cdot 5 = 160 \text{ м.}$$

Относительная глубина погружения в землю вертикальных электродов по (3.68)

$$\epsilon_{\text{отн}} = (5 + 0,8)/80 = 0,0725.$$

Относительная длина по (3.110)

$$l_{\text{отн}} = (2,8 - 0,8)/5 = 0,4.$$

Расчетное эквивалентное удельное сопротивление грунта ρ_2 определяем по (3.107). Предварительно находим значения ρ_1/ρ_2 и k :

$$\rho_1/\rho_2 = 230/80 = 2,87.$$

Поскольку $1 < \rho_1/\rho_2 < 10$, значение k находим по (3.109)

$$k = 0,43 \left(0,4 + 0,272 \ln \frac{10\sqrt{2}}{5} \right) = 0,294.$$

Теперь определяем ρ_2 по (3.107):

$$\rho_2 = \rho_1 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^k = 80 \left(\frac{230}{80} \right)^{0,294} = 80 \cdot 2,87^{0,294} = 80 \text{ P}.$$

Находим значение P :

$$\ln P = 0,294 \ln 2,87 = 0,31; P = 1,36.$$

Следовательно, $\rho_2 = 80 \cdot 1,36 = 108 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Вычисляем расчетное сопротивление R рассматриваемого искусственного заземлителя по (3.65). Предварительно находим коэффициент A по (3.66), поскольку $0 < t_{\text{отн}} < 0,1$:

$$A = 0,444 - 0,84 t_{\text{отн}} = 0,444 - 0,84 \cdot 0,0725 = 0,4.$$

Тогда

$$R = A \frac{\rho_2}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_2}{L_r + L_b} = 0,4 \frac{108}{80} + \frac{108}{1280 + 160} = 0,62 \text{ Ом}.$$

Это значение R практически совпадает с требуемым сопротивлением искусственного заземлителя (0,75 Ом); некоторая разница допустима, тем более что в данном случае она повышает условия безопасности.

Общее сопротивление заземлителя подстанции (с учетом сопротивления естественного заземлителя)

$$R_3 = RR_e/(R + R_e) = 0,62 \cdot 1,5/(0,62 + 1,5) = 0,44 \text{ Ом}.$$

Определяем потенциал заземляющего устройства в аварийный период

$$\varphi_{3y} = I_3 R_3 = 5000 \cdot 0,44 = 2200 \text{ В}.$$

Этот потенциал допустим, так как он меньше 10 кВ.

Таким образом, искусственный заземлитель подстанции должен быть выполнен из горизонтальных пересекающихся полосовых электродов сечением 4×40 мм общей длиной не менее 1280 м и вертикальных стержневых в количестве не менее 32 шт. диаметром 12 мм, длиной по 5 м, размещенных по периметру заземлителя по возможности равномерно, т. е. на одинаковом расстоянии один от другого; глубина погружения электродов в землю 0,8 м. При этих условиях со-

сопротивление $R_{\text{н}}$ искусственного заземлителя в самое неблагоприятное время года не будет превышать 0,62 Ом, а сопротивление заземлителя отстанции в целом R_{Σ} , т. е. общее сопротивление искусственного и естественного заземлителей, будет не более 0,5 Ом.

5.5. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

а) Возможные повреждения заземляющих устройств

В процессе эксплуатации не исключена возможность повышения сопротивления растеканию тока заземлителя сверх расчетного и нарушения целостности заземляющей проводки.

Повышение сопротивления заземлителя может быть следствием сезонных колебаний сопротивления грунта, не учтенных проектом; высушивания почвы под воздействием находящихся вблизи заземлителя горячих поверхностей — трубопроводов пара, горячей воды и др.; ухудшения состояния контактов между отдельными элементами заземлителя при прохождении больших токов или в результате коррозии и т. п.

Нарушения целостности сети заземления (обрывы проводников, ослабление болтовых соединений, нарушение контактов и т. п.) могут быть результатом случайных механических воздействий на заземляющие проводники, а также термического или динамического действия аварийных токов, ошибочных операций при ремонтных работах и пр.

Во всех случаях заземляющие устройства теряют, как правило, способность обеспечивать безопасность людей во время замыкания фазы на корпус, поскольку при этом возможно значительное увеличение потенциала заземлителя, а следовательно, и напряжений прикосновения и шага.

Чтобы исключить указанные опасности, необходимы тщательный надзор за состоянием элементов защитного заземления и периодическое измерение сопротивления заземляющего устройства.

б) Виды и периодичность проверок состояния заземляющих устройств

Для определения состояния заземляющих устройств действующие правила предписывают производить:

а) измерение сопротивления заземляющего устройства после монтажа, через год после включения в эксплуатацию и в последующем при комплексном ремонте электроустановки, но не реже чем через 10 лет на электростанциях, подстанциях и линиях электропередачи энергосистем, через 3 года на подстанциях потребителей и через 1 год в цеховых электроустановках потребителей [16, 17].

Сопротивления заземляющих устройств, подверженных интенсивной коррозии, должны измеряться через меньшие промежутки времени.

Внеплановые измерения сопротивлений заземляющих контур производятся после переустройства, капитального ремонта, осадки и появления оползней;

б) выборочное вскрытие грунта для осмотра элементов заземляющего устройства — каждый раз при измерении сопротивлений заземления;

в) проверку наличия цепи между заземленными объектами и заземлителями (отсутствие обрывов, неудовлетворительных контактов и т. п.) — при каждом ремонте или перестановке оборудования, а в электроустановках потребителей, кроме того при ремонте заземлителей;

г) проверку надежности соединений естественных заземлителей — после каждого их ремонта;

д) проверку состояния пробивных предохранителей — при предположении об их срабатывании, а также при ремонте и перестановке оборудования.

При обнаружении частей заземляющего устройства, пришедших в негодность и имеющих значительную коррозию, они должны быть заменены новыми.

Вместе с тем надлежит периодически осматривать наземную часть заземляющего устройства, например, в периоды осмотров электрооборудования, а также после ремонтных работ с целью выявить возможные недостатки: обрывы заземляющей проводки, отсутствие присоединения заземляемых элементов к заземляющей магистрали, нарушение связи между отдельными участками естественных заземлителей и т. п.;

е) измерение напряжения прикосновения и тока, протекающего через тело человека при прикосновении к заземленному оборудованию в период замыкания фазы на корпус. Это измерение предусмотрено ГОСТ 12.1.038-82 [4] в электроустановках, заземляющие устройства которых рассчитаны по напряжению прикосновения.

Каждое отдельное заземляющее устройство должно иметь паспорт, содержащий схему устройства, основные технические и расчетные данные, сведения о произведенных ремонтах и внесенных изменениях.

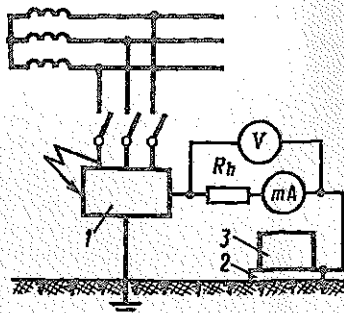
в) Испытания заземляющих устройств

Измерение сопротивления заземлителя может быть произведено рядом методов, в том числе методом амперметра — вольтметра (см. § 3.7, ж). При этом роль контрольного зонда выполняет испытуемый заземлитель, расстояния от которого до токового и потенциального электродов, а также между этими электродами должны быть не меньше указанных на рис. 3.41.

Измерения напряжений прикосновения $U_{пр}$ и токов $I_{п}$, протекающих через тело человека, должны производиться в местах, где возможно замыкание электрической цепи через тело человека. При этом режим

рис. 5.18. Принципиальная схема измерения напряжения прикосновения и тока, проходящего через человека в электроустановках до 1000 В:

1 — корпус; 2 — металлическая пластинка 25×25 см; 3 — груз 50 ± 5 кг; R_h — резистор, имитирующий сопротивление тела человека



и условия работы электроустановки должны быть наиболее неблагоприятными, т. е. создающими наибольшие значения $U_{пр}$ и I_h .

Полученные при измерениях значения напряжений прикосновения и токов через человека не должны превышать более чем на 10% значения, указанные в табл. 1.2—1.5.

Одна из схем измерения $U_{пр}$ и I_h в электроустановках напряжением до 1000 В приведена на рис. 5.18. Для измерений в аварийный период создается искусственное замыкание фазы сети на корпус оборудования, показанное на рис. 5.18 молниевидной стрелкой.

Напряжение прикосновения принимается равным падению напряжения на резисторе R_h , имитирующем сопротивление тела человека, и измеряется вольтметром, а ток, протекающий через человека, — равным току, протекающему через резистор, и измеряется миллиамперметром. Приборы должны иметь класс точности не менее 2,5, а вольтметр, кроме того, возможно большее сопротивление. Резистор должен обладать сопротивлением, равным: при измерениях в нормальный (неаварийный) период работы электроустановки (табл. 1.2) — 6,7 кОм; при измерениях в аварийный период (табл. 1.3 и 1.5) — 1 кОм при длительности воздействия тока до 1 с включительно и 6,0 кОм при длительности воздействия более 1 с; при измерениях в аварийный период (табл. 1.4) — 1 кОм.

Для создания контакта с землей (полом) в том месте, где может находиться человек в период прикосновения к электроустановке, укладывается металлическая квадратная пластинка размером 25×25 см, на которой размещается груз массой не менее 50 кг.

В электроустановках напряжением выше 1000 В $U_{пр}$ и I_h измеряются с помощью аналогичных схем, но с использованием постороннего источника тока сравнительно небольшого напряжения — 127 — 220 В. Действительные значения $U_{пр}$ и I_h в этом случае определяют пересчетом измеренных значений $U_{пр, изм}$ и $I_{h, изм}$ по формулам

$$U_{пр} = U_{пр, изм} I_3 / I_{3, изм};$$

$$I_h = I_{h, изм} I_3 / I_{3, изм}$$

где I_3 — ток замыкания на землю в данной сети, А; $I_{3, изм}$ — ток замыкания на землю, при котором производились измерения.

Глава 6

ЗАНУЛЕНИЕ

6.1. НАЗНАЧЕНИЕ, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Зануление — преднамеренное электрическое соединение металлических нетоковедущих частей электроустановки, могущих оказаться под напряжением, с глухозаземленной нейтральной точкой* обмотки источника тока в трехфазных сетях с глухозаземленным выводом обмотки источника тока в однофазных сетях и с глухозаземленной средней точкой обмотки источника энергии в сетях постоянного тока.

Принципиальная схема зануления в сети трехфазного тока показана на рис. 6.1.

Проводник, обеспечивающий указанные соединения зануляемых частей с глухозаземленной нейтральной точкой, выводом и средней точкой обмоток источников тока, называется нулевым защитным проводником.

Нулевой защитный проводник следует отличать от так называемого нулевого рабочего проводника, который также соединен с глухозаземленной нейтральной точкой, выводом и средней точкой обмоток источников тока, но предназначен для питания током электроприемников, т. е. является частью цепи рабочего тока и по нему проходит рабочий ток.

Нулевой рабочий проводник должен, как правило, иметь изоляцию, равноценную изоляции фазных проводников; сечение его должно быть рассчитано на длительное прохождение рабочего тока.

Например, для целей освещения в квартиру вводятся два провода — один фазный, по которому ток подается к светильникам, а второй нулевой рабочий, по которому ток возвращается в наружную сеть. Эти провода одинаковы: они имеют равноценные изоляцию и проводимость.

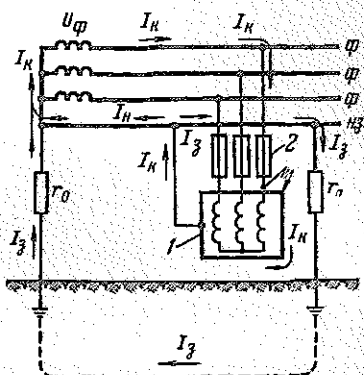
Нулевой рабочий проводник рекомендуется использовать одновременно и как нулевой защитный, т. е. для зануления приемников энергии (за исключением приемников однофазного и постоянного тока). В этом случае нулевой рабочий проводник должен удовлетворять требованиям, предъявляемым к нулевым рабочим и защитным проводникам.

В нулевом рабочем проводнике, если он не используется одновременно как нулевой защитный, допускается ставить предохранители.

* Определение глухозаземленной нейтральной точки приведено в § 4.1 (с. 160).

Рис. 6.1. Принципиальная схема зануления в трехфазной сети до 1000 В:

1 — корпус электроустановки (электродвигатель, трансформатор и т. п.); 2 — аппараты защиты от токов КЗ (предохранители, автоматические выключатели и т. п.); r_0 — сопротивление заземления нейтрали обмотки источника тока; r_n — сопротивление повторного заземления нулевого защитного проводника; I_K — ток КЗ; I_n — часть тока КЗ, протекающего через нулевой защитный проводник; I_3 — часть тока КЗ, протекающего через землю



Назначение зануления — устранение опасности поражения током в случае прикосновения к корпусу электроустановки и другим металлическим нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением относительно земли вследствие замыкания на корпус* и по другим причинам.

Принцип действия зануления — превращение замыкания на корпус в однофазное короткое замыкание (т. е. замыкание между фазным и нулевым защитным проводниками) с целью вызвать большой ток, способный обеспечить срабатывание защиты и тем самым автоматически отключить поврежденную электроустановку от питающей сети. Такой защитой являются: плавкие предохранители или автоматы максимального тока, устанавливаемые для защиты от токов короткого замыкания; магнитные пускатели со встроенной тепловой защитой; контакторы в сочетании с тепловыми реле, осуществляющие защиту от перегрузки; автоматы с комбинированными расцепителями, осуществляющие защиту одновременно от токов короткого замыкания и перегрузки.

Кроме того, поскольку зануленные корпуса (или другие нетоковедущие металлические части) заземлены через нулевой защитный проводник, то в аварийный период, т. е. с момента возникновения замыкания на корпус и до автоматического отключения поврежденной электроустановки от сети, проявляется защитное свойство этого заземления, как при защитном заземлении. Иначе говоря, заземление корпусов через нулевой проводник снижает в аварийный период их напряжение относительно земли.

* Определения терминов «напряжение относительно земли» и «замыкание на корпус» приведены в сносках на с. 75 и 114.

Таким образом, зануление осуществляет два защитных действия — быстрое автоматическое отключение поврежденной установки от питающей сети и снижение напряжения зануленных металлических нетокопроводящих частей, оказавшихся под напряжением, относительно земли.

При этом отключение осуществляется лишь при замыкании на корпус, а снижение напряжения — во всех случаях возникновения напряжения на зануленных металлических нетокопроводящих частях, в том числе при замыкании на корпус, электростатическом и электромагнитном влиянии соседних цепей, вынос потенциала от других электроустановок и т. п.

Область применения — трехфазные четырехпроводные сети до 1000 В с глухозаземленной нейтралью, в том числе наиболее распространенные сети напряжением 380/220 В а также сети 220/127 и 660/380 В. Зануление применяется и в трехпроводных сетях постоянного тока с глухозаземленной средней точкой обмотки источника энергии, а также в однофазных двухпроводных сетях переменного тока с глухозаземленным выводом обмотки источника тока.

6.2. НАЗНАЧЕНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ ЗАНУЛЕНИЯ

Из рис. 6.1 видно, что для схемы зануления необходимы нулевой защитный проводник, глухое заземление нейтрали источника тока и повторное заземление нулевого защитного проводника.

Рассмотрим назначение этих элементов применительно к наиболее распространенным электрическим сетям — трехфазным переменного тока.

а) Назначение нулевого защитного проводника

Пусть мы имеем схему без нулевого защитного проводника, роль которого выполняет земля (рис. 6.2). Будет ли работать такая схема?

При замыкании фазы на корпус по цепи, образовавшейся через землю, будет проходить ток

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

где U_{ϕ} — фазное напряжение сети, В; r_0 , r_k — сопротивления заземления нейтрали и корпуса, Ом.

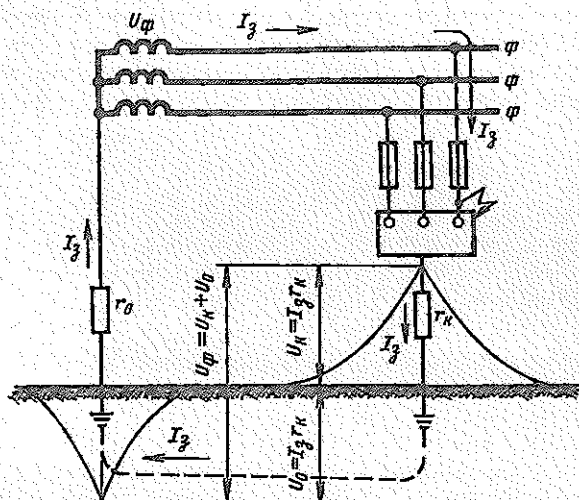


Рис. 6.2. К вопросу о необходимости нулевого защитного проводника в трехфазной сети до 1000 В с заземленной нейтралью

Сопротивления обмоток источника тока (например, трансформатора, питающего данную сеть) и проводов сети малы по сравнению с r_0 и r_k , поэтому их в расчет не принимаем.

В результате протекания тока через сопротивление r_k в землю на корпусе возникает напряжение относительно земли U_k , В, равное падению напряжения на сопротивлении r_k :

$$U_k = I_3 r_k = U_\phi r_k / (r_k + r_0).$$

Ток I_3 может оказаться недостаточным, чтобы вызвать срабатывание максимальной токовой защиты, т. е. установка может не отключиться. Например, при $U_\phi = 220$ В и $r_0 = r_k = 4$ Ом

$$I_3 = 220 / (4 + 4) = 27,5 \text{ А}.$$

Если при этом ток срабатывания защиты больше I_3 (в рассматриваемом примере больше 27,5 А), то отключения не произойдет и корпус будет находиться под напряжением

$$U_k = 220 \cdot 4 / (4 + 4) = 110 \text{ В}$$

до тех пор, пока установку не отключат вручную. Безусловно такое положение недопустимо, поскольку при этом возникает угроза поражения током людей, прикоснувшихся к корпусу поврежденного оборудования или к металлическим предметам имеющим соединение с этим корпусом.

Чтобы устранить эту опасность, надо обеспечить быстро автоматическое отключение установки, т. е. увеличить ток, проходящий через защиту, что достигается уменьшением сопротивления цепи этого тока путем введения в схему нулевого защитного проводника соответствующей проводимости.

Следовательно, назначение нулевого защитного проводника в схеме зануления — обеспечить необходимое для отключения установки значение тока однофазного короткого замыкания путем создания для этого тока цепи с малым сопротивлением.

Из сказанного вытекает еще один вывод: в трехфазной сети до 1000 В с заземленной нейтралью без нулевого защитного проводника невозможно обеспечить безопасность при замыкании фазы на корпус, поэтому такая сеть применяться не должна.

б) Назначение заземления нейтрали обмоток источника тока

Рассмотрим сеть, изолированную от земли, т. е. с изолированной нейтралью обмоток источника тока и без повторного заземления нулевого защитного проводника. Будет ли работать система зануления в такой сети? Нетрудно видеть, что в этой сети зануление обеспечит отключение поврежденной установки так же надежно, как и в сети с заземленной нейтралью. С этой точки зрения режим нейтрали как бы не имеет значения. Однако при замыкании фазы на землю (рис. 6.3, а), что может быть результатом обрыва и падения на землю провода, замыкания фазы на неизолированный от земли корпус и т. п., земля приобретает потенциал фазы и между зануленным оборудованием, имеющим нулевой потенциал, и землей возникает напряжение U_k , В, близкое по значению к фазному напряжению сети U_ϕ . Оно будет существовать до отключения всей сети вручную или до ликвидации замыкания на землю, так как максимальная токовая защита при этом повреждении не сработает. Безусловно, указанное положение весьма опасно.

В сети с заземленной нейтралью при таком повреждении будет совершенно иное, практически безопасное

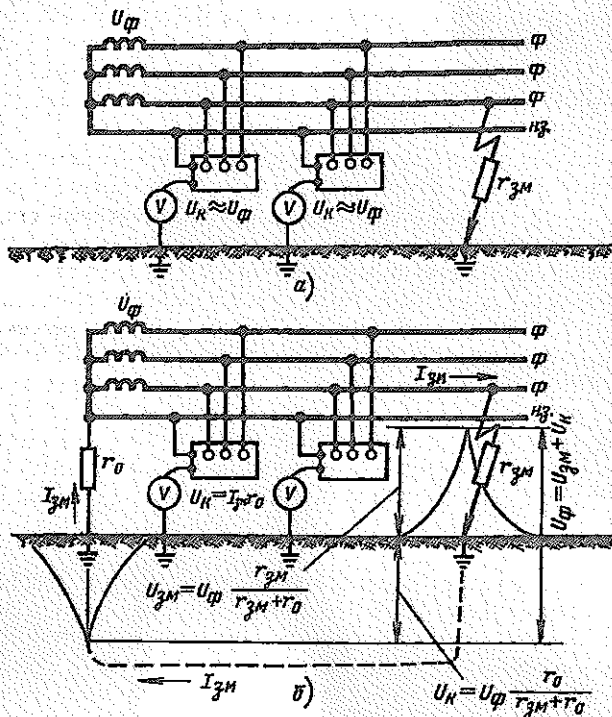


Рис. 6.3. Случай замыкания фазы на землю в трехфазной четырехпроводной сети с изолированной (а) и заземленной (б) нейтралью обмоток источника тока

положение. В этом случае U_ϕ , В, разделится пропорционально сопротивлениям замыкания фазы на землю r_{3M} , Ом, и заземления нейтрали r_0 , Ом (рис. 6.3, б), благодаря чему U_K , В, уменьшится и будет равно падению напряжения на сопротивлении заземления нейтрали:

$$U_K = I_{3M} r_0 = U_\phi r_0 / (r_{3M} + r_0),$$

где I_{3M} — ток замыкания на землю, А.

Как правило, сопротивление r_{3M} , которое оказывает грунт току при случайном замыкании фазы на землю, во много раз больше сопротивления специально выполненного заземления

нейтрали r_0^* . Поэтому U_k оказывается незначительным. Например, при $U_\phi = 220$ В, $r_0 = 4$ Ом и $r_{зм} = 100$ Ом

$$U_k = 220 \cdot 4 / (4 + 100) = 8,5 \text{ В.}$$

Таким образом, назначение заземления нейтрали обмотки источника тока, питающего сеть до 1000 В, — снижение напряжения зануленных корпусов (а следовательно, нулевого защитного проводника) относительно земли до безопасного значения при замыкании фазы на землю.

Из сказанного следует еще один вывод: электрическая сеть до 1000 В с нулевым защитным проводником, изолированная от земли, т. е. с изолированной нейтралью обмоток источника тока и без повторных заземлений нулевого защитного проводника, таит опасность поражения током и поэтому применяться не должна.

Этот вывод справедлив как для сетей переменного тока — трехфазных четырехпроводных с изолированной нейтралью и однофазных трехпроводных, изолированных от земли, так и для трехпроводных сетей постоянного тока с изолированной средней точкой.

Уместно отметить, что повторные заземления нулевого защитного проводника, так же как заземление нейтрали, обеспечивают снижение U_k . Иначе говоря, при вычислении значения U_k надо учитывать и повторные заземления нулевого защитного проводника.

в) Назначение повторного заземления нулевого защитного проводника

Повторное заземление нулевого защитного проводника практически не влияет на отключающую способность схемы зануления, и в этом смысле без него можно обойтись.

Однако при отсутствии повторного заземления нулевого защитного проводника возникает опасность для людей, прикасающихся к зануленному оборудованию в период, пока существует замыкание фазы на корпус. Кроме того, в случае обрыва

* Экспериментами установлено, что сопротивление растеканию $r_{зм}$ неизолированных проводов при контакте с землей на длине 30–50 м составляет сотни и даже тысячи ом, но иногда — при сырой земле (провод на указанной длине погружен в грязь) — 15–20 Ом. Лишь в редких случаях, когда провод падает в реку или иной водный бассейн, а также касается металлической конструкции с малым сопротивлением растеканию (водопровод и т. п.), $r_{зм}$ снижается до 2–5 Ом.

нулевого защитного проводника и замыкания фазы на корпус за местом обрыва эта опасность резко повышается, поскольку напряжение относительно земли оборванного участка нулевого провода и присоединенных к нему корпусов может достигать фазного напряжения сети. Рассмотрим оба эти случая.

При замыкании фазы на корпус в сети, не имеющей повторного заземления нулевого защитного проводника (рис. 6.4), участок нулевого защитного проводника, находящийся за местом замыкания, и все присоединенные к нему корпуса окажутся под напряжением относительно земли U_n , U_B , равным:

$$U_n = I_k z_{н.з.}, \quad (6.1)$$

где I_k — ток КЗ, проходящий по петле фаза — нуль, А; $z_{н.з.}$ — полное сопротивление участка нулевого защитного проводника, обтекаемого током I_k , Ом (т. е. участка АВ):

$$z_{н.з.} = \sqrt{R_{н.з.}^2 + X_{н.з.}^2};$$

$R_{н.з.}$ и $X_{н.з.}$ — активное и внутреннее индуктивное сопротивление* нулевого защитного проводника (участка АВ), Ом.

На другом участке нулевого защитного проводника (ближе к источнику энергии) напряжение будет изменяться от U_n до 0 по прямой линии (рис. 6.4).

Эти напряжения будут существовать в течение аварийного периода, т. е. с момента замыкания фазы на корпус до автоматического отключения поврежденной установки от сети.

Если для упрощения пренебречь сопротивлением обмоток источника тока и индуктивным сопротивлением петли фаза — нуль, а также считать, что фазный и нулевой защитный провод-

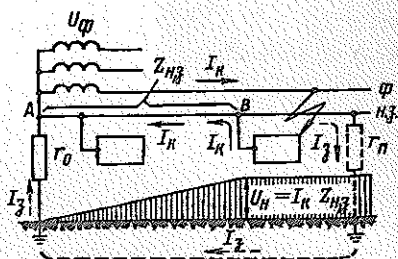


Рис. 6.4. Замыкание на корпус в сети, не имеющей повторных заземлений нулевого защитного проводника

* При переменном токе любой проводник конечных размеров помимо активного сопротивления R обладает индуктивностью L , которая и обуславливает так называемое внутреннее индуктивное сопротивление проводника $X = \omega L = 2\pi f L$.

ники обладают лишь активными сопротивлениями R_ϕ , $R_{н,з}$ Ом, то (6.1) примет вид

$$U_n = I_x R_{н,з} = \frac{U_\phi}{R_\phi + R_{н,з}} R_{н,з}. \quad (6.2)$$

Если принять $R_{н,з} \leq 2R_\phi$ (что обычно имеет место в практических условиях), то $U_n \leq (2/3) U_\phi$. Например, в сети 380/220 В при $R_{н,з} = 2R_\phi$ напряжение относительно земли участка нулевого защитного проводника, находящегося за местом замыкания, и всех присоединенных к нему (т. е. зануленных) металлических частей составит $U_n = (2/3) \cdot 220 = 147$ В. Очевидно, что при этом создается реальная угроза поражения людей электрическим током.

Чтобы уменьшить это напряжение, надо снизить $R_{н,з}$, т. е. увеличить сечение нулевого защитного проводника. Например, чтобы снизить U_n до 40 В при $U_\phi = 220$ и 380 В, необходимо согласно (6.2) иметь нулевой защитный проводник (из того же материала, что и фазный) сечением, в 4,25 и 8 раз превышающим сечение фазного, что, безусловно, экономически нецелесообразно.

Если нулевой защитный проводник будет иметь повторное заземление с сопротивлением r_n Ом (на рис. 6.4 это заземление показано пунктиром), то U_n снизится до значения, В,

$$U_n = I_3 r_n = \frac{U_{AB}}{r_n + r_0} r_n,$$

где I_3 — ток, стекающий в землю через сопротивление r_n , А; U_{AB} — падение напряжения в нулевом защитном проводнике на участке AB ; r_0 — сопротивление заземления нейтрали источника тока, Ом.

При тех же допущениях (т. е. если пренебречь сопротивлениями обмоток источника тока и индуктивным сопротивлением петли фаза — нуль, считать, что фазный и нулевой защитный проводники обладают лишь активными сопротивлениями R_ϕ и $R_{н,з}$, причем $R_{н,з} = 2R_\phi$, и допустить, что по нулевому защитному проводнику на участке AB проходит такой же ток I_x , как и по фазному проводнику) падение напряжения в фазном проводнике составит $U_\phi/3$, а в нулевом защитном $2U_\phi/3$.

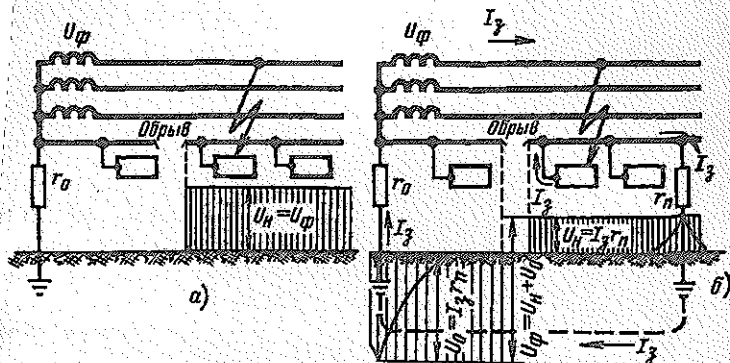


Рис. 6.5. Замыкание на корпус при обрыве нулевого защитного проводника:

а — в сети без повторного заземления нулевого защитного проводника; б — в сети с повторным заземлением нулевого защитного проводника

Тогда последнее выражение примет вид

$$U_H = \frac{2U_\phi}{3} \frac{r_n}{r_n + r_0}.$$

При одинаковых значениях r_0 и r_n получим $U_H = U_\phi/3$, т. е. при $U_\phi = 220$ В $U_H = 74$ В. Это в 2 раза меньше, чем при отсутствии повторного заземления. При меньшем значении r_n или увеличении количества повторных заземлений U_H может быть снижено до требуемых значений.

Итак, повторное заземление нулевого защитного проводника снижает напряжение на зануленных корпусах в период замыкания фазы на корпус.

При случайном обрыве нулевого защитного проводника и замыкании фазы на корпус за местом обрыва (при отсутствии повторного заземления) напряжение относительно земли участка нулевого защитного проводника за местом обрыва и всех присоединенных к нему корпусов, в том числе корпусов исправных установок, окажется близким по значению фазному напряжению сети (рис. 6.5, а). Это напряжение будет существовать длительно, поскольку поврежденная установка автоматически не отключится и ее будет трудно обнаружить среди исправных установок, чтобы отключить вручную.

Если же нулевой защитный проводник будет иметь повторное заземление, то при обрыве

его сохранится цепь тока I_3 , А, через землю (рис. 6.5, б), благодаря чему напряжение зануленных корпусов, В, находящихся в месте обрыва, снизится до

$$U_n = I_3 r_n = U_\phi r_n / (r_0 + r_n).$$

При этом, однако, корпуса установок, присоединенных к нулевому защитному проводнику до места обрыва, приобретут напряжение относительно земли, В,

$$U_0 = I_3 r_0 = U_\phi r_0 / (r_0 + r_n),$$

где r_0 — сопротивление заземления нейтрали источника тока, Ом.

В частном, наиболее благоприятном случае, когда $r_n = r_0$, все установки, присоединенные к нулевому защитному проводнику, как до места обрыва, так и после него, будут находиться под одинаковым напряжением, В,

$$U_n = U_0 = 0,5 U_\phi.$$

Во всех случаях $U_n + U_0 = U_\phi$ и, следовательно, напряжения между обоими участками нулевого защитного проводника или между корпусами, присоединенными к этим участкам, т. е. напряжения до места обрыва и после него, в сумме будут равны фазному напряжению.

Итак, повторное заземление нулевого защитного проводника значительно уменьшает опасность поражения током, возникающую в результате обрыва нулевого защитного проводника и замыкания фазы на корпус за местом обрыва, но не может устранить ее полностью, т. е. не может обеспечить тех условий безопасности, которые существовали до обрыва. В связи с этим требуется тщательная прокладка нулевого защитного проводника, чтобы исключить возможность его обрыва; в нулевом защитном проводнике запрещается ставить выключатели, предохранители и другие приборы, способные нарушить его целостность.

Таким образом, назначение повторного заземления защитного проводника — снижение напряжения относительно земли зануленных конструкций в период замыкания фазы на корпус как при исправной схеме зануления, так и в случае обрыва нулевого защитного проводника. Без повторного заземления напряжение нулевого защитного проводника может достигать недопустимых значений, поэтому такая схема зануления применяться не должна.

Согласно указаниям «Правил устройства электроустановок» повторному заземлению подвергаются лишь нулевые рабочие провода воздушных линий, которые используются одновременно и как нулевые защитные проводники. При этом повторные заземления выполняются на концах воздушных линий (или ответвлений) длиной более 200 м, а также на вводах воздушных линий в электроустановки, которые подлежат занулению.

6.3. РАСЧЕТ ЗАНУЛЕНИЯ

Расчет зануления имеет целью определить условия, при которых оно надежно выполняет возложенные на него задачи — быстро отключает поврежденную установку от сети и в то же время обеспечивает безопасность прикосновения человека к зануленному корпусу в аварийный период. В соответствии с этим зануление рассчитывают на отключающую способность, а также на безопасность прикосновения к корпусу при замыкании фазы на землю (расчет заземления нейтрали) и на корпус (расчет повторного заземления нулевого защитного проводника).

а) Расчет на отключающую способность

При замыкании фазы на зануленный корпус электроустановка автоматически отключится, если значение тока однофазного короткого замыкания (т. е. между фазным и нулевым защитным проводниками) I_k , А, удовлетворяет условию

$$I_k \geq k I_{ном} \quad (6.3)$$

где k — коэффициент кратности номинального тока $I_{ном}$, А, плавкой вставки предохранителя или уставки тока срабатывания автоматического выключателя*, А.

Значение коэффициента k принимается в зависимости от типа защиты электроустановки. Если защита осуществляется автоматическим выключателем, имеющим только электромагнитный расцепитель (отсеку), т. е. срабатывающим без выдержки времени, то k принимается в пределах 1,25–1,4.

* Номинальным током плавкой вставки называется ток, значение которого указано (выбито) непосредственно на вставке заводом-изготовителем. При этом токе плавкая вставка может работать сколько угодно долго, не перегорая и не нагреваясь выше установленной заводом-изготовителем температуры.

Если установка защищается плавкими предохранителями, время перегорания которых зависит, как известно, от тока (уменьшается с ростом тока), то в целях ускорения отключения принимают $k \geq 3$.

Если установка защищается автоматическим выключателем с обратно зависимой от тока характеристикой, подобной характеристике предохранителей, то также $k \geq 3$.

Значение I_k зависит от фазного напряжения сети U_ϕ и сопротивлений цепи, в том числе от полных сопротивлений трансформатора z_T , фазного проводника z_ϕ , нулевого защитного проводника $z_{н.з}$, внешнего индуктивного сопротивления петли (контура) фазный проводник — нулевой защитный проводник (петли фаза — нуль) X_n , а также от активных сопротивлений заземлений нейтрали обмоток источника тока (трансформатора) r_0 и повторного заземления нулевого защитного проводника r_n (рис. 6.6, а).

Поскольку r_0 и r_n , как правило, велики по сравнению с другими сопротивлениями цепи, можно не принимать во внимание параллельную ветвь, образованную ими. Тогда расчетная схема упростится (рис. 6.6, б), а выражение для тока КЗ I_k , А, в комплексной форме будет

$$I_k = \frac{U_\phi}{\underline{Z}_T/3 + \underline{Z}_\phi + \underline{Z}_{н.з} + jX_n} \quad (6.4)$$

или

$$I_k = \frac{U_\phi}{\underline{Z}_T/3 + \underline{Z}_n}, \quad (6.5)$$

где U_ϕ — фазное напряжение сети, В; $\underline{Z}_T$ — комплекс полного сопротивления обмоток трехфазного источника тока (трансформатора), Ом; $\underline{Z}_\phi = R_\phi + jX_\phi$ — комплекс полного сопротивления фазного провода, Ом; $\underline{Z}_{н.з} = R_{н.з} + jX_{н.з}$ — комплекс полного сопротивления нулевого защитного проводника, Ом; R_ϕ и $R_{н.з}$ — активные сопротивления фазного и нулевого защитного проводников, Ом; X_ϕ и $X_{н.з}$ — внутренние индуктивные сопротивления фазного и нулевого защитного проводников*, Ом; $\underline{Z}_n = \underline{Z}_\phi + \underline{Z}_{н.з} + jX_n$ — комплекс полного сопротивления петли фаза — нуль, Ом.

* См. сноску на с. 229.

сколькx сечение нулевого защитного проводника и его материал принимаются заранее из условия, чтобы полная проводимость нулевого защитного проводника была не менее 50% полной проводимости фазного провода, т. е. $1/z_{н,з} \geq 1/2z_{ф}$ или $z_{н,з} \leq 2z_{ф}$. Это условие установлено ПУЭ в предположении, что при такой проводимости I_k будет иметь требуемое значение, т. е. $I_k \geq kI_{ном}$.

В качестве нулевых защитных проводников ПУЭ рекомендуют применять неизолированные или изолированные проводники, а также различные металлические конструкции зданий, подкрановые пути, стальные трубы электропроводок, трубопроводы и т. п. Рекомендуется использовать нулевые рабочие провода одновременно и как нулевые защитные. При этом нулевые рабочие провода должны обладать достаточной проводимостью (не менее 50% проводимости фазного провода) и не должны иметь предохранителей и выключателей.

Таким образом, расчет зануления на отключающую способность является проверочным расчетом правильности выбора проводимости нулевого защитного проводника, а точнее, достаточности проводимости петли фаза — нуль.

Значение z_T , Ом, зависит от мощности трансформатора, напряжения и схемы соединения его обмоток, а также от конструктивного исполнения трансформатора. При расчетах зануления значение z_T берется из таблиц (например, табл. 6.1).

Значения $R_{ф}$ и $R_{н,з}$, Ом, для проводников из цветных металлов (медь, алюминий) определяют по известным данным: сечению s , мм², длине l , м, и материалу проводников*. При этом искомое сопротивление

$$R = \rho l / s, \quad (6.9)$$

где ρ — удельное сопротивление проводника, равное для меди 0,018, а для алюминия 0,028 Ом·мм²/м.

Если нулевой защитный проводник стальной, то его активное сопротивление $R_{н,з}$ определяется с помощью таблиц, на-

* Эти данные для фазных проводников определяются при расчете электрической сети в зависимости от мощности потребителей энергии, их размещения и т. п. При этом сечение нулевого защитного проводника $s_{н,з}$, мм², принимается из условия, что $R_{н,з} \leq 2R_{ф}$, т. е. если фазные и нулевой защитные проводники выполнены из одного металла, то $s_{н,з} \geq 0,5s_{ф}$ (где $s_{ф}$ — сечение фазного проводника, мм²), если же из разного металла, например, фазный — из меди, а нулевой защитный — из алюминия, то $s_{н,з} \geq 0,8s_{ф}$.

Таблица 6.1. Приближенные значения расчетных полных сопротивлений z_T , Ом, обмоток масляных трехфазных трансформаторов

Мощность трансформатора, кВ·А	Номинальное напряжение обмоток высшего напряжения, кВ	z_T Ом, при схеме соединения обмоток		Мощность трансформатора, кВ·А	Номинальное напряжение обмоток высшего напряжения, кВ	z_T Ом, при схеме соединения обмоток	
		y/y_H	D/y_H и y/Z_H			y/y_H	D/y_H и y/Z_H
25	6—10	3,110	0,906	400	6—10	0,195	0,056
40	6—10	1,949	0,562		20—35	0,191	—
63	6—10	1,237	0,360	630	6—10	0,129	0,042
	20—35	1,136	0,407		20—35	0,121	—
100	6—10	0,799	0,226	1000	6—10	0,081	0,027
	20—35	0,764	0,327		20—35	0,077	0,032
160	6—10	0,487	0,141	1600	6—10	0,054	0,017
	20—35	0,478	0,203		20—35	0,051	0,020
250	6—10	0,312	0,090				
	20—35	0,305	0,130				

Примечание. Данные таблицы относятся к трансформаторам с обмотками низшего напряжения 400/230 В. При низшем напряжении 230/127 В значения сопротивлений, приведенные в таблице, необходимо уменьшить в 3 раза.

пример табл. 6.2, в которой приведены значения сопротивлений 1 км (r_{ω} , Ом/км) различных стальных проводников при разной плотности тока частотой 50 Гц.

Для этого необходимо задаться профилем и сечением проводника, а также знать его длину и ожидаемое значение тока КЗ I_K , который будет проходить по этому проводнику в аварийный период. Сечением проводника задаются из расчета, чтобы плотность тока КЗ в нем была в пределах примерно 0,5—2,0 А/мм².

Пример 6.1. Определить активное сопротивление $R_{н.з}$ стальной полосы прямоугольного сечения $s = 40 \times 4$ мм длиной $l = 0,2$ км, используемой в качестве нулевого защитного проводника электродвигателя. Номинальный ток плавких вставок предохранителей, защищающих электродвигатель, $I_{ном} = 125$ А, коэффициент кратности тока $k = 3$.

Решение. Ожидаемый ток КЗ $I_K \geq kI_{ном} = 125 \cdot 3 = 375$ А, ожидаемая плотность тока в стальной полосе

$$J = I_K/s = 375/(40 \cdot 4) = 2 \text{ А/мм}^2.$$

По табл. 6.2 находим для полосы сечением 40×4 мм при $J = 2$ А/мм² $r_{\omega} = 1,54$ Ом/км.

Тогда искомое активное сопротивление полосы $R_{н.з} = r_{\omega}l = 1,54 \times 0,2 = 0,308$ Ом.

Таблица 6.2. Активные r_{ω} и внутренние индуктивные x_{ω} сопротивления стальных проводников при переменном токе (50 Гц), Ом/км

Размеры или диаметр сечения, мм	Сечение, мм ²	r_{ω}	x_{ω}	r_{ω}	x_{ω}	r_{ω}	x_{ω}	r_{ω}	x_{ω}
		при ожидаемой плотности тока в проводнике, А/мм ²							
		0,5	1,0	1,5	2,0				

Полоса прямоугольного сечения

20 × 4	80	5,24	3,14	4,20	2,52	3,48	2,09	2,97	1,78
30 × 4	120	3,66	2,20	2,91	1,75	2,38	1,43	2,04	1,22
30 × 5	150	3,38	2,03	2,56	1,54	2,08	1,25	—	—
40 × 4	160	2,80	1,68	2,24	1,34	1,81	1,09	1,54	0,92
50 × 4	200	2,28	1,37	1,79	1,07	1,45	0,87	1,24	0,74
50 × 5	250	2,10	1,26	1,60	0,96	1,28	0,77	—	—
60 × 5	300	1,77	1,06	1,34	0,8	1,08	0,65	—	—

Проводник круглого сечения

5	19,63	17,0	10,2	14,4	8,65	12,4	7,45	10,7	6,4
6	28,27	13,7	8,20	11,2	6,70	9,4	5,65	8,0	4,8
8	50,27	9,60	5,75	7,5	4,50	6,4	3,84	5,3	3,2
10	78,54	7,20	4,32	5,4	3,24	4,2	2,52	—	—
12	113,1	5,60	3,36	4,0	2,40	—	—	—	—
14	150,9	4,55	2,73	3,2	1,92	—	—	—	—
16	201,1	3,72	2,23	2,7	1,60	—	—	—	—

Значения X_{ϕ} и $X_{н.з}$ для медных и алюминиевых проводников сравнительно малы (около 0,0156 Ом/км), поэтому ими можно пренебречь. Для стальных проводников внутренние индуктивные сопротивления оказываются достаточно большими, и их определяют с помощью таблиц, например табл. 6.2. В этом случае также необходимо знать профиль и сечение проводника, его длину и ожидаемое значение тока I_k .

Пример 6.2. Определить внутреннее индуктивное сопротивление стальной полосы 40 × 4 мм длиной 0,2 км при условиях, указанных в примере 6.1.

Решение. Ожидаемые значения $I_k = 375$ А и $J = 2$ А/мм² (см. решение примера 6.1). По табл. 6.2 находим для полосы сечением 40 × 4 мм при $J = 2$ А/мм² $x_{\omega} = 0,92$ Ом/км.

Тогда искомое внутреннее индуктивное сопротивление полосы $X_{н.з} = x_{\omega} l = 0,92 \cdot 0,2 = 0,184$ Ом.

Значение X_{ϕ} , Ом, может быть определено по известной из теоретических основ электротехники формуле для индуктивно-

го сопротивления двухпроводной линии с проводами круглого сечения одинакового диаметра d , м,

$$X_n = \omega L = \omega \frac{\mu_r \mu_0}{\pi} l \ln \frac{2D}{d}, \quad (6.10)$$

где ω — угловая скорость, рад/с; L — индуктивность линии, Гн; μ_r — относительная магнитная проницаемость среды; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная постоянная, Гн/м; l — длина линии, м; D — расстояние между проводами линии, м.

Для линии длиной 1 км, проложенной в воздушной среде ($\mu_r = 1$) при частоте тока $f = 50$ Гц ($\omega = 314$ рад/с), (6.10) принимает вид, Ом/км,

$$x_n = 314 \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{\pi} 10^3 \ln \frac{2D}{d} = 0,1256 \ln \frac{2D}{d}. \quad (6.11)$$

Из этого уравнения видно, что внешнее индуктивное сопротивление зависит от расстояния между проводами D и их диаметра d . Однако поскольку d изменяется в незначительных пределах, влияние его также незначительно и, следовательно, x_n зависит в основном от D (с увеличением расстояния растет сопротивление). Поэтому в целях уменьшения внешнего индуктивного сопротивления петли фаза — нуль нулевые защитные проводники необходимо прокладывать совместно с фазными проводниками или в непосредственной близости от них.

При малых значениях D , соизмеримых с диаметром проводов d , т. е. когда фазный и нулевой проводники расположены в непосредственной близости один от другого, сопротивление x_n незначительно (не более 0,1 Ом/км) и им можно пренебречь.

Пример 6.3. Определить внешнее индуктивное сопротивление x_n петли фаза — нуль для трех случаев: 1) расстояние между фазным и нулевым проводами $D = 1$ см (это может быть, если в качестве нулевого защитного проводника используется четвертая жила, или алюминиевая оболочка кабеля, или стальная труба, в которой проложены фазные провода, и т. п.); 2) $D = 60$ см; 3) $D = 300$ см. Диаметры обоих проводов одинаковы ($d = 1,4$ см), частота тока 50 Гц.

Решение. По (6.11) находим:

$$1) \text{ при } D = 1 \text{ см } x_n = 0,1256 \times \ln \frac{2}{1,4} = 0,038 \text{ Ом/км};$$

$$2) \text{ при } D = 60 \text{ см } x_n = 0,1256 \times \ln \frac{120}{1,4} = 0,56 \text{ Ом/км};$$

$$3) \text{ при } D = 300 \text{ см } x_n = 0,1256 \times \ln \frac{600}{1,4} = 0,76 \text{ Ом/км}.$$

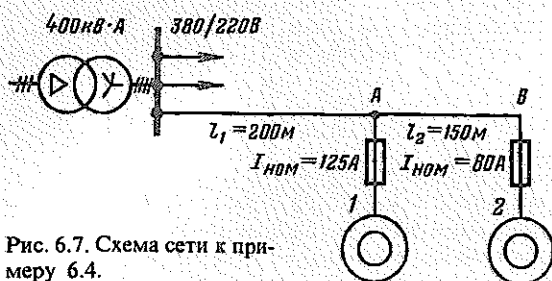


Рис. 6.7. Схема сети к примеру 6.4.

В практических расчетах обычно принимают $x_n = 0,6$ Ом/км, что соответствует расстоянию между проводами 70–100 см (примерно такие расстояния бывают на воздушных линиях электропередачи от нулевого провода до наиболее удаленного фазного).

Пример 6.4. Проверить, обеспечена ли отключающая способность зануления в сети, показанной на рис. 6.7, при нулевом защитном проводнике — стальной полосе сечением 40 × 4 мм. Линия 380/220 В с медными проводами 3 × 25 мм² питается от трансформатора 400 кВ·А, 6/0,4 кВ со схемой соединения обмоток Д/У_н. Двигатели защищены предохранителями $I_{ном} = 125$ А (двигатель 1) и $I_{ном} = 80$ А (двигатель 2). Коэффициент кратности тока $k = 3$.

Решение сводится к проверке соблюдения условия срабатывания защиты по (6.3). Для этого необходимо по (6.3) определить наименьшие допустимые по условиям срабатывания защиты I_k , затем по (6.8) — действительные I_k , которые будут проходить по петле фаза — нуль, и сравнить их.

1. Наименьшие допустимые значения I_k :

для двигателя 1 $I_k = 3 \cdot 125 = 375$ А;

для двигателя 2 $I_k = 3 \cdot 80 = 240$ А.

2. Из табл. 6.1 находим полное сопротивление трансформатора $z_T = 0,056$ Ом.

3. Определяем сопротивления фазного и нулевого защитного проводников R_ϕ , X_ϕ , $R_{н,з}$, $X_{н,з}$, X_n на участке линии $l_1 = 200$ м (см. рис. 6.7). По (6.9)

$$R_\phi = 0,018 \frac{200}{25} = 0,0144 \text{ Ом};$$

поскольку фазный провод медный, принимаем $X_\phi = 0$. Для нулевого защитного проводника значения сопротивлений возьмем из решений примеров 6.1 и 6.2, в которых исходные данные такие же, как и в настоящем примере. Следовательно, имеем $R_{н,з} = 0,308$ Ом и $X_{н,з} = 0,184$ Ом. Внешнее индуктивное сопротивление 1 км петли фаза — нуль принимаем $x_n = 0,6$ Ом/км, значит, $X_n = 0,6 \cdot 0,2 = 0,12$ Ом.

4. Определяем сопротивления фазного и нулевого защитного проводников на всей длине линии $(l_1 + l_2) = 0,25$ км: $R_\phi = 0,018 \cdot 250/25 = 0,18$ Ом; принимаем $X_\phi = 0$. Ожидаемая плотность тока в нулевом проводнике $J = 240/(40 \cdot 4) = 1,5$ А/мм²; из табл. 6.2 находим для нулевого проводника $r_\omega = 1,81$ Ом/км, $x_\omega = 1,09$ Ом/км; следовательно, $R_{н.з} = 1,81 \cdot 0,25 = 0,452$ Ом, $X_{н.з} = 1,09 \cdot 0,25 = 0,272$ Ом. Принимаем $x_n = 0,6$ Ом/км, тогда $X_n = 0,6 \cdot 0,25 = 0,15$ Ом.

5. Находим по (6.8) действительные значения токов однофазного короткого замыкания, проходящих по петле фаза — нуль:

а) при замыкании фазы на корпус двигателя 1 (рис. 6.7)

$$I_k = \frac{220}{0,056/3 + \sqrt{(0,144 + 0,308)^2 + (0,184 + 0,12)^2}} = 390 \text{ А};$$

б) при замыкании фазы на корпус двигателя 2

$$I_k = \frac{220}{0,056/3 + \sqrt{(0,18 + 0,452)^2 + (0,272 + 0,15)^2}} = 282 \text{ А}.$$

6. Вывод: поскольку действительные (вычисленные) значения токов однофазного КЗ (390 и 282 А) превышают наименьшие допустимые по условиям срабатывания защиты токи (375 и 240 А), нулевой защитный проводник выбран правильно, т. е. отключающая способность системы зануления обеспечена.

б) Расчет сопротивления заземления нейтрали

Сопротивление заземления нейтрали источника тока r_0 , Ом, должно быть таким, чтобы в случае замыкания какой-либо фазы на землю через сопротивление $r_{зм}$, Ом (см. рис. 6.3, б), напряжение, под которым окажется человек, прикоснувшийся к зануленному корпусу или к нулевому защитному проводнику непосредственно, не превышало некоторого допустимого напряжения прикосновения $U_{пр, доп}$, В, т. е.

$$U_k \alpha_1 \alpha_2 \leq U_{пр, доп}$$

где $U_k = I_3 r_0$ — напряжение зануленного корпуса (нулевого защитного проводника) относительно земли, В; I_3 — ток замыкания на землю, А; α_1 и α_2 — коэффициенты напряжения прикосновения.

Этот случай необходимо рассматривать при следующих наиболее тяжелых, но вполне реальных условиях: человек, касаясь зануленного корпуса, находится за пределами зоны растекания тока замыкания на землю, т. е. $\alpha_1 = 1$; сопротивление

растеканию ног человека незначительно по сравнению с сопротивлением тела человека R_h , и им можно пренебречь, т. е. $\alpha_2 = 1$; в сети отсутствуют повторные заземления нулевого защитного проводника (см. рис. 6.3, б).

Тогда

$$U_{\text{пр, доп}} \geq I_3 r_0 = U_{\phi} \frac{r_0}{r_0 + r_{\text{зм}}},$$

откуда

$$r_0 \leq r_{\text{зм}} \frac{U_{\text{пр, доп}}}{U_{\phi} - U_{\text{пр, доп}}}. \quad (6.12)$$

По условиям безопасности прикосновения к зануленным корпусам в период существования замыкания фазы на землю $r_{\text{зм}}$ и $U_{\text{пр, доп}}$ должны быть возможно меньшего значения. Поэтому принимаем $r_{\text{зм}} = 20$ Ом; меньшие значения мало вероятны*.

Поскольку при замыкании фазы на землю сеть от источника питания автоматически, как правило, не отключится и зануленные корпуса будут длительное время находиться под напряжением U_k (до устранения повреждения или отключения вручную сети либо поврежденной фазы от источника питания), принимаем длительно допустимое напряжение прикосновения $U_{\text{пр, доп}} = 36$ В.

При этих условиях по (6.12) получим наибольшие допустимые значения сопротивлений заземления нейтрали r_0 : 7,9 Ом для сети 220/127 В, 3,9 Ом для сети 380/220 В, 2,1 Ом для сети 660/380 В.

Надо иметь в виду, что эти предельные значения сопротивления заземления нейтрали должны выдерживаться, когда в схеме зануления отсутствуют повторные заземления нулевого защитного проводника. При наличии повторных заземлений такими сопротивлениями должны обладать все вместе взятые заземления — заземление нейтрали и повторные заземления, поскольку они включены параллельно.

Согласно требованиям ПУЭ общее сопротивление заземления нейтрали источника тока (генератора, трансформатора) и всех повторных заземлений нулевого провода отходящих воздушных линий электро-

* Для исключения опасности, возникающей при замыкании фазы на металлические конструкции с малым сопротивлением растеканию (водопровод, металлические элементы зданий и сооружений и т. п.), эти конструкции должны быть соединены с нулевым защитным проводником, т. е. занулены.

редачи* в любое время года должно быть не более 8, 4 и 2 Ом соответственно при линейных напряжениях 220, 380 и 660 В источника трехфазного тока или 127, 220 и 380 В источника однофазного тока.

При этом сопротивление заземления нейтрали, а точнее говоря, сопротивление заземлителя, расположенного в непосредственной близости от источника тока, к которому присоединяется нейтраль источника, должно быть не более 60, 30 и 15 Ом соответственно при линейных напряжениях 220, 380 и 660 В источника трехфазного тока или 127, 220 и 380 В источника однофазного тока.

Эти требования ПУЭ относятся к случаям, когда от источника питания отходят две или более воздушные линии, несущие наряду с фазными нулевой провод.

Если же отходящих воздушных линий нет или отходит всего одна линия, то независимо от количества на ней повторных заземлителей нулевого провода их сопротивления не учитываются и сопротивление заземления нейтрали источника тока (т. е. сопротивление заземлителя, расположенного в непосредственной близости от источника тока) должно быть не более 8, 4 и 2 Ом соответственно при линейных напряжениях 220, 380 и 660 В источника трехфазного тока или 127, 220 и 380 В источника однофазного тока.

При удельном электрическом сопротивлении земли ρ , превышающем 100 Ом·м, ПУЭ разрешают увеличивать указанные сопротивления до $\rho/100$, но не более чем в 10 раз.

в) Расчет сопротивления повторного заземления нулевого защитного проводника

При замыкании фазы на зануленный корпус (рис. 6.8) нулевой защитный проводник на участке за ближайшим к месту замыкания повторным заземлением (т. е. за точкой А на рис. 6.8), а также зануленное оборудование, присоединенное к этому участку проводника, оказываются под некоторым напряжением относительно земли U_n . Наибольшее значение этого напряжения U_n .

$$U_{n, \max} = I_3 r_n / n, \quad (6.13)$$

где I_3 — часть тока однофазного короткого замыкания, стекающего в землю через повторные заземления нулевого защитного проводника, А; n — количество повторных заземлений нулевого защитного проводника; r_n — сопротивление одного повторного заземления нулевого защитного проводника (принимая, что все повторные заземления обладают одинаковыми сопротивлениями), Ом.

* ПУЭ предусматривают повторные заземления лишь нулевых рабочих проводов воздушных линий, которые используются одновременно как нулевые защитные проводники (см. § 6.2, в).

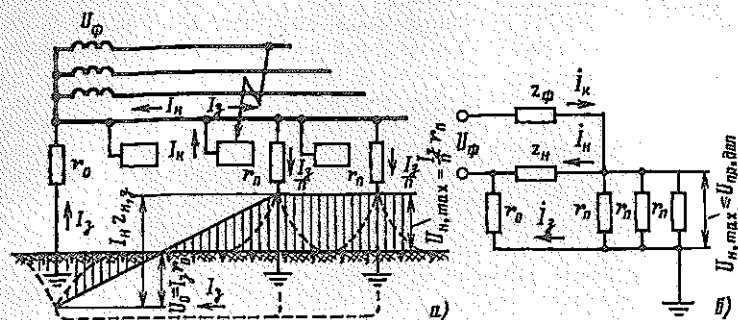


Рис. 6.8. К расчету сопротивления повторного заземления нулевого защитного проводника:

а — замыкание фазы на корпус; б — схема замещения

Это напряжение существует до момента отключения защитой поврежденной установки, т. е. кратковременно. Однако значение $U_{н, max}$ может быть достаточно большим и представлять опасность для людей даже при кратковременном его существовании. Кроме того, при отказе или задержке защиты (из-за неисправности автоматического выключателя, завышенных установок, а также при несоответствующих плавких вставках предохранителей и т. п.) это напряжение может существовать длительно. В целях устранения возникающей при этом опасности поражения людей током необходимо, чтобы $U_{н, max}$ не превышало допустимого значения напряжения прикосновения $U_{пр, доп}$. Очевидно, это условие будет выполнено при определенном значении r_n , от которого зависит также неизвестный ток I_3 (6.13).

Найдем это значение r_n , Ом. Для схемы замещения (рис. 6.8, б) можно написать:

$$U_{пр, доп} \geq U_{н, max} = \frac{I_3}{n} r_n = \frac{I_n z_{н,з}}{(r_0 + r_n/n)n},$$

откуда

$$r_n \leq nr_0 \frac{U_{пр, доп}}{I_n z_{н,з} - U_{пр, доп}}, \quad (6.14)$$

где I_n — часть тока однофазного короткого замыкания, проходящего по нулевому защитному проводнику от места замыкания фазы на корпус до нейтральной точки источника тока, А;

$z_{н,з}$ — полное сопротивление участка нулевого защитного проводника, по которому проходит ток I_n , Ом. Это сопротивление находим по формуле

$$z_{н,з} = \sqrt{R_{н,з}^2 + (X_{н,з} + 0,5X_n)^2}, \quad (6.15)$$

где $R_{н,з}$ и $X_{н,з}$ — активное и внутреннее индуктивное сопротивления нулевого защитного проводника, Ом; X_n — внешнее индуктивное сопротивление петли фаза — нуль, Ом.

Допуская некоторую ошибку, которая в итоге повышает безопасность, принимаем $I_n = I_k$. Тогда искомое сопротивление каждого повторного заземления нулевого защитного проводника

$$r_n \leq n r_0 \frac{U_{пр, доп}}{I_k z_{н,з} - U_{пр, доп}}. \quad (6.16)$$

В простейшем случае, когда $X_{н,з} = X_n = 0$, и с учетом того, что $I_k z_{н,з} = 2U_{ф}/3$, уравнение (6.16) примет вид

$$r_n \leq n r_0 \frac{U_{пр, доп}}{2U_{ф}/3 - U_{пр, доп}}. \quad (6.17)$$

Пример 6.5. На линии, рассмотренной нами в примере 6.4, повторные заземления нулевого провода выполнены в точках А и В (см. рис. 6.7). Определить наибольшие допустимые значения сопротивлений r_n , если значения их одинаковы.

Дано: $n = 2$; $r_0 = 4$ Ом; $U_{пр, доп} = 65$ В. Из примера 6.4 имеем: для участка $l_1 R_{н,з} = 0,308$ Ом; $X_{н,з} = 0,184$ Ом; $X_n = 0,12$ Ом; $I_k = 390$ А;

для участка $(l_1 + l_2) R_{н,з} = 0,452$ Ом; $X_{н,з} = 0,272$ Ом; $X_n = 0,15$ Ом; $I_k = 282$ А.

Решение. Из выражения (6.15) находим: для участка l_1

$$z_{н,з} = \sqrt{0,308^2 + (0,184 + 0,5 \cdot 0,12)^2} = 0,394 \text{ Ом};$$

для участка $(l_1 + l_2)$

$$z_{н,з} = \sqrt{0,452^2 + (0,272 + 0,5 \cdot 0,15)^2} = 0,57 \text{ Ом}.$$

Теперь по (6.16) определяем допустимое сопротивление каждого повторного заземления r_n для двух случаев:

а) при замыкании на корпус двигателя I

$$r_n \leq 2 \cdot 4 \frac{65}{390 \cdot 0,394 - 65} = 5,9 \text{ Ом};$$

б) при замыкании на корпус двигателя 2

$$r_n \leq 2 \cdot 4 \frac{65}{282 \cdot 0,57 - 65} = 5,4 \text{ Ом.}$$

Как указывалось, действующие ПУЭ предусматривают повторные заземления лишь нулевых рабочих проводов воздушных линий, которые используются одновременно и как нулевые защитные проводники. При этом в любое время года сопротивление растеканию заземлителей должно быть не более:

каждого из повторных заземлений нулевого проводника — 60, 30 и 15 Ом соответственно при линейных напряжениях 220, 380 и 660 В источника трехфазного тока или 127, 220 и 380 В источника однофазного тока;

общее всех повторных заземлений нулевого провода каждой воздушной линии — 20, 10 и 5 Ом соответственно при линейных напряжениях 220, 380 и 660 В источника трехфазного тока или 127, 220 и 380 В источника однофазного тока.

При удельном электрическом сопротивлении земли ρ , превышающем 100 Ом·м, допускается увеличивать указанные значения сопротивлений до $\rho/100$, но не более чем в 10 раз.

6.4. ВЫПОЛНЕНИЕ СИСТЕМЫ ЗАНУЛЕНИЯ

Зануление, как и защитное заземление, должно выполняться в следующих случаях:

а) в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных в отношении поражения электрическим током*, а также вне помещений при напряжениях электроустановок, превышающих 42 В переменного и 110 В постоянного тока;

б) в помещениях без повышенной опасности при напряжениях электроустановок 380 В и выше переменного и 440 В и выше постоянного тока;

в) во взрывоопасных зонах всех классов** независимо от напряжения электроустановок, в том числе при напряжении до 42 В переменного и до 110 В постоянного тока.

Занулению подлежат те же металлические нетоковедущие части, которые подлежат заземлению (см. § 5.3, в), в том числе корпуса электрических машин, трансформаторов, аппаратов,

* Классификация помещений по степени опасности поражения электрическим током приведена в § 12.1, е (с. 401).

** См. сноску на с. 196.

ветильников и т. п., металлические кабельные соединительные муфты, металлические оболочки и броня контрольных и силовых кабелей, металлические рукава и трубы электропроводки, корпуса переносных электроприемников и т. п.

Нейтраль источника тока — генератора или трансформатора — на стороне до 1000 В должна быть присоединена к заземлителю и выведена на щит управления распределительного устройства (рис. 6.9). Нейтраль присоединяется к заземлителю специальным проводником, который называется заземляющим. Обычно это полосовая сталь, сечение которой зависит от мощности генератора (трансформатора), но должно быть не меньше 24 мм² при прокладке в здании и 48 мм² при прокладке в земле.

Заземлитель, к которому присоединяется нейтраль источника тока, должен быть расположен в непосредственной близости от источника. В отдельных случаях, например во внутрицеховых подстанциях, заземлитель допускается сооружать около самой стены здания.

Эти заземлители рассчитывают и выполняют так же, как и при защитном заземлении (см. гл. 5), но расчет при этом ведется лишь по сопротивлению растеканию*. При этом в первую очередь необходимо использовать естественные заземлители — проложенные в земле водопроводные и другие металлические трубопроводы (за исключением трубопроводов горючих жидкостей, горючих или взрывоопасных газов и смесей), свинцовые оболочки кабелей, металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений, находящихся в соприкосновении с землей, и т. п.

Как правило, для заземления нейтрали трансформатора на стороне низшего напряжения (до 1000 В) заземлитель специально не сооружают, а присоединяют нейтраль к заземлителю подстанции (распределительного устройства, трансформаторного пункта и т. п.), который служит одновременно заземлителем в устройстве защитного заземления на стороне высшего напряжения (выше 1000 В). Разумеется, сопротивление растеканию общего заземлителя должно удовлетворять нормам, предъявляемым к заземлителям защитного заземления в электроустановках выше 1000 В и заземлителям нейтрали трансформатора при напряжении до 1000 В.

* Заземлитель защитного заземления в электроустановках выше 1000 В может рассчитываться либо по сопротивлению растеканию, либо по напряжению прикосновения.

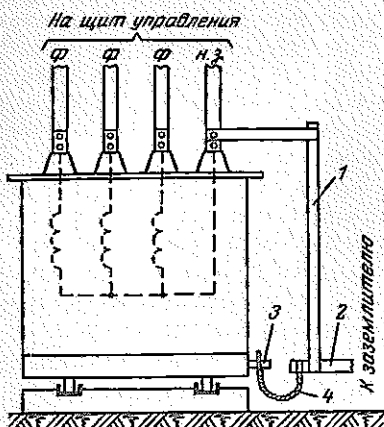


Рис. 6.9. Заземление нейтральной точки обмотки трансформатора на стороне до 1000 В

1 — заземляющий проводник; 2 — магистраль заземления; 3 — заземляющий бол на баке трансформатора; 4 — гибкая перемычка для заземления бака трансформатора

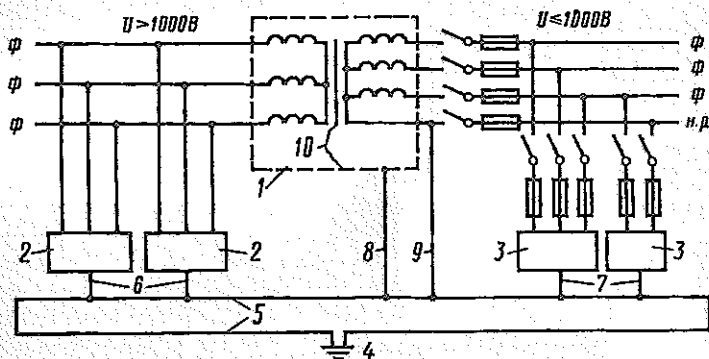


Рис. 6.10. Схема использования заземлителя системы защитного заземления на стороне высшего напряжения трансформатора выше 1000 В в качестве заземлителя нейтральной точки обмотки низшего напряжения трансформатора до 1000 В, а также использования магистрали заземления на стороне высшего напряжения в качестве магистрали зануления на стороне низшего напряжения:

1 — трансформатор; 2 — потребители энергии напряжением выше 1000 В; 3 — потребители энергии напряжением до 1000 В; 4 — заземлитель защитного заземления установок выше 1000 В (он же заземлитель нейтральной точки обмоток трансформатора до 1000 В); 5 — магистраль заземления установок выше 1000 В (она же магистраль зануления установок до 1000 В); 6 — заземляющие проводники, соединяющие корпуса потребителей энергии выше 1000 В с магистралью заземления; 7 — зануляющие проводники, соединяющие корпуса потребителей энергии до 1000 В с магистралью зануления; 8 — заземляющий проводник, соединяющий бак трансформатора с магистралью заземления; 9 — заземляющий проводник, соединяющий нейтральную точку обмотки трансформатора до 1000 В с магистралью заземления; 10 — гибкая перемычка, соединяющая магнитопровод с заземленным баком трансформатора

В этом случае и магистраль заземления стороны высшего напряжения используется одновременно как магистраль зануления на стороне до 1000 В (рис. 6.10).

Вывод заземленной нейтрали, т. е. нулевой точки обмотки источника тока, на щит управления распределительного устройства осуществляется специальным проводником, который на данном участке является одновременно рабочим и нулевым защитным, причем если фазы от генератора или трансформатора выводятся на щит шинами (или изолированными проводами), то нулевая точка должна быть выведена шиной на изоляторах (или изолированным проводом); при выводе фазы кабелем нулевая точка выводится жилой кабеля (например, четвертой жилой). Если кабель имеет алюминиевую оболочку, то она может быть использована в качестве нулевого проводника (вместо четвертой жилы кабеля).

Проводимость нулевого проводника, идущего от нулевой точки генератора или трансформатора, должна быть не меньше 50% проводимости фазных проводников.

Нулевой защитный проводник прокладывают, начиная от щита распределительного устройства, на который выведена нулевая точка источника тока, по трассе фазных проводов и возможно ближе к ним.

В качестве нулевых защитных проводников в первую очередь должны быть использованы нулевые рабочие проводники*, а там, где это невозможно, следует применять специально предназначенные для этой цели проводники. Обычно это неизолированная полосовая сталь (сечением не менее 24 мм² при прокладке в зданиях и 48 мм² при прокладке в наружных установках или в земле и толщиной не менее соответственно 3 и 4 мм) или прутковая сталь (диаметром не менее 5, 6 и 10 мм при прокладке соответственно в зданиях, наружных установках и в земле).

Изолированный нулевой защитный проводник необходимо применять в следующих случаях: 1) в местах, где применение неизолированных проводников может привести к образованию электрических пар**;

* Исключение составляют переносные электроприемники, зануление которых во всех случаях должно производиться специальным изолированным проводом.

** Имеется в виду возникновение так называемой контактной разности потенциалов между двумя различными металлами при их соприкосновении, зависящей от химического состава металлов, образующих пару, и температуры контакта.

возможно повреждение изоляции фазных проводников в результате искрения между неизолированным нулевым проводником и оболочкой или конструкцией (например, при прокладке проводов в трубах, коробах, лотках); 3) при занулении электроприемников однофазного и постоянного тока.

В качестве нулевого защитного проводника рекомендуется использовать алюминиевые оболочки кабелей, металлические конструкции зданий (фермы, колонны и т. п.) и производственных установок (подкрановые пути, шахты лифтов, подъемников, обрамления каналов и т. п.), стальные трубы электропроводок, металлические стационарные открыто проложенные трубопроводы всех назначений кроме трубопроводов горючих и взрывоопасных веществ и смесей, канализации и отопления.

Во всех случаях полная проводимость* нулевого защитного проводника должна быть не менее 50% проводимости фазного проводника.

Запрещается использовать в качестве нулевых защитных проводников металлические оболочки трубчатых проводов, несущие тросы при тросовой электропроводке, металлические оболочки изоляционных трубок, металлорукава, броню и свинцовые оболочки проводов и кабелей, нулевые рабочие проводники, идущие к переносным электроприемникам однофазного и постоянного тока**. Запрещается также использовать алюминиевые проводники для прокладки в земле в качестве нулевых защитных проводников.

На воздушных линиях электропередачи (ВЛ) нулевой защитный проводник, как правило, не прокладывают. Его роль исполняет нулевой рабочий провод, подвешиваемый на тех же опорах, что и фазные провода. Этот провод, как правило, должен быть изготовлен из того же материала, что и фазные, иметь полную проводимость не менее половины проводимости фазного провода; его следует прокладывать на таких же изоляторах, как и фазные, и располагать ниже всех фазных (и фонарного, если он имеется) проводов на опоре.

* Полная проводимость $Y_{н.з.}$ См, определяется с учетом внутреннего индуктивного сопротивления проводника $X_{н.з.}$ Ом, т. е. $Y_{н.з.} = 1/\sqrt{R_{н.з.}^2 + X_{н.з.}^2}$, где $R_{н.з.}$ — активное сопротивление проводника, Ом. Влияние $X_{н.з.}$ учитывается лишь для стальных проводников, поскольку $X_{н.з.}$ проводников из цветного металла незначительно и, следовательно, в этом случае $Y_{н.з.} = 1/R_{н.з.}$, т. е. полная проводимость равна активной проводимости и полное сопротивление $Z_{н.з.}$ Ом, равно активному сопротивлению $R_{н.з.}$ проводника.

** См. с. 252.

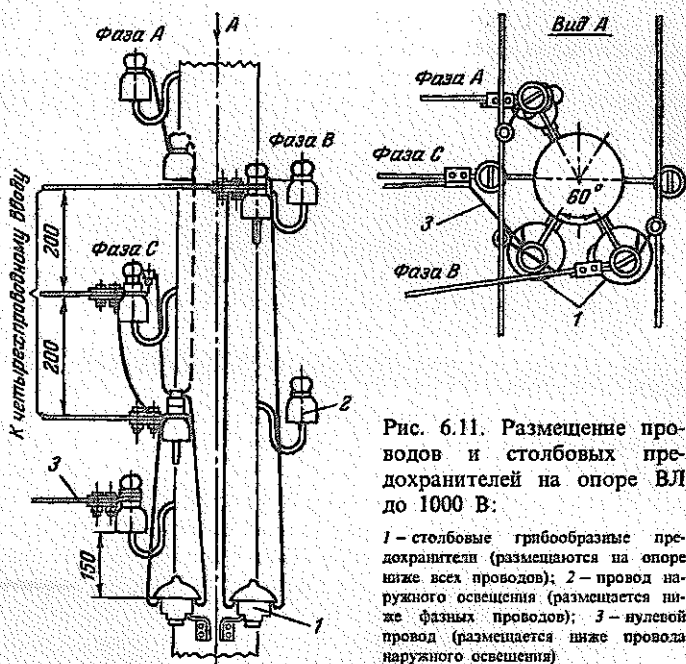


Рис. 6.11. Размещение проводов и столбовых предохранителей на опоре ВЛ до 1000 В:

1 — столбовые грибообразные предохранители (размещаются на опоре ниже всех проводов); 2 — провод наружного освещения (размещается ниже фазных проводов); 3 — нулевой провод (размещается ниже провода наружного освещения)

Ниже нулевого провода должны быть размещены устанавливаемые на опоре плавкие предохранители, а также защитные, секционирующие и другие устройства (рис. 6.11).

По условиям механической прочности на ВЛ нужно применять провода, в том числе и нулевой, сечением не менее: алюминиевые — 16, сталеалюминиевые и биметаллические — 10, стальные многопроволочные — 25 мм² и стальные однопроволочные диаметром 4 мм. Для ответвлений от ВЛ к вводам в здания допускается использовать провода несколько меньшего сечения.

Повторные заземления выполняют согласно указаниям ПУЭ лишь для нулевого рабочего провода воздушных линий, который одновременно является нулевым защитным проводником.

Повторные заземления осуществляются на концах воздушных линий или ответвлений длиной более 200 м, а также на вводах от воздушных линий к электроустановкам, которые подлежат занулению.

В качестве заземлителей для повторных заземлений нулевого провода должны быть использованы в первую очередь естественные заземлители, например подземные части опор, металлические и железобетонные конструкции сооружений, находящиеся в соприкосновении с землей, и т. п., а также заземлители, предназначенные для защиты от грозových перенапряжений. Если естественные заземлители отсутствуют или если сопротивление их превышает нормируемое значение, сооружают искусственные заземлители.

На воздушных линиях постоянного тока для повторных заземлений нулевого провода должны быть выполнены отдельные искусственные заземлители; рекомендуется использовать для этой цели заземлители, предназначенные для защиты от грозových перенапряжений. В обоих случаях заземлители не должны иметь металлических соединений с подземными трубопроводами во избежание их усиленной коррозии.

Заземляющие проводники для повторных заземлений нулевого провода, т. е. проводники, соединяющие нулевой провод с заземлителем, выбирают из условия длительного прохождения тока значением не менее 25 А. Они могут быть стальными, алюминиевыми и медными.

Зануление корпусов переносных электроприемников осуществляется специальной жилой (третья жила служит для электроприемников однофазного и постоянного тока, четвертая — для электроприемников трехфазного тока), находящейся в одной оболочке с фазными жилами переносного провода и соединяющей корпус электроприемника с нулевым защитным проводником линии (рис. 6.12, а). Присоединять корпуса переносных электроприемников к нулевому рабочему проводу линии недопустимо, потому что в случае его обрыва (перегорания предо-

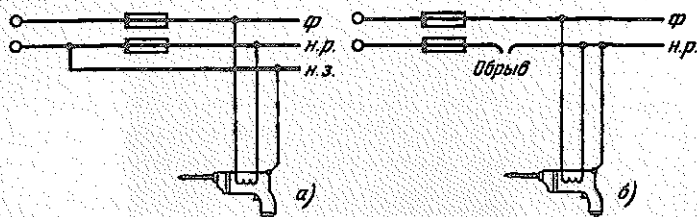


Рис. 6.12. Зануление переносного однофазного электроприемника, включенного между фазным и нулевым рабочим проводами:

а — правильно; б — неправильно

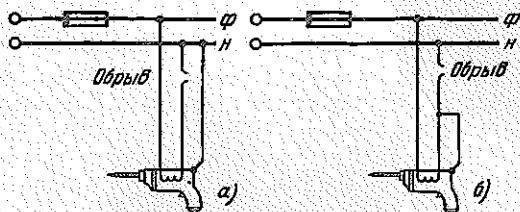


Рис. 6.13. Зануление переносного однофазного электроприемника, включенного между фазным проводом и нулевым рабочим, являющимся одновременно нулевым защитным проводником:

а — правильно; *б* — неправильно

хранителя) все корпуса, присоединенные к нему, окажутся под фазным напряжением относительно земли (рис. 6.12, б).

Если нулевой рабочий провод линии является одновременно нулевым защитным (поэтому в нем нет предохранителей и выключателей), то и в этом случае присоединение к нему корпусов электроприемников должно выполняться отдельным проводником (рис. 6.13, а). Нельзя использовать для этой цели нулевой рабочий провод, идущий в электроприемник, так как при случайном его обрыве корпус окажется под фазным напряжением (рис. 6.13, б).

В сети, где применяется зануление, нельзя заземлять корпус приемника тока, не присоединив его к нулевому защитному проводнику. Объясняется это тем, что в случае замыкания фазы на заземленный, но не присоединенный к нулевому защитному проводнику корпус (рис. 6.14) образуется цепь тока I_3 через сопротивление заземления этого корпуса r_3 и сопротивление заземления нейтрали источника тока r_0 .

В результате между этим корпусом и землей возникает напряжение, В,

$$U_k = I_3 r_3.$$

Одновременно возникает напряжение, В, между нулевым защитным проводником и землей, т. е. между всеми корпусами, присоединенными к нулевому защитному проводнику, и землей:

$$U_0 = I_3 r_0.$$

При равенстве сопротивлений заземлений, т. е. при $r_3 = r_0$, напряжения U_k и U_0 будут одинаковыми и равными половине

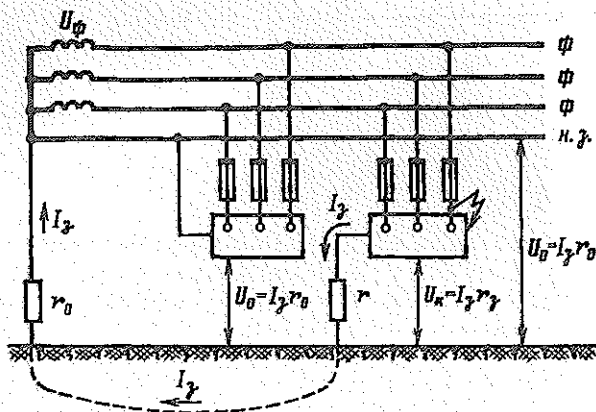


Рис. 6.14. Схема, иллюстрирующая недопустимость заземления и зануления разных корпусов электрооборудования в одной сети

фазного напряжения. Например, в сети 380/220 В напряжение между каждым корпусом и землей будет равно 110 В.

Такое положение, безусловно, опасно, тем более что указанные напряжения могут существовать длительно, пока поврежденная установка не будет отключена от сети вручную, ибо защита этой установки (предохранители, автоматы) из-за малого значения тока I_3 , как правило, не способна отключить ее автоматически. При этом отыскание поврежденной установки (для отключения ее вручную) среди множества исправных оказывается довольно трудным делом, поскольку корпуса всех установок находятся под напряжением.

Следует отметить, что *одновременное зануление и заземление одного и того же корпуса, а точнее заземление зануленного корпуса, не только не опасно, а наоборот улучшает условия безопасности*, так как создает дополнительное заземление нулевого защитного проводника.

6.5. КОНТРОЛЬ ИСПРАВНОСТИ ЗАНУЛЕНИЯ

а) Общие сведения

По окончании монтажных и ремонтных работ, а также в процессе эксплуатации системы зануления необходимо проверять соответствие зануления требованиям «Правил устройства электроустановок». Для этого следует: измерять сопротивления заземления нейтрали и по-

вторных заземлений нулевого проводника; проверять состояние элементов заземляющих устройств, целостность зануляющей сети, в том числе наличие цепи между нулевым защитным проводником и зануленным оборудованием; измерять сопротивление петли фаза — нуль. Согласно указаниям ГОСТ 12.1.038-82 [4] необходимо также измерять напряжение прикосновения и ток, протекающий через тело человека, в порядке, аналогичном описанному в § 5.5, в.

б) Измерение сопротивления петли фаза — нуль

Измерение сопротивления петли фаза — нуль должно производиться на электроприемниках наиболее мощных, а также наиболее удаленных от источника тока, но не менее чем на 10 % их общего количества. Измерение имеет целью определить истинное значение полного сопротивления петли фаза — нуль; оно должно быть таким, чтобы ток однофазного КЗ был достаточным для отключения поврежденной установки от сети.

На рис. 6.15, а показана одна из схем измерения сопротивления петли фаза — нуль с помощью вольтметра и амперметра. Эта схема требует отключения испытуемой установки от сети.

Для измерения необходимы однофазный понижающий трансформатор напряжением 42 или 12 В, реостат, амперметр, вольтметр и провода.

Один вывод вторичной обмотки понижающего трансформатора присоединяют к нулевому защитному проводнику возможно ближе к силовому трансформатору (чтобы учесть сопротивление нулевого проводника на всем участке, где проходит испытательный ток), другой — к одному из фазных проводников, идущих к электроприемнику, после рубильника Р2, который при этом должен быть отключен. Фазный проводник и корпус электроприемника соединяют надежной перемычкой, имитирующей замыкание фазы на корпус.

После включения рубильника Р2 реостатом в цепи устанавливают некоторый ток, достаточный для отсчета показаний вольтметра $U_{изм}$, В, и амперметра $I_{изм}$, А. Частное от деления этих показаний является полным сопротивлением петли фаза — нуль, Ом:

$$z_n = U_{изм} / I_{изм} \quad (6.18)$$

Следует отметить, что при измерении по схеме рис. 6.15, а не учитывается сопротивление фазного проводника на участке АВ.

Зато в результат измерения входит сопротивление вспомогательных проводов, соединяющих вторичную обмотку понижающего трансформатора с сетью.

При большом расстоянии между точками А и В эта ошибка может быть заметной. В таких случаях целесообразно применять схему, приведенную на рис. 6.15, б, при которой, однако, требуется отключение всей сети от силового трансформатора.

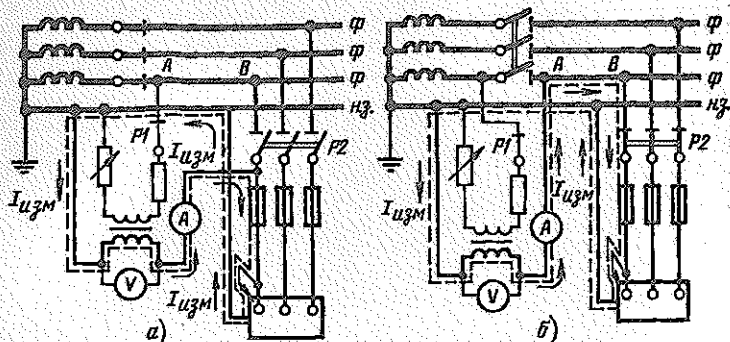


Рис. 6.15. Схема измерения сопротивления петли фаза – нуль:

а – с отключением испытуемого электроприемника от сети; б – с отключением всей сети

Обе приведенные схемы позволяют также проверять значение тока, вызывающего перегорание предохранителя или срабатывание автоматического выключателя.

Кроме рассмотренных схем существуют схемы для измерения полного сопротивления петли фаза – нуль без отключения оборудования.

Глава 7

ЗАЩИТНОЕ ОТКЛЮЧЕНИЕ

7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Назначение. Защитное отключение – быстродействующая защита, обеспечивающая автоматическое отключение электроустановки при возникновении в ней опасности поражения человека током. Такая опасность может возникнуть, в частности, при замыкании фазы на корпус, снижении сопротивления изоляции сети ниже определенного предела и, наконец, в случае прикосновения человека непосредственно к токоведущей части, находящейся под напряжением.

Во всех случаях опасность поражения обусловлена напряжением прикосновения $U_{пр}$, В, или, иначе говоря, током, проходящим через человека, I_h , А. Как известно,

$$U_{пр} = I_h R_h,$$

где R_h – сопротивление тела человека, Ом.

Таким образом, если при прикосновении человека к корпусу оборудования или фазе сети напряжение прикосновения (или ток через человека) превысит длительно допустимое значение, то возникнет реальная угроза поражения человека током и мерой защиты в этом случае может быть, в частности, быстрый разрыв цепи тока через человека, т. е. отключение соответствующего участка сети. Для выполнения этой задачи и предназначено защитное отключение.

Основными элементами устройства защитного отключения (УЗО) являются прибор защитного отключения и исполнительный орган — автоматический выключатель.

Прибор защитного отключения — совокупность отдельных элементов, которые воспринимают входную величину, реагируют на ее изменения и при заданном ее значении дают сигнал на отключение выключателя. Этими элементами являются: 1) датчик — входное звено устройства, воспринимающее воздействие извне и осуществляющее преобразование этого воздействия (т. е. входной величины) в соответствующий сигнал; датчиком служат, как правило, реле соответствующего типа, а иногда измерительные трансформаторы, вход усилителя, фильтры тока и напряжения нулевой последовательности и т. п.; 2) усилитель, предназначенный для усиления сигнала датчика, если он оказывается недостаточно мощным; 3) цепи контроля, служащие для периодической проверки исправности защитного отключения; 4) вспомогательные элементы — сигнальные лампы и измерительные приборы (например, омметр), характеризующие состояние электроустановки.

Исполнительный орган — автоматический выключатель, обеспечивающий отключение соответствующего участка электроустановки (электрической сети) при получении сигнала от прибора защитного отключения.

В сетях до 1000 В в качестве выключателей, удовлетворяющих требованиям защитного отключения, успешно применяются контакторы, т. е. выключатели, снабженные электромагнитным управлением в виде удерживающей катушки; магнитные пускатели — трехфазные контакторы переменного тока, снабженные тепловыми реле для автоматического отключения при перегрузках потребителей; автоматические выключатели — наиболее сложные отключающие аппараты до 1000 В, в том числе быстродействующие автоматы; специальные выключатели, предназначенные для работы в устройствах защитного отключения.

Основные требования, которым должны удовлетворять УЗО

- 1) высокая чувствительность;
- 2) малое время отключения;
- 3) селективность действия;
- 4) способность осуществлять самоконтроль исправности;
- 5) достаточная надежность.

Чувствительность УЗО — их способность реагировать на малые изменения входной величины — оказывает непосредственное влияние на степень безопасности.

Высокочувствительные устройства позволяют задавать уставку, обеспечивающую безопасность прикосновения человека к фазе. Однако они, как правило, более сложны и дороги. Под уставкой в данном случае понимается наперед установленное значение входного сигнала, при котором УЗО срабатывает.

Время отключения — интервал времени с момента возникновения аварийной ситуации до момента прекращения тока во всех полюсах выключателя, равный времени действия прибора УЗО t_n , с, и времени действия выключателя t_B , с;

$$t_{\text{откл}} = t_n + t_B.$$

Время действия прибора УЗО t_n — период с момента возникновения аварийной ситуации до подачи импульса на отключение выключателя — зависит от конструкции и свойств датчика и других элементов прибора. В частности, при наличии контактов и подвижных частей t_n значительно увеличивается. Как правило, значение t_n находится в пределах 0,02—0,05 с.

Время действия выключателя t_B , а точнее — полное время отключения выключателя, в свою очередь имеет две составляющие: собственное время отключения $t_{c,B}$, с, т. е. промежуток времени с момента подачи отключающего импульса на отключающую катушку до начала расхождения контактов выключателя, и время горения дуги между контактами выключателя t_r , с. Следовательно,

$$t_B = t_{c,B} + t_r.$$

У выключателей до 1000 В $t_{c,B}$ обычно значительно больше t_r . Например, у автоматов $t_{c,B} = 0,2 \div 0,5$ с, а $t_r \approx 0,05$ с. Однако у быстродействующих автоматов $t_{c,B} = 0,01 \div 0,02$ с и соответственно полное время отключения $t_B = 0,06 \div 0,07$ с.

Чем меньше время отключения, тем выше степень безопасности при одних и тех же условиях, так как опасность воздействия тока снижается с уменьшением времени его прохождения через тело человека (см. § 1.4).

Существующие конструкции приборов и аппаратов, применяемых в схемах защитного отключения, обеспечивают время отключения $t_{откл} = 0,05 \div 0,2$ с.

Селективность — избирательность действия УЗО — выражается в способности отключать от сети лишь поврежденный объект, т. е. объект, в котором возникла опасность поражения человека током. Это очень важное свойство защитного отключения, поскольку из-за неселективности вместе с поврежденными объектами может отключаться исправное оборудование. К сожалению, селективностью обладают лишь некоторые схемы защитного отключения.

Самоконтроль — способность реагировать на неисправности в собственной схеме путем отключения защищаемого объекта — является желательным для всех типов защитно-отключающих устройств. Однако этим свойством обладают далеко не все схемы.

Самоконтроль исправности необходим для схем УЗО, которые применяются взамен заземления или зануления, ибо в противном случае при отсутствии заземления (зануления) и неисправности УЗО замыкание на корпус останется неотключенным и создаст реальную опасность поражения током.

Надежность УЗО характеризуется постоянной готовностью к действию, способностью срабатывать во всех случаях нарушения нормального режима работы защищаемого объекта с возникновением опасности поражения током и, наконец, способностью не реагировать на все другие случаи нарушения режима.

Надежность должна быть достаточно высокой, так как отказы УЗО могут создавать опасные для людей условия в смысле поражения током (например, устройство не сработало при замыкании фазы на незаземленный корпус) или сопровождаться беспричинными отключениями работающего оборудования.

Область применения устройств защитного отключения практически не ограничена: они могут применяться в сетях любого напряжения и с любым режимом нейтрали. Тем не менее наибольшее распространение УЗО получили в сетях до 1000 В, где они обеспечивают безопасность при замыкании фазы на корпус, снижении сопротивления изоляции сети относительно земли ниже некоторого предела, прикосновении человека к токоведущей части, находящейся под напряжением, и т. п. Однако эти свойства зависят от типа УЗО и параметров электроустановки.

Защитное отключение является весьма рациональной мерой защиты в любых электроустановках, но особенно когда по каким-либо причинам трудно осуществить эффективное заземление или зануление, а также когда высока вероятность случайного прикосновения людей к токоведущим частям. Такие условия чаще всего возникают в передвижных электроустановках, а также в стационарных, расположенных в районах с плохо проводящими грунтами, испытательных устройствах и т. п.

Защитное отключение незаменимо для ручных электрических машин (электроинструментов), которые в огромном количестве применяются во всех отраслях народного хозяйства.

Типы устройств защитного отключения. Возникновение условий, опасных в отношении поражения человека током, обуславливается изменением проводимости фаз сети относительно земли. Как результат этого изменения могут изменяться и другие электрические параметры установки, например потенциал корпуса*; ток, стекающий в землю; напряжение фаз относительно земли; напряжение нулевой последовательности и др. Очевидно, что степень опасности поражения человека током, т. е. значение напряжения прикосновения (или тока, проходящего через человека), находится в определенной зависимости от этих параметров. Следовательно, любой из этих параметров может служить входной величиной для устройства защитного отключения.

Указанные возможности используются в практике создания УЗО, которые в зависимости от принятых для них входных величин условно делятся на следующие типы, реагирующие на:

- 1) потенциал корпуса;
- 2) ток замыкания на землю;
- 3) напряжение нулевой последовательности;
- 4) ток нулевой последовательности;
- 5) напряжение фазы относительно земли;
- 6) оперативный ток.

Есть и комбинированные устройства, которые реагируют не на одну, а на несколько входных величин.

Ниже рассматриваются некоторые из перечисленных типов устройств защитного отключения.

* Под потенциалом корпуса в данном случае понимается величина, равноценная напряжению относительно земли, т. е. точки земли, потенциал которой может быть условно принят равным нулю.

7.2. УСТРОЙСТВА, РЕАГИРУЮЩИЕ НА ПОТЕНЦИАЛ КОРПУСА

Назначение УЗО рассматриваемого типа — устранение опасности поражения людей током при возникновении на заземленном или зануленном корпусе повышенного потенциала. Обычно эти устройства являются дополнительной мерой защиты к заземлению или занулению.

Принцип действия — быстрое отключение от сети поврежденного оборудования, если возникший на его корпусе потенциал φ_k , В, окажется выше потенциала $\varphi_{k, \text{доп}}$, В, при котором напряжение прикосновения к корпусу имеет наибольшее длительно допустимое значение $U_{\text{пр, доп}}$, В.

Принципиальная схема одного из таких устройств показана на рис. 7.1. Датчиком в этой схеме служит реле максимального напряжения, включенное между защищаемым корпусом и вспомогательным заземлителем 2 непосредственно или через трансформатор напряжения.

Электроды вспомогательного заземлителя должны быть размещены вне зоны растекания токов, стекающих с заземлителя 1 корпуса или заземлителей нулевого проводника сети, т. е. на расстоянии более 20 м.

При замыкании фазы на заземленный (или зануленный) корпус вначале проявляется защитное свойство заземления (или зануления), снижающее потенциал корпуса до некоторого предела

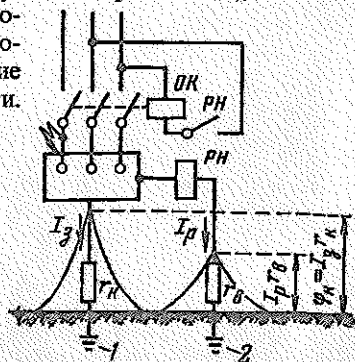
$$\varphi_k = I_3 r_k,$$

где r_k — сопротивление заземления (а при занулении — сопротивление повторных заземлений нулевого проводника), Ом.

Если φ_k превысит $\varphi_{k, \text{доп}}$, срабатывает устройство защитного отключения, т. е. произойдет отключение поврежденной установки от сети.

Рис. 7.1. Принципиальная схема устройства защитного отключения, реагирующего на потенциал корпуса:

r_k — сопротивление защитного заземления (корпуса); r_2 — сопротивление вспомогательного заземления; I_3 — ток, стекающий в землю; РН — реле максимального напряжения; ОК — отключающая катушка автоматического выключателя (контактора, автомата, магнитного пускателя и т. п.)



Реле максимального напряжения можно включать также между корпусом электроприемника и нулевым проводником, как показано на рис. 7.2. При замыкании фазы на корпус реле сработает, вызвав перегорание предохранителя, т. е. отключение потребителя от сети. Эта схема напоминает систему зануления, однако в рассматриваемом случае благодаря наличию реле провод, который является как бы зануляющим, имеет незначительное сечение, в то время как ток короткого замыкания, вызывающий перегорание предохранителя, достигает большого значения.

Область применения. Рассматриваемый тип защитного отключения может применяться в сетях всех напряжений независимо от режима нейтрали, когда система защитного заземления или зануления малонадежна или недостаточно эффективна. Однако с учетом неселективности работы УЗО этого типа его использование ограничивается установками с индивидуальными заземлениями (например, передвижные электроустановки).

Уставка. В данном случае уставкой, обеспечивающей безопасность прикосновения к корпусу поврежденной установки, является потенциал $\Phi_{к, доп}$, при котором напряжение прикосновения не превышает допустимого $U_{пр, доп}$:

$$\Phi_{уст} \leq \Phi_{к, доп} \quad (7.1)$$

Выразим $\Phi_{уст}$ через известное (заданное) $U_{пр, доп}$. С учетом того что

$$U_{пр, доп} = \Phi_{к, доп} \alpha_1 \alpha_2, \quad (7.2)$$

выражение для уставки имеет вид

$$\Phi_{уст} \leq U_{пр, доп} / \alpha_1 \alpha_2, \quad (7.3)$$

где α_1 и α_2 — коэффициенты напряжения прикосновения.

Если в период прикосновения к корпусу человек может стоять вне поля растекания тока с защитного заземления и при этом сопротивление основания, на котором он стоит, невелико, то необходимо принять $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$.

В таком случае уставка $\Phi_{уст} \leq U_{пр, доп}$.

Напряжение срабатывания реле $U_{ср}$ должно быть меньше $U_{пр, доп}$, поскольку потенциал корпуса $\Phi_{к, доп}$ оказывается приложенным не только к сопротивлению обмотки реле Z_p , но и к последовательно соединенному с ним сопротивлению вспомогательного заземления r_b (рис. 7.1):

$$\Phi_{к, доп} = I_p (Z_p + r_b).$$

Заменив в этом уравнении $\Phi_{к, доп}$ на $U_{пр, доп} / \alpha_1 \alpha_2$ и выразив ток реле I через $U_{ср} / Z_p$, получим выражение для требующе-

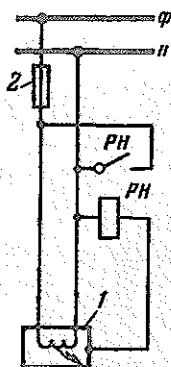


Рис. 7.2

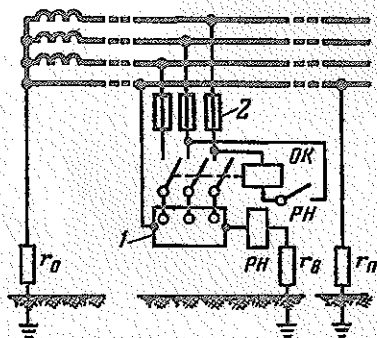


Рис. 7.3

Рис. 7.2. Схема УЗО, реагирующего на потенциал корпуса. РН включено между корпусом и нулевым проводником:

1 — корпус электроприемника; 2 — предохранитель

Рис. 7.3. К примеру 7.1.:

1 — корпус электроприемника; 2 — предохранители; r_ϕ — сопротивление заземления нейтрали; r_π — сопротивление вспомогательного заземления; r_π — сопротивление повторного заземления нулевого защитного проводника

гося напряжения срабатывания реле в комплексной форме:

$$\dot{U}_{ср} = \dot{U}_{пр. доп} \frac{Z_p}{(Z_p + r_\pi)} \alpha_1 \alpha_2,$$

или в действительной форме

$$U_{ср} = U_{пр. доп} \frac{\sqrt{R_p^2 + X_p^2}}{\alpha_1 \alpha_2 \sqrt{(R_p + r_\pi)^2 + X_p^2}}, \quad (7.4)$$

где R_p и X_p — активное и индуктивное сопротивления обмотки реле, Ом.

Это уравнение при известных параметрах реле, а также $U_{пр. доп}$, α_1 и α_2 позволяет определить наибольшее значение r_π , при котором обеспечивается срабатывание защиты.

Достоинство УЗО, реагирующих на потенциал корпуса, — исключительная простота их схем.

Недостатками их являются необходимость иметь вспомогательное заземление, неселективность отключения в случае присоединения нескольких корпусов к одному заземлителю, отсутствие самоконтроля исправности и, наконец, непостоянство уставки при изменениях сопротивления r_π .

Пример 7.1. В конце линии 380/220 В имеется зануленный потребитель энергии (например, электродвигатель). Вследствие удаленности его от питающего трансформатора возможны случаи отказа зануления. Вместе с тем по условиям безопасности требуется безусловное отключение установки при замыкании фазы на корпус, причем напряжение прикосновения $U_{\text{пр, доп}}$ не должно превышать длительно 60 В. Для выполнения этих условий снабжаем установку устройством защитного отключения, реагирующим на потенциал корпуса (рис. 7.3). При этом используем реле напряжения, у которого напряжение срабатывания $U_{\text{ср}} = 30$ В, активное сопротивление обмотки $R_p = 400$ Ом, индуктивное $X_p = 200$ Ом.

Принимаем, что человек, касающийся корпуса, стоит на сырой земле вне зоны растекания тока с заземлителей, т. е. считаем, что $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$.

Решение. Подставляем в (7.4) соответствующие значения:

$$30 = 60 \frac{\sqrt{400^2 + 200^2}}{\sqrt{(400 + r_b)^2 + 200^2}},$$

откуда находим сопротивление вспомогательного заземления $r_b = 470$ Ом, при котором УЗО будет срабатывать, если напряжение прикосновения достигнет 60 В.

7.3. УСТРОЙСТВА, РЕАГИРУЮЩИЕ НА ТОК ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Назначение — устранение опасности поражения током людей при прикосновении к заземленному корпусу в период замыкания на него фазы.

Принцип действия — быстрое отключение поврежденного оборудования от сети в случае, если ток, проходящий через проводник, заземляющий корпус этого оборудования, превысит некоторый предел $I_{\text{з, доп}}$, А, при котором напряжение прикосновения имеет наибольшее длительно допустимое значение $U_{\text{пр, доп}}$, В.

Принципиальные схемы приведены на рис. 7.4. Датчиком служит токовое реле РТ, обладающее малым сопротивлением и включенное непосредственно в рассечку заземляющего провода (рис. 7.4, а) или во вторичную обмотку трансформатора тока (рис. 7.4, б), который применяется при большом токе замыкания на землю, когда трудно подобрать реле. Удобен насыщающийся трансформатор тока, при котором обмотка реле не перегружается, когда ток в первичной обмотке трансформатора больше номинального значения.

При замыкании фазы на корпус ток, стекающий в землю, если он превышает уставку, вызывает срабатывание реле, т. е. отключение установки от сети.

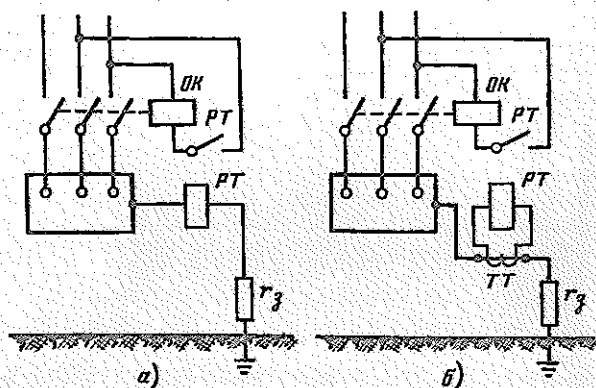


Рис. 7.4. Принципиальная схема УЗО, реагирующего на ток замыкания на землю:

ТТ — трансформатор тока; ОК — отключающая катушка автоматического выключателя

К схемам рассматриваемого типа относятся такие схемы, применяемые в системе зануления, когда токовое реле включается в рассечку зануляющих проводников и срабатывает под действием тока однофазного короткого замыкания (рис. 7.5). Такие устройства отличаются четкостью срабатывания.

Область применения рассматриваемых УЗО ограничивается установками, корпуса которых изолированы от земли, а следовательно, и один от другого, т. е. установками, между которыми нет электрических связей помимо связи через реле. В этом случае защита работает селективно. Такими установками являются ручной электрифицированный инструмент, передвижные установки и т. п. Напряжение питающей сети и режим ее нейтрали могут быть любыми.

Выбор уставки. Условие безопасного прикосновения к корпусу оборудования в период замыкания на него фазы выражается следующей зависимостью:

$$U_{\text{пр, доп}} \geq I_{3, \text{ доп}} |Z_p + r_3| \alpha_1 \alpha_2,$$

где r_3 — сопротивление заземления корпуса, Ом; Z_p — комплексное сопротивление обмоток реле, Ом.

Уставкой является ток $I_{3, \text{ доп}}$, проходящий через заземляющий проводник и определяющий приведенные условия безопасности, т. е.

$$I_{\text{уст}} = I_{3, \text{ доп}}$$

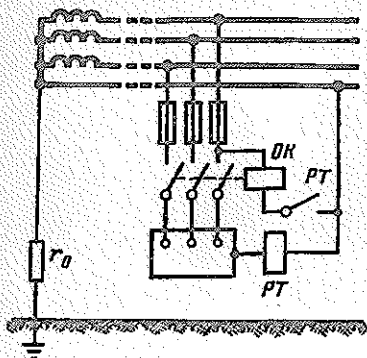


Рис. 7.5. Принципиальная схема УЗО, реагирующего на ток однофазного короткого замыкания. Реле тока включено в рассечку зануляющего проводника

или

$$I_{уст} = U_{пр, доп} / |\underline{Z}_p + r_3| \alpha_1 \alpha_2. \quad (7.5)$$

При условии, что $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, получим, А,

$$I_{уст} = U_{пр, доп} / |\underline{Z}_p + r_3|. \quad (7.6)$$

Ток срабатывания реле $I_{ср}$, А, должен быть равен току уставки $I_{уст}$ или $I_{з, доп}$, поскольку ток $I_{з, доп}$ проходит лишь через реле независимо от того, соединен корпус с землей только через заземляющий проводник или он имеет и другое соединение (через опорную поверхность и т. п.).

Таким образом,

$$I_{ср} = I_{уст}.$$

Достоинствами рассматриваемых УЗО являются простота конструкции, относительно высокие надежность и четкость срабатывания, особенно при больших токах, проходящих через реле, и возможность обеспечить селективность отключения (при отсутствии металлической связи между защищаемыми корпусами).

Недостаток указанных устройств заключается в том, что в случае обрыва заземляющего проводника УЗО перестает работать. Вместе с тем, поскольку корпуса электроприемников кроме связи через проводники системы заземления или зануления имеют, как правило, связь через металлические конструкции зданий и сооружений, селективность работы этих устройств не может быть обеспечена. Иначе говоря, при наличии металлической связи между защищаемыми корпусами УЗО работает неселективно. И, наконец, недостатком является отсутствие самоконтроля исправности.

7.4. УСТРОЙСТВА, РЕАГИРУЮЩИЕ НА НАПРЯЖЕНИЕ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Назначение этих УЗО – устранение опасности поражения током, возникающей при глухом замыкании одной или двух фаз на землю, в том числе при замыкании фазы на заземленный корпус. Эти схемы, как правило, не отключают сеть при замыкании фазы на землю через большое сопротивление, а следовательно, и при прикосновении человека к токоведущей части.

Принцип действия – быстрое отключение сети от источника питания при возникновении напряжения нулевой последовательности, обусловленной несимметрией полных проводимостей проводов сети относительно земли выше некоторого предела.

Принципиальная схема устройства показана на рис. 7.6. Датчиком служит фильтр напряжения нулевой последовательности, состоящей из трех конденсаторов, соединенных в звезду. Для этой цели могут применяться и другие фильтры (рис. 7.7).

Реле напряжения, включенное между нулевой точкой фильтра и землей, срабатывает, когда напряжение нулевой последовательности, т. е. напряжение между нейтральной точкой источника тока и землей U_0 , достигает значения, при котором

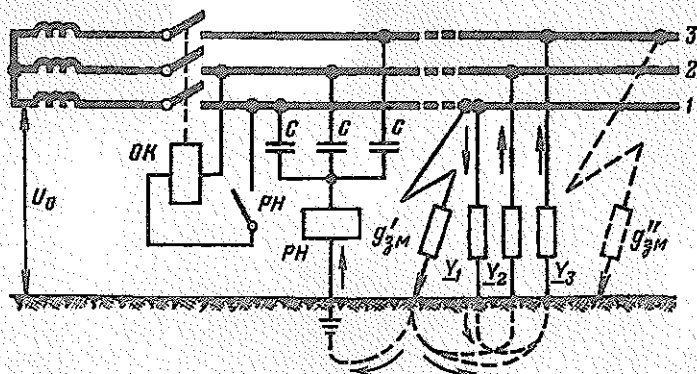


Рис. 7.6. Принципиальная схема УЗО, реагирующего на напряжение нулевой последовательности, с фильтром из трех конденсаторов:

C – конденсаторы; $РН$ – реле напряжения; $ОК$ – отключающая катушка автоматического выключателя; Y_1, Y_2, Y_3 – комплексы проводимостей фаз относительно земли; g'_{3M}, g''_{3M} – проводимости замыкания на землю фаз 1 и 3 соответственно

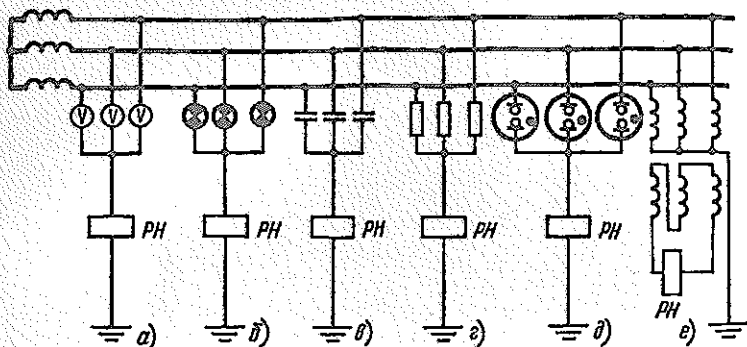


Рис. 7.7. Некоторые фильтры напряжения нулевой последовательности:

a — вольтметры; b — лампы накаливания; c — конденсаторы; d — резисторы; e — газонаполненные лампы; e — трансформатор напряжения

напряжение на зажимах реле становится равным напряжению его срабатывания $U_{ср}$ или превышает его. При этом происходит отключение сети от источника.

Область применения УЗО, реагирующих на напряжение нулевой последовательности, — трехфазные трехпроводные сети преимущественно до 1000 В малой протяженности с изолированной нейтралью, обладающие высоким сопротивлением изоляции и небольшой емкостью относительно земли.

Выбор уставки сводится к определению значения U_0 , В, при котором должно произойти отключение сети. При этом U_0 должно определяться для наиболее тяжелого случая, каким является двойное замыкание на землю, так как в этом случае U_0 меньше, чем при замыкании на землю одной фазы.

Напряжение нулевой последовательности в трехфазной симметричной системе, В,

$$U_0 = U_{\phi} \frac{Y_1 + Y_2 a^2 + Y_3 a}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_0}, \quad (7.7)$$

где U_{ϕ} — фазное напряжение сети, В; Y_1 , Y_2 , Y_3 — комплексы полных проводимостей фаз относительно земли, См; Y_0 — комплекс полной проводимости нулевой последовательности фильтра (включая обмотку реле), См; a — фазовый оператор.

Если на землю замкнулась одна из фаз, например фаза 1 (рис. 7.6), а проводимость замыкания провода на землю равна $g'_{зм}$, то в (7.7) вместо $\underline{Y}_1$ надо поставить $\underline{Y}_1 + g'_{зм}$. Тогда при одинаковых емкостях и сопротивлениях изоляции фаз относительно земли, т. е. при $\underline{Y}_1 = \underline{Y}_2 = \underline{Y}_3 = \underline{Y}$, получим

$$\dot{U}_0 = U_\phi g'_{зм} / (3\underline{Y} + \underline{Y}_0 + g'_{зм}). \quad (7.8)$$

При большом значении $g'_{зм}$ (например, фаза замкнулась на заземленный корпус), когда можно считать, что $g'_{зм} \gg (3\underline{Y} + \underline{Y}_0)$, напряжение нулевой последовательности будет близким к фазному напряжению сети:

$$U_0 \approx U_\phi.$$

Если на землю замкнулись две фазы, например 1 и 3 (рис. 7.6), и проводимости замыканий соответственно равны $g'_{зм}$ и $g''_{зм}$, то (7.7) при условии $\underline{Y}_1 = \underline{Y}_2 = \underline{Y}_3 = \underline{Y}$ примет вид

$$\dot{U}_0 = U_\phi \frac{g'_{зм} + g''_{зм} a}{3\underline{Y} + \underline{Y}_0 + g'_{зм} + g''_{зм}};$$

полагая, что сумма $(3\underline{Y} + \underline{Y}_0)$ незначительна по сравнению с $(g'_{зм} + g''_{зм})$, получаем

$$\dot{U}_0 = U_\phi \frac{g'_{зм} + g''_{зм} a}{g'_{зм} + g''_{зм}}. \quad (7.9)$$

Наименьшее значение U_0 будет при $g'_{зм} = g''_{зм}$; в этом случае

$$U_0 = 0,5 U_\phi.$$

Очевидно, что это значение U_0 следует принять за уставку $U_{уст.}$, при которой должно происходить отключение сети. Следовательно,

$$U_{уст} = U_0 = 0,5 U_\phi.$$

Напряжение срабатывания реле $U_{ср. В.}$ должно быть меньше напряжения уставки $U_{уст. В.}$, так как к обмотке реле, обладаю-

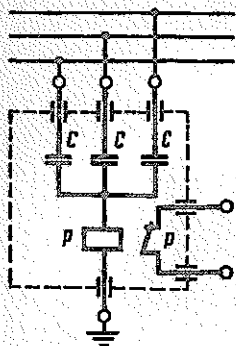


Рис. 7.8. Принципиальная схема асимметра РА-74/2

шей сопротивлением Z_p , Ом, прикладывается лишь часть U_0 (другая часть прикладывается к сопротивлению фильтра Z_{ϕ} , Ом).

Таким образом,

$$U_{cp} = U_{уст} \left| \frac{Z_p}{Z_p + Z_{\phi}} \right|. \quad (7.10)$$

Достоинством рассматриваемого УЗО являются простота его схемы и надежность срабатывания при глухих замыканиях на землю. К достоинствам относится и то обстоятельство, что эти устройства обеспечивают отключение сети при переходе на нее высшего напряжения трансформатора.

Недостатки — неселективность срабатывания, нечувствительность к симметричному снижению сопротивления изоляции проводов, возможность ложных отключений при больших сопротивлениях реле и фильтров и, наконец, отсутствие самоконтроля исправности.

Примером защитно-отключающего устройства указанного типа может служить асимметр РА-74/2 (рис. 7.8). Он предназначен для сетей до 1000 В с изолированной нейтралью и находит широкое применение в электроустановках торфопредприятий и на открытых горных разрабатках.

Асимметр состоит из трех конденсаторов емкостью каждый 0,25 мкФ, соединенных в звезду, между нулевой точкой которой и землей включено электромагнитное реле. Реле имеет одну пару нормально замкнутых (размыкающих) контактов, включенных в цепь катушки нулевого напряжения автоматического выключателя или в цепь втягивающей катушки магнитного пускателя или промежуточного реле.

При замыкании фазы на землю или снижении сопротивления изоляции фазы относительно земли ниже определенного предела через катушку реле проходит ток, вызывающий его срабатывание, а следовательно, отключение установки. Напряжение срабатывания реле $U_{cp} = 88$ В; ток срабатывания $I_{cp} = 39$ мА; время срабатывания $t_{cp} = 0,0123$ с.

Сопротивление обмотки реле $z_p = 2,26$ Ом, а сопротивление нулевой последовательности фильтра $z_{\phi} = 2,5$ кОм.

Контакты асимметра рассчитаны на токи отключения 2 А при 500 В, 3 А при 380 В и 5 А при 220 В.

Асимметр монтируется в корпусе реле ЭТ-520 и др.

7.5. УСТРОЙСТВА, РЕАГИРУЮЩИЕ НА ТОК НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Назначение УЗО этого типа — обеспечить безопасность человека в случае прикосновения к заземленному (зануленному) корпусу при замыкании на него фазы, или к токоведущей части, находящейся под напряжением. Следовательно, это устройство может служить дополнительной мерой защиты к защитному заземлению и занулению, а также как самостоятельная защита взамен заземления или зануления.

Принцип действия — быстрое отключение участка сети или потребителя энергии, если ток нулевой последовательности превышает некоторое значение, при котором напряжение прикосновения к «пробитому» корпусу или токоведущей части, находящейся под напряжением, имеет наибольшее длительно допустимое значение $U_{\text{пр, доп}}$.

Принципиальная схема показана на рис. 7.9. Датчиком может служить трансформатор тока нулевой последовательности $ТТНП$, магнитопровод которого охватывает все провода сети, играющие в этом случае роль первичных одновитковых обмоток трансформатора. В результате магнитные потоки, создаваемые в магнитопроводе $ТТНП$ токами первичных обмоток, складываются, а суммарный поток обуславливает возникновение тока во вторичной обмотке $ТТНП$, замыкающегося через обмотку реле. В сети с заземленной нейтралью $ТТНП$ может надеваться на провод, соединяющий нейтральную точку обмоток силового трансформатора с заземлителем (рис. 7.10).

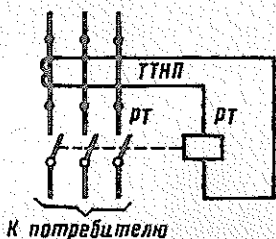


Рис. 7.9. Принципиальная схема УЗО, реагирующего на ток нулевой последовательности:

$ТТНП$ — датчик-трансформатор тока нулевой последовательности; $РТ$ — реле токовое

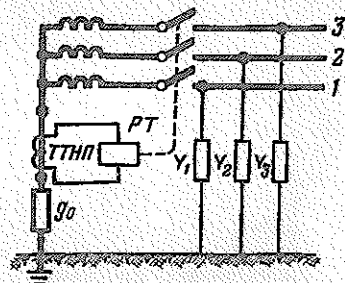


Рис. 7.10. Схема включения $ТТНП$ в проводник, заземляющий нейтраль трансформатора:

Y_1, Y_2, Y_3 — проводимости (относительно земли) проводов сети; g_0 — проводимость заземления нейтрали источника тока

Если на защищаемом участке сети проводимости фаз относительно земли одинаковы, то сумма токов, проходящих по фазным проводам сети, а следовательно, и ток через реле I_p равны нулю:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0; \quad I_p = 0.$$

Если на защищаемом участке возникает асимметрия проводимостей фаз относительно земли в результате, например, замыкания фазы на землю, прикосновения человека к фазе и т. п. (рис. 7.11), то приведенные равенства нарушаются, так как появляется ток нулевой последовательности $3I_0$, А, и через реле проходит ток I_p , А, пропорциональный его значению:

$$I_p = 3I_0/k, \quad (7.11)$$

где k — коэффициент трансформации трансформаторов тока, составляющих фильтр, или $ТТНП$ (отношение первичного тока ко вторичному).

Этот ток, достигнув значения тока срабатывания реле или превысив его, вызовет отключение защищаемого участка сети от источника питания. Следует иметь в виду, что в рассматриваемых условиях, когда $ТТНП$ (или фильтр) делит сеть на два участка — один в зоне защиты, а другой вне ее (рис. 7.11), ток нулевой последовательности $3I_0$ в общем случае не равен току замыкания на землю I_3 . Связь между ними можно выразить следующей зависимостью:

$$3I_0 = k_0 I_3, \quad (7.12)$$

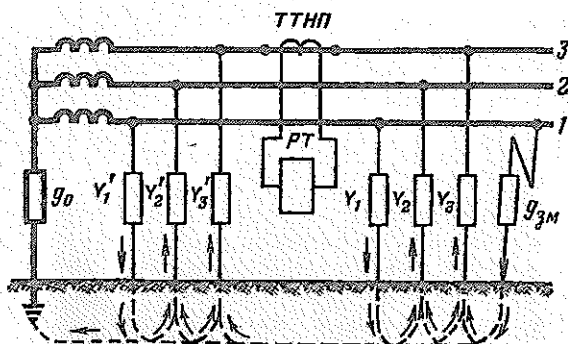


Рис. 7.11. Схема сети с $ТТНП$:

Y_1, Y_2, Y_3 — проводимости (относительно земли) участков проводов, находящиеся в зоне защиты; Y'_1, Y'_2, Y'_3 — то же вне зоны защиты; g_0 — проводимость заземления нейтрали; g_{3M} — проводимость замыкания фазы на землю

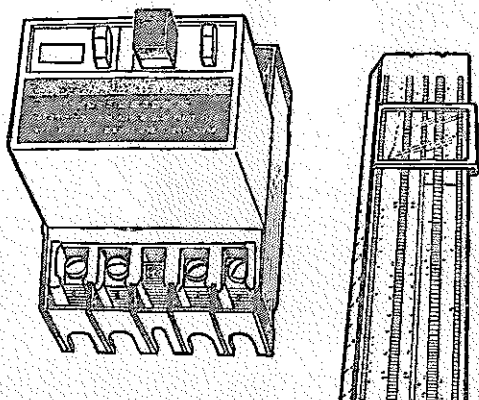


Рис. 7.12. Защитный выключатель от токов утечки (прибор защитного отключения и автоматический выключатель заключены в общий корпус). Номинальный ток — до 40 А, напряжение сети 380/220 — 220/127 В, уставка 30 мА

где k_0 — коэффициент в комплексной форме, определяющий соотношение между проводимостями относительно земли участков сети, находящихся по обе стороны ТТП (или фильтра); выражение для этого коэффициента сложно и здесь не приводится; однако если проводимость участка сети, находящегося в зоне защиты, близка к нулю, то $k_0 = 1$, а следовательно, и $3I_0 = I_3$; если же нулю равна проводимость незащищенного участка сети, то $k_0 = 0$ и $3I_0 = 0$ независимо от значения тока I_3 .

Нередко прибор защитного отключения УЗО этого типа совмещается в едином корпусе с другой основной частью устройства — автоматическим выключателем, специально изготовленным для защитного отключения (рис. 7.12). Такая конструкция УЗО обычно именуется защитным выключателем от токов утечки, что не совсем точно, поскольку ток нулевой последовательности, на который реагирует это устройство, является, как правило, частью тока утечки.

Область применения УЗО, реагирующих на ток нулевой последовательности, — сети любых напряжений как с заземленной, так и с изолированной нейтралью. При этом поскольку ток нулевой последовательности зависит от соотношения проводимостей относительно земли участков сети в зоне защиты и вне ее, в сети с изолированной нейтралью на четкость и надежность срабатывания УЗО влияет место уста-

новки *ТТНП* (или фильтра) на линии. Наиболее эффективна в этом смысле установка *ТТНП* (или фильтра) в непосредственной близости от защищаемого оборудования, когда участок сети, находящийся в зоне защиты, оказывается малым по длине и обладает поэтому незначительной проводимостью относительно земли, не влияющей на ток нулевой последовательности. И, наоборот, размещение *ТТНП* в начале протяженной линии (в сети с изолированной нейтралью) приводит, как правило, к неселективности или отказу работы защитного отключения, поскольку ток нулевой последовательности может оказаться незначительным, несмотря на большой ток замыкания на землю.

В сети с заземленной нейтралью проводимость участка сети, находящегося вне зоны защиты, всегда достаточно велика (за счет проводимости заземления нейтрали источника тока), поэтому *ТТНП* можно размещать в любом месте линии, что не нарушит селективности работы устройства.

Положительные свойства этих УЗО обеспечили им широкое распространение как в нашей стране, так и за рубежом.

Выбор уставки. Условия безопасности выражаются следующими уравнениями:

а) при прикосновении к заземленному или зануленному корпусу в период замыкания на него фазы допустимое напряжение прикосновения, U ,

$$U_{\text{пр, доп}} \geq I_3 r_k \alpha_1 \alpha_2, \quad (7.13)$$

где I_3 — ток, A , стекающий в землю, через сопротивление заземления корпуса r_k , Ω ; α_1 и α_2 — коэффициенты напряжения прикосновения;

б) при прикосновении к токоведущей части, находящейся под напряжением (или незаземленному и зануленному корпусу в период замыкания на него фазы),

$$U_{\text{пр, доп}} \geq I_h R_h, \quad (7.14)$$

где I_h — ток, проходящий через человека, A ; R_h — сопротивления тела человека, Ω .

Уставкой для случая прикосновения к заземленному или зануленному корпусу является некоторое значение тока нулевой последовательности I_{0y} , A , при котором ток замыкания на землю не превышает значения I_3 , A , удовлетворяющего приведенному условию безопасности (7.13).

С учетом зависимости (7.12) будем иметь уставку

$$I_{0y} = |I_3 k_0| \quad (7.15)$$

или, заменив I_3 его значением из (7.13) и приняв $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$,

$$I_{0y} = \left| \frac{U_{\text{пр, доп}}}{r_k} k_0 \right|. \quad (7.16)$$

Уставкой для случая прикосновения к токоведущей части будет некоторое значение тока нулевой последовательности I_{0y} , А, при котором ток, проходящий через человека в землю, не превышает длительно допустимого тока $I_{h, \text{доп}}$, А, (или тока, при котором напряжение прикосновения не превышает $U_{\text{пр, доп}}$).

С учетом (7.12) и (7.14) уставка будет равна

$$I_{0y} = \left| \frac{U_{\text{пр, доп}}}{R_h} k_0 \right|. \quad (7.17)$$

Достоинствами УЗО, реагирующих на ток нулевой последовательности, являются: возможность применения в сетях любых напряжений с различными режимами нейтрали; способность обеспечивать безопасность человека при прикосновении не только к корпусу, оказавшемуся под напряжением, но и к фазному проводу сети, находящемуся под рабочим напряжением; высокая степень надежности работы, т. е. малое количество ложных отключений; независимость работы устройства от значений сопротивления заземления и сопротивления нулевого проводника. Последнее достоинство имеет немаловажное значение в тех случаях, когда невозможно заземлить нейтраль трансформатора, корпуса электрооборудования или нулевой проводник через малое сопротивление или когда из-за удаленности потребителя сопротивление нулевого защитного проводника оказывается выше нормированных значений.

Недостатки — нечувствительность к симметричным снижениям сопротивления изоляции, сложность конструкции устройства, предназначенного защищать человека от поражения током при прикосновении к токоведущей части, находящейся под напряжением. Однако симметричные снижения сопротивлений возможны сравнительно редко, а сложность конструкции при современном развитии техники не является большим препятствием к устройству этого типа УЗО.

J

7.6. УСТРОЙСТВА, РЕАГИРУЮЩИЕ НА ОПЕРАТИВНЫЙ ТОК

Об изменении сопротивлений изоляции проводов сети относительно земли и заземления оборудования, которые чаще всего обуславливают безопасность эксплуатации электроустановки, можно судить по значению тока, проходящего через эти сопротивления и получаемого от постороннего источника. В этом случае сопротивления являются измеряемыми величинами, а ток, характеризующий их значение, — измерительным током. Его принято называть также *оперативным током*.

Очевидно, что оперативный ток может служить входной величиной устройства защитного отключения. В практике для этой цели применяют как постоянный, так и переменные токи различной частоты. Ниже для примера рассматривается один из типов УЗО, в котором используется постоянный оперативный ток.

Назначение. УЗО, реагирующие на оперативный постоянный ток, предназначены для непрерывного автоматического контроля сопротивления изоляции сети, а также для защиты человека, прикоснувшегося к токоведущей части, от поражения током.

Следовательно, УЗО этого типа может служить самостоятельной мерой защиты от поражения током при прикосновении к незаземленному корпусу в период замыкания на него фазы или к токоведущей части, находящейся под напряжением. Оно может служить дополнительной защитой к заземлению.

Принцип действия — быстрое отключение сети от источника тока при снижении сопротивления ее изоляции относительно земли ниже некоторого предела, при котором ток I_h через человека, прикоснувшегося к токоведущей части (или напряжение прикосновения), достигает наибольшего длительно допустимого значения $I_{h, \text{доп}}$ (или $U_{\text{пр, доп}}$).

Принципиальная схема этого устройства показана на рис. 7.13. Датчиком служит реле РТ с малым током срабатывания (несколько миллиампер). Трехфазный дроссель ДТ предназначен для получения нулевой точки сети; обычно это дроссель-трансформатор. Однофазный дроссель Д необходим для ограничения утечки в землю переменного тока, которому он оказывает большое индуктивное сопротивление.

Постоянный ток от постороннего источника проходит по замкнутой цепи: источник — земля — сопротивление изоляции всех проводов относительно земли — провода — трехфазный

дроссель $ДТ$ — однофазный дроссель $Д$ — обмотка реле $РТ$ — источник. Значение этого тока I_p , А, зависит от напряжения источника постоянного тока $U_{ист}$, В, и общего активного сопротивления цепи:

$$I_p = U_{ист} / (R_d + r_3), \quad (7.18)$$

где R_d — суммарное активное сопротивление реле и дросселей, Ом; r_3 — эквивалентное активное сопротивление изоляции проводов (r_1 , r_2 , r_3) и замыкания фазы на землю $r_{3м}$, Ом;

$$r_3 = rr_{3м} / (r + r_{3м}); \quad (7.19)$$

r — активное сопротивление изоляции трех фаз, Ом:

$$r = 1 / (1/r_1 + 1/r_2 + 1/r_3). \quad (7.20)$$

При нормальном режиме работы сети сопротивление r_3 велико и поэтому ток I_p незначителен. В случае снижения сопротивления изоляции одной (или двух, трех) фазы в результате ее замыкания на землю или на корпус или в результате прикосновения к ней человека сопротивление r_3 уменьшится, а ток I_p возрастет и, если он превысит ток срабатывания реле $РТ$, произойдет отключение сети от источника питания.

На рис. 7.14 приведена принципиальная схема реле утечки типа РУВ (реле утечки взрывозащищенное), предназначенного для шахтных сетей до 1000 В с изолированной нейтралью (разработано проф. Р. М. Лейбовым).

Источником постоянного тока служит селеновый выпрямитель $В$, питающийся от одной из вторичных обмоток трансформатора-дросселя $ТД$.

При снижении сопротивления изоляции сети r , до 3500 Ом* постоянный ток в цепи достигает значения, равного току срабатывания реле (5 мА), и реле срабатывает; его контакт $Р1$ включает катушку $ОК$, обеспечивающую отключение поврежденной сети. При этом время от-

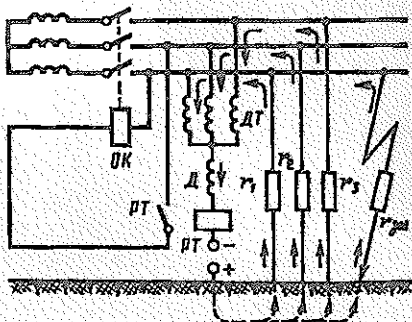


Рис. 7.13. Принципиальная схема УЗО, реагирующего на оперативный постоянный ток ($ОК$ — отключающая катушка)

* Это соответствует снижению сопротивления изоляции одной фазы примерно до 3500, двух до 7000 и трех до 10 500 Ом.

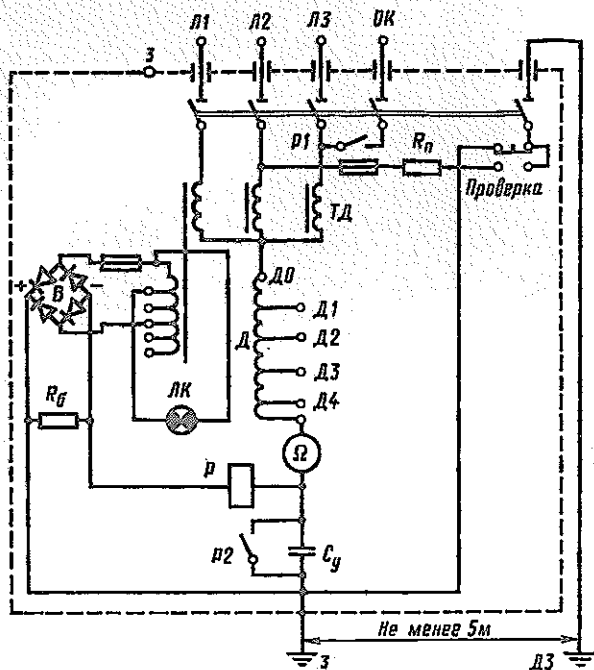


Рис. 7.14. Принципиальная схема реле утечки типа РУВ

ключения не превышает 0,2 с. Другой контакт $P2$ замыкает цепь катушки реле P напрямую для исключения подгорания контактов реле при перемежающихся замыканиях на землю. Омметр, предусмотренный в схеме, измеряет сопротивление изоляции сети.

Проверка исправности РУВ производится нажатием кнопки *Проверка*. При этом одна из фаз сети присоединяется к «земле» через проверочное сопротивление $R_n = 3500$ Ом.

Область применения устройств, реагирующих на оперативный постоянный ток, — сети до 1000 В с изолированной нейтралью. При этом корпуса защищаемых объектов могут быть заземлены или изолированы от земли. В сети с заземленной нейтралью эти схемы неприменимы из-за шунтирования сопротивления изоляции проводов малым сопротивлением заземления нейтрали, вследствие чего оперативный постоянный ток замыкается через это заземление. Кроме того, сети, в которых применяются рассматриваемые схемы, должны быть небольшой протяженности. Это обстоятельство диктуется тем,

что в протяженных сетях вследствие сравнительно большой емкости проводов относительно земли и малого сопротивления изоляции, как правило, не удастся обеспечить защиту от поражения при прикосновении к фазе.

Выбор уставки. Условие безопасности прикосновения человека к токоведущей части, находящейся под напряжением, заключается в том, чтобы ток через человека I_h не превышал длительно допустимого значения $I_{h, \text{доп}}$, т. е.

$$I_{h, \text{доп}} \geq I_h. \quad (7.21)$$

Уставкой для этого случая будет некоторое значение эквивалентного сопротивления r_3 , Ом, при котором соблюдается указанное условие безопасности:

$$r_{\text{уст}} \geq r_3,$$

или с учетом (7.19)

$$r_{\text{уст}} \geq rR_h/(r + R_h), \quad (7.22)$$

где R_h — сопротивление тела человека, Ом.

Уставка не зависит от степени несимметрии сопротивлений изоляции фаз.

Ток срабатывания реле $I_{\text{ср}}$, А, определяется выражением (7.18), в котором надо заменить r_3 на $r_{\text{уст}}$:

$$I_{\text{ср}} = U_{\text{ист}}/(R_d + r_{\text{уст}}). \quad (7.23)$$

Достоинствами УЗО, реагирующих на оперативный постоянный ток, являются возможность обеспечения высокой степени безопасности для людей благодаря ограничению тока, проходящего через человека, до необходимых пределов и возможность самоконтроля исправности, поскольку при обрыве цепей прохождение тока через реле прекращается, что и служит импульсом на отключение установки.

К недостаткам этих устройств относятся сравнительная сложность их, поскольку требуется источник постоянного тока, а также неселективность работы, что приводит к неоправданным отключениям исправной сети. Кроме того, эти УЗО не контролируют значение емкостной проводимости проводов сети относительно земли, поэтому при большой емкости, что может быть в разветвленных кабельных сетях, эффективность действия УЗО резко снижается.

Глава 8

СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В процессе эксплуатации электроустановок нередко возникают условия, при которых даже самое совершенное конструктивное исполнение установок не обеспечивает безопасности работающего, и поэтому требуется применение специальных средств защиты — приборов, аппаратов, переносных и переносимых приспособлений и устройств, служащих для защиты персонала, работающего в электроустановках, от поражения электрическим током, электрического поля, продуктов горения падения с высоты и т. п. Эти средства не являются конструктивными частями электроустановок; они дополняют ограждения, блокировки, сигнализацию, заземление, зануление и другие стационарные защитные устройства.

Средства защиты, применяемые в электроустановках, могут быть условно разделены на четыре группы: изолирующие, ограждающие, экранирующие и предохранительные. Первые три группы предназначены для защиты персонала от поражения электрическим током и вредного воздействия электрического поля и называются электрозащитными средствами.

Изолирующие электрозащитные средства изолируют человека от токоведущих или заземленных частей, а также от земли. Они делятся на основные и дополнительные.

Основные изолирующие электрозащитные средства обладают изоляцией, способной длительно выдерживать рабочее напряжение электроустановки, и поэтому ими разрешается касаться токоведущих частей, находящихся под напряжением. К ним относятся:

в электроустановках до 1000 В — диэлектрические перчатки, изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками, а также указатели напряжения;

в электроустановках выше 1000 В — изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, указатели напряжения, а также средства для ремонтных работ под напряжением выше 1000 В.

Дополнительные изолирующие электрозащитные средства не обладают изоляцией, способной выдерживать рабочее напряжение электроустановки, и поэтому они

е могут служить защитой человека от поражения током при том напряжении. Их назначение — усилить защитное (изолирующее) действие основных изолирующих средств, вместе с которыми они должны применяться; причем при использовании основных электрозащитных средств достаточно одного дополнительного электрозащитного средства.

К дополнительным изолирующим электрозащитным средствам относятся:

в электроустановках до 1000 В — диэлектрические галоши и ковры, а также изолирующие подставки;

в электроустановках выше 1000 В — диэлектрические перчатки, боты и ковры, а также изолирующие подставки.

Ограждающие электрозащитные средства предназначены для временного ограждения токоведущих частей, к которым возможно случайное прикосновение или приближение на опасное расстояние, а также для предупреждения ошибочных операций с коммутационными аппаратами. К ним относятся временные переносные ограждения — щиты и ограждения-клетки, изолирующие накладки, временные переносные заземления и предупредительные плакаты.

Экранирующие электрозащитные средства служат для исключения вредного воздействия на работающих электрических полей промышленной частоты. К ним относятся индивидуальные экранирующие комплекты (костюмы с головными уборами, обувью и рукавицами), переносные экранирующие устройства (экраны) и экранирующие тканевые изделия (зонты, палатки и т. п.).

Предохранительные средства защиты предназначены для индивидуальной защиты работающего от вредных воздействий неэлектротехнических факторов — световых, тепловых и механических, а также от продуктов горения и падения с высоты. К ним относятся защитные очки и щитки, специальные рукавицы, изготовленные из трудновоспламеняемой ткани, защитные каски, противогазы, предохранительные монтерские пояса, страховочные канаты, монтерские когти.

8.2. НАЗНАЧЕНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРАВИЛА ПРИМЕНЕНИЯ

а) Изолирующие штанги

Назначение. Изолирующая штанга — стержень, изготовленный из изоляционного материала, которым человек может касаться частей электроустановки, находящихся под напряже-

нием, без опасности поражения током. Штанга является основным изолирующим электрозащитным средством, т. е. она может сколь угодно длительно выдерживать рабочее напряжение установки. Штанги применяются в установках всех напряжений.

В зависимости от назначения штанги делятся на четыре вида (рис. 8.1 и 8.2):

а) оперативные, применяемые для операций с однополюсными разъединителями и наложения временных переносных защитных заземлений; их используют также для снятия и постановки трубчатых патронов предохранителей, проверки отсутствия напряжения и подобных им эксплуатационных операций;

б) измерительные, предназначенные для измерений в электроустановках, находящихся в работе (проверка распределения напряжения по изоляторам гирлянды, определение со-

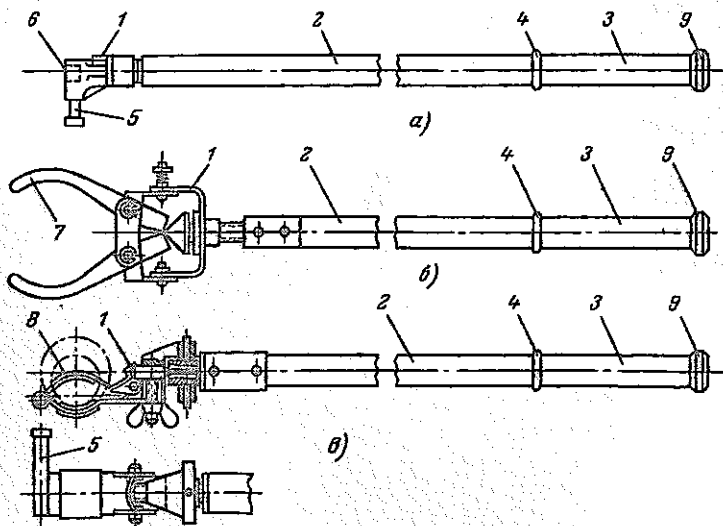


Рис. 8.1. Некоторые конструкции изолирующих штанг:

а — оперативная; б — ремонтная (для установки и снятия трубчатых разрядников); в — универсальная; 1 — рабочая часть; 2 — изолирующая часть; 3 — рукоятка; 4 — ограничитель захвата (упорное кольцо); 5 — металлический палец для управления однополюсными разъединителями; 6 — резьбовое отверстие для закрепления указателя напряжения; 7 — губки для удерживания разрядника; 8 — губки для удерживания патрона трубчатого предохранителя, изолирующих накладок и т. п.; 9 — пробка, закрывающая отверстие в трубке

противления контактных соединений на проводах и ошиновке т. п.);

в) ремонтные, служащие для производства ремонтных и монтажных работ вблизи токоведущих частей, находящихся под напряжением, или непосредственно на них: очистки изоляции от пыли, присоединения к проводам потребителей или закрепления на токоведущей части контактных зажимов, обрезки

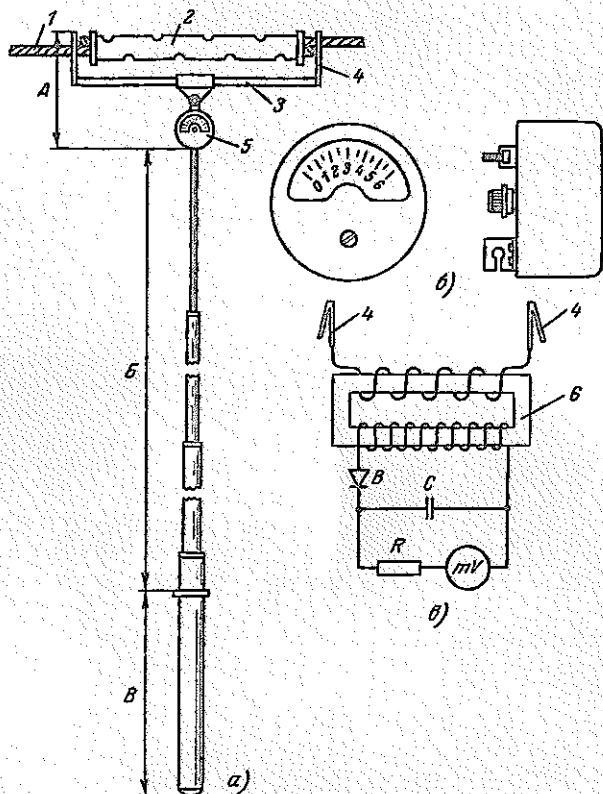


Рис. 8.2. Изолирующая измерительная штанга для определения под напряжением сопротивления контактов соединителей на проводах ВЛ и ОРУ до 220 кВ:

а — общий вид штанги; б — общий вид измерительного прибора; в — упрощенная принципиальная схема измерительного прибора; А — рабочая часть штанги; Б — изолирующая часть; В — рукоятка; 1 — провод; 2 — соединитель; 3 — бакелитовая трубка; 4 — ножевые контактные наконечники (крючки), с помощью которых штанга накладывается на провод; 5 — измерительный прибор; 6 — повышающий трансформатор

веток деревьев в непосредственной близости от проводов воздушных линий электропередачи (ВЛ), снятия с проводов набросов, установки на провода ВЛ гасителей вибрации, разрядники и т. п. Ремонтные штанги получили широкое распространение за рубежом при ремонтных работах под напряжением;

г) универсальные, конструкция которых позволяет выполнять различные операции, в том числе многие из тех, для которых предназначены оперативные и ремонтные штанги.

Конструкция. Каждая штанга имеет три основные части: рабочую, изолирующую и рукоятку.

Рабочая часть обуславливает назначение штанги. Она может иметь самое разнообразное устройство от простого металлического крючка (пальца) у штанг, предназначенных для управления разъединителями, до сложного прибора у измерительных штанг.

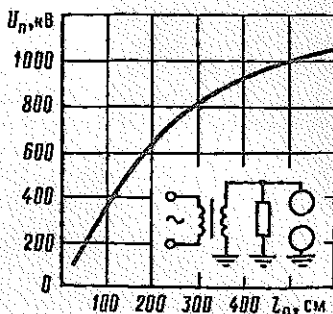
Изолирующая часть обеспечивает изоляцию человека от токоведущих частей, а следовательно, и его безопасность; она изготавливается из изоляционных материалов, обладающих высокой электрической и механической прочностью, а также устойчивостью к атмосферным воздействиям. Этим требованиям отвечают трубки диаметром 30–40 мм из бакелита, стеклопластика (стеклоэпоксида, стеклотекстолита) и других пластиков, а также деревянные стержни, пропитанные высыхающими маслами (льняным, конопляным, тунговым и др.).

Длина изолирующей части штанги должна быть такой, чтобы исключалась опасность перекрытия ее по поверхности при наибольших возможных напряжениях, воздействующих на штангу; исключалось вынужденное приближение человека, оперирующего штангой, к токоведущим частям на опасное расстояние; ток утечки через штангу в самых неблагоприятных случаях был неощутимым и безопасным для человека; обеспечивалось удобство выполнения обычных операций со штангой в типовых электроустановках.

Наибольшими напряжениями, воздействующими на штангу, следует считать не рабочие напряжения электроустановок, а внутренние (коммутационные) перенапряжения, возникающие в результате резких изменений режима работы электрической системы (оперативные переключения, изменения нагрузки, повреждения сети и т. п.).

Наибольшие возможные значения внутренних перенапряжений U_p можно принять равными $4U_\phi$ в электроустановках с номинальным напряжением до 220 кВ и $3U_\phi$ в установках более высокого напряжения, например 25 кВ в установках 10 кВ, 250 кВ в установках 110 кВ, 870 кВ в установках 500 кВ и т. д.

ис. 8.3. Сухоразрядные напряжения при 50 Гц и нормальных атмосферных условиях по поверхности гладких изоляторов (деревянных стержней, бакелитовых и пластмассовых трубок и т. п.) в зависимости от длины изолятора



Разрядные расстояния по поверхности изолирующих стержней l_p , см, соответствующие указанным наибольшим значениям перенапряжений U_n , кВ, можно определить по кривой рис. 8.3 или по приближенным формулам:

$$l_p = 0,3 U_n \text{ при } U_n \leq 800 \text{ кВ};$$

$$l_p = 1,2 U_n - 720 \text{ при } 800 \text{ кВ} \leq U_n \leq 1200 \text{ кВ}.$$

Например, при $U_n = 25$ кВ $l_p = 7,5$ см; при $U_n = 250$ кВ $l_p = 75$ см; при $U_n = 870$ кВ $l_p = 324$ см.

Следует отметить, что при постоянном токе разрядное напряжение по поверхности гладких цилиндрических стержней можно принимать равным амплитудному значению разрядного напряжения при переменном токе с частотой 50 Гц, т. е. в $\sqrt{2}$ раз больше, чем определяется кривой на рис. 8.3.

Опасным расстоянием от оператора до токоведущих частей следует считать разрядное расстояние по воздуху при наибольших возможных напряжениях. В данном случае его можно принять равным разрядному расстоянию по поверхности штанги.

Чтобы исключить возможность кратковременного сокращения опасного расстояния при случайном приближении оператора к токоведущим частям в момент возникновения перенапряжения, необходимо увеличить расчетную длину изолирующей части штанги на некоторое значение R , равное, например, длине руки оператора, т. е. 60 см.

Таким образом, минимальная длина изолирующей части штанг l_n , см, удовлетворяющая указанным выше требованиям, может быть выражена уравнением

$$l_n = k l_p + R = 1,2 l_p + 60,$$

где $k = 1,2$ — коэффициент, учитывающий естественное старение изоляции штанги.

Так, для установок 10 кВ $l_n = 69$ см, для установок 110 кВ $l_n = 150$ см, для установок 500 кВ $l_n = 449$ см.

При этих длинах и обычных поперечных сечениях стержней и трубок, составляющих штангу, ток утечки по штангам, изготовленным из бакелита, пластмасс и дерева, оказывается в пределах допустимого, т. е. меньше 50 мкА (см. § 1.3, 6).

Удобство работы со штангами, как одно из требований, обуславливающих длину ее изолирующей части, зависит от габа-

ритов электроустановки и размещения оборудования. В частности длина оперативной штанги должна быть такой, чтобы угол между и осью ножа однополюсного разъединителя или рычага трехполюсного разъединителя (либо осью другого объекта, для оперирования которым предназначена штанга) в начальном положении (начало отклонения) был не менее 30° . Вместе с тем верхнее положение рукоятки оператора (положение ограничительного кольца на штанге) должно быть не выше 170 см над основанием, на котором стоит оператор.

Наименьшая длина изолирующей части штанг, установленная ГОСТ 20494-75, указана в табл. 8.1.

Рукоятка предназначена для удерживания штанги руками. Как правило, она является продолжением изолирующей части штанги и отделяется от нее ограничительным кольцом. Длина рукоятки определяется удобством работы со штангой и составляет 0,3—1 м (табл. 8.1).

Правила пользования. Штанги следует применять в закрытых электроустановках. На открытом воздухе их использование допускается только в сухую погоду (при отсутствии дождя, снега, тумана и измороси).

Операцию штангой может производить только квалифицированный персонал, обученный этой работе. Как правило, при этом должен присутствовать второй человек, который контролирует действия оператора и при необходимости может оказать ему помощь.

Таблица 8.1. Наименьшие допустимые размеры изолирующих штанг (по ГОСТ 20494-75)

Номинальное напряжение электроустановки, кВ	Длина, м	
	изолирующей части (по изоляции)	рукоятки
2—15	0,7	0,3
Свыше 15 до 35	1,1	0,4
Свыше 35 до 110	1,4	0,6
150	2,0	0,8
220	2,5	0,8
330	3,0	0,8
Свыше 330 до 500	4,0	1,0

Примечания: 1. Длина штанг для электроустановок напряжением до 1000 В включительно не нормируется и определяется удобством пользования штангами.

2. Для штанг, предназначенных для каботажных временных переносных заземлений на провода и грозозащитные тросы ВЛ напряжением 110 кВ и выше, устанавливается несколько меньшая длина.

При работе штангой необходимо надевать диэлектрические перчатки. Без перчаток можно работать лишь в установках до 1000 В, а также измерительными штангами на линиях электропередачи и ОРУ любого напряжения. При работе нельзя касаться штанги выше ограничительного кольца.

б) Изолирующие клещи

Назначение изолирующих клещей — выполнение операций под напряжением с предохранителями, установка и снятие изолирующих накладок, перегородок и тому подобные работы. Применяют клещи в установках до 35 кВ включительно.

Конструкции клещей различны (рис. 8.4), но во всех случаях они имеют три основные части: рабочую часть, или губки, изолирующую часть и рукоятки.

Размеры рабочей части клещей не нормируются. Однако у металлической рабочей части размеры должны быть возможно меньше, чтобы исключить случайное замыкание токоведущих частей между собой или на заземленные детали.

Длина изолирующей части клещей должна быть не меньше 45 см при напряжении 6–10 кВ и не меньше 75 см при напряжении выше 10 до 35 кВ, а длина рукояток — не меньше 15 и 20 см соответственно. Размеры клещей для электроустановок до 1000 В включительно не нормируются и определяются удобством работы с ними.

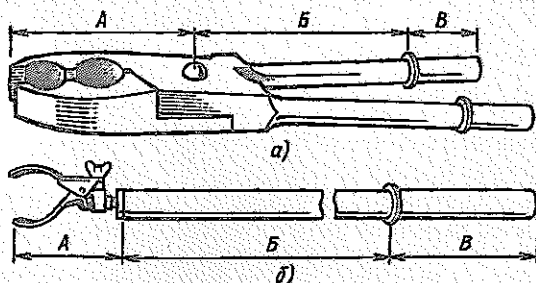


Рис. 8.4. Некоторые конструкции изолирующих клещей для электроустановок до 35 кВ:

а — щипцовые из пропитанного дерева; б — штанговые (металлическая рабочая часть укреплена на изолирующей штанге); А — рабочая часть; Б — изолирующая часть; В — рукоятка

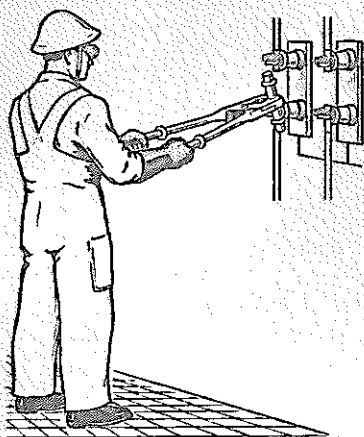


Рис. 8.5. Установка (снятие) тучаго патрона плавкого предохранителя под напряжением выше 1000 В с помощью изолирующих клещей

Правила пользования. Изолирующие клещи можно применять в закрытых электроустановках, а в сухую погоду — и в открытых.

При пользовании клещами в электроустановках выше 1000 В работающий должен иметь на руках диэлектрические

перчатки, а при снятии и установке предохранителей под напряжением он должен пользоваться, кроме того, защитными очками (рис. 8.5).

в) Электроизмерительные клещи

Назначение. Электроизмерительные клещи — прибор, предназначенный для измерения электрических величин — тока, напряжения, мощности, фазового угла и др. — без разрыва токовой цепи и нарушения ее работы. Соответственно измеряемым величинам существуют клещевые амперметры, ампервольтметры, ваттметры и фазометры.

Наибольшее распространение получили клещевые амперметры переменного тока, которые обычно называют токоизмерительными клещами. Они служат для быстрого измерения тока в проводнике без разрыва и без вывода его из работы.

Электроизмерительные клещи применяются в установках до 10 кВ включительно.

Конструкция. Простейшие токоизмерительные клещи переменного тока основаны на принципе одновиткового трансформатора тока, первичной обмоткой которого является шина или провод с измеряемым током, а вторичная многовитковая обмотка, к которой подключен амперметр, намотана на разъемный магнитопровод (рис. 8.6, а). Для охвата шины магнитопровод раскрывается подобно обычным клещам при воздействии оператора на изолирующие рукоятки или рычаги клещей.

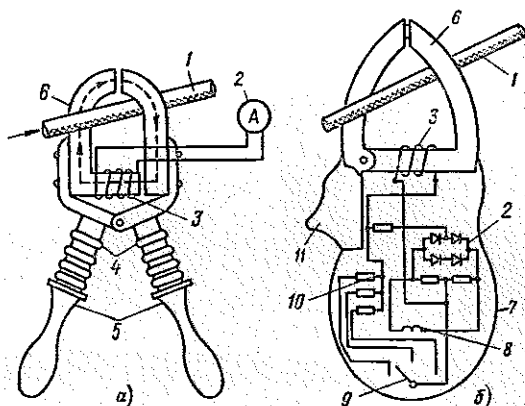


Рис. 8.6. Схемы токоизмерительных клещей переменного тока:

a — простейшая схема клещей с использованием принципа одновиткового трансформатора тока; *б* — схема, сочетающая одновитковый трансформатор тока с выпрямительным устройством; 1 — проводник с измеряемым током; 2 — выпрямительный мостик; 3 — вторичная обмотка; 4 — изолирующая часть; 5 — рукоятка; 6 — съемный магнитопровод; 7 — корпус; 8 — рамка измерительного прибора; 9 — переключатель пределов измерений; 10 — шунтирующий резистор; 11 — рычаг для раскрытия магнитопровода.

Переменный ток, проходя по токоведущей части, охваченной магнитопроводом, создает в нем переменный магнитный поток, индуктирующий ЭДС в замкнутой вторичной обмотке клещей. В этой обмотке ЭДС создает ток, который измеряется амперметром, укрепленным на клещах.

В современных конструкциях токоизмерительных клещей применяется схема, сочетающая трансформатор тока с выпрямительным прибором. В этом случае выводы вторичной обмотки присоединяются к электроизмерительному прибору не непосредственно, а через набор шунтов (рис. 8.6, б).

Электроизмерительные клещи бывают двух типов: двуручные для установок 2—10 кВ, операции с которыми производят двумя руками (рис. 8.7, а), и одноручные для установок до 1000 В, которыми можно оперировать одной рукой (рис. 8.7, б). Клещи имеют три основные части: рабочую, включающую магнитопровод, обмотки и измерительный прибор; изолирующую — от рабочей части до упора; рукоятки — от упора до конца клещей.

У одноручных клещей изолирующая часть служит одновременно рукояткой. Раскрытие магнитопровода осуществляется с помощью нажимного рычага.

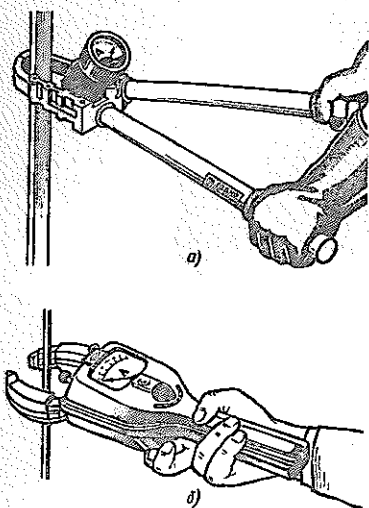


Рис. 8.7. Токоизмерительные клещи

Электроизмерительные клещи для установок 2—10 кВ имеют длину изолирующей части не менее 38, а рукояток не менее 13 см. Размеры клещей до 1000 В не нормируются.

Правила пользования. Электроизмерительные клещи можно применять в закрытых электроустановках, а также в открытых в сухую погоду. Измерения клещами допускается производить как на частях, покрытых изоляцией (провод, кабель, трубчатый патрон предохранителя и т. п.), так и на неизолированных (шины и др.).

Человек, производящий измерение в установках выше 1000 В, должен пользоваться диэлектрическими перчатками. Он обязан следить за тем, чтобы магнитопроводом клещей не замкнуть токоведущие части между собой или на заземленные предметы, и не приблизиться самому к токоведущим частям на опасное расстояние. Ему запрещается наклоняться к прибору для отсчета показаний. При выполнении измерений в установке выше 1000 В должно присутствовать второе лицо.

г) Указатели напряжения

Назначение. Указатель напряжения — переносный прибор, предназначенный для проверки наличия или отсутствия напряжения на токоведущих частях. Такая проверка необходима, например, при работе непосредственно на отключенных токоведущих частях, контроле исправности электроустановок, отыскании повреждений в электроустановке, проверке электрической схемы и т. п.

Во всех этих случаях требуется установить лишь наличие или отсутствие напряжения, но не его значение, которое, как правило, известно.

Все указатели имеют световой сигнал, загорание которого свидетельствует о наличии напряжения на проверяемой части или между проверяемыми частями.

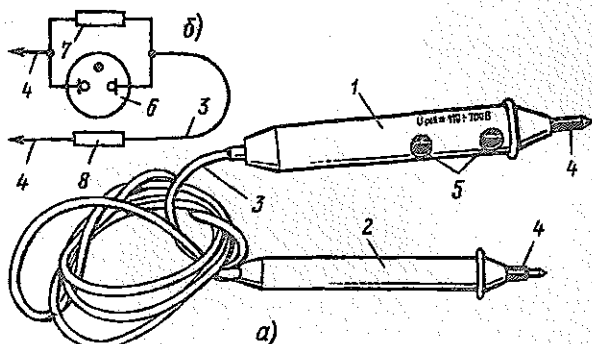


Рис. 8.8. Двухполюсный указатель напряжения для электроустановок переменного тока УННУ-1 110–700 В:

a – общий вид; *б* – схема соединений; 1 – основная рукоятка; 2 – вспомогательная рукоятка; 3 – соединительный провод типа «магнито»; 4 – контакт-наконечник; 5 – отверстие в корпусе рукоятки для наблюдения за свечением неоновой лампы; 6 – неоновая лампа; 7 – шунтирующий резистор; 8 – добавочный резистор

Указатели бывают для электроустановок до 1000 В и выше.

Указатели, предназначенные для электроустановок до 1000 В, делятся на двухполюсные и однополюсные.

При работе двухполюсными указателями (рис. 8.8) требуется прикосновение к двум частям электроустановки, между которыми необходимо определить наличие или отсутствие напряжения. Принцип их действия – свечение неоновой лампы или лампы накаливания (мощностью не более 10 Вт) при протекании через нее тока, обусловленного разностью потенциалов между двумя частями электрической установки, к которым прикасается указатель. Неоновая лампа представляет собой стеклянную колбочку, наполненную разреженным газом – неоновом-гелиевой смесью (75% Ne + 25% He) с небольшой примесью аргона (для снижения напряжения зажигания лампы). Потребляя малый ток – от долей миллиампера до нескольких миллиампер, лампа обеспечивает устойчивый и четкий световой сигнал, излучая оранжево-красный свет.

После возникновения разряда, т. е. свечения лампы, сопротивление ее постепенно уменьшается и, следовательно, ток увеличивается, что в конце концов приводит к выходу лампы из строя. Для ограничения тока до нормального значения последовательно с лампой должен быть включен резистор R_d , кОм, сопротивление которого определяется из выражения

$$R_d = (U - U_3) / I_n,$$

где U – верхняя граница напряжения, при которой может работать указатель, В; U_3 – напряжение зажигания лампы, В; I_n – наибольший допустимый рабочий ток лампы, мА.

Двухполюсные указатели можно применять в установках как переменного, так и постоянного тока. Однако при переменном токе металлические части указателя (цоколь лампы, провод, контакт-наконечник) могут создать емкость относительно земли или других фаз электроустановки, при которой емкостный ток будет достаточным для того, чтобы при касании к фазе лишь одного контакта-наконечника указатель с неоновой лампой светился. Чтобы исключить это явление, схему дополняют резистором, шунтирующим неоновую лампу и обладающим сопротивлением $R_{ш}$, равным или большим $R_{л}$.

При работе однополюсными указателями требуется прикосновение лишь к одной, испытываемой токоведущей части. Связь с землей обеспечивается через тело человека, который пальцем руки создает контакт с цепью указателя. Эта связь обусловлена в основном емкостью человек — земля (рис. 8.9). При этом ток не превышает 0,6 мА. Изготавливаются однополюсные указатели обычно в виде автоматической ручки, в корпусе которой, выполненном из изоляционного материала и имеющем смотровое отверстие, размещены последовательно включенные сигнальная лампа и добавочный резистор; на нижнем конце укреплен металлический контакт-наконечник, соединенный с резистором, а на верхнем — плоский металлический контакт, соединенный с лампой, которого пальцем касается оператор. Однополюсный указатель можно применять только в установках переменного тока, поскольку при постоянном токе его лампочка не горит и при наличии напряжения. Его рекомендуется использовать при проверке схем вторичной коммутации, для определения фазного провода в электросчетчиках, ламповых патронах, выключателях, предохранителях и т. п.

При пользовании указателями напряжения до 1000 В можно обходиться без дополнительных электрозащитных средств.

Правила техники безопасности запрещают применять вместо указателя напряжения так называемую контрольную лампу — лампу накаливания, ввернутую в патрон, заряженный двумя короткими проводами. Это запрещение вызвано тем, что при случайном включении лампы на напряжение большее, чем она рассчитана, или при ударе о твердый предмет возможен взрыв ее колбы и ранение оператора.

Указатели для электроустановок напряжением выше 1000 В, называемые также указателями высокого напряжения (УВН), действуют по принципу свечения неоновой лампы при протекании через нее емкостного тока, т. е. зарядного тока конденсатора, включенного последовательно с лампой (рис. 8.10, а).

Эти указатели пригодны лишь для установок переменного тока, и приближать их надо только к одной фазе.

Конструкции указателей различны, однако всегда УВН имеют три основные части (рис. 8.10, б): рабочую, состоя-

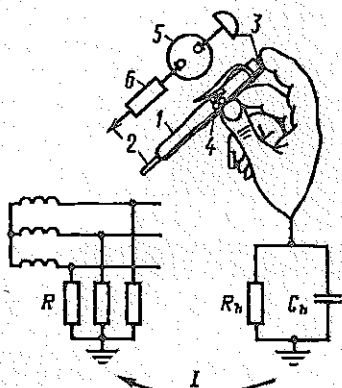


Рис. 8.9



Рис. 8.10

Рис. 8.9. Схема применения однополюсного указателя напряжения до 1000 В:

1 — корпус указателя; 2 — контакт-наконечник; 3 — металлический контакт, которого пальцем касается оператор; 4 — отверстие в корпусе для наблюдения за свечением неоновой лампы; 5 — неоновая лампа; 6 — добавочный резистор; R — сопротивление изоляции проводов сети относительно земли; R_h — сопротивление тела человека и основания, на котором он стоит; C_h — емкость тела человека относительно земли; I — ток, протекающий через указатель.

Рис. 8.10. Принципиальная схема и общий вид указателя высокого напряжения для установок до 10 кВ:

А — рабочая часть; Б — изолирующая часть; В — рукоятка; 1 — контакт-наконечник; 2 — неоновая лампа; 3 — конденсатор (конденсаторная трубка); 4 — затенитель (непрозрачный колпачок); 5 — прорезь в трубке для наблюдения за свечением лампы; 6 — бакелитовая конденсаторная трубка (конденсатор); 7 — изоляционная трубка; 8 — штамп об испытании указателя; 9 — ограничитель захвата (упор).

щую из конденсаторной трубки (конденсатора), сигнальной неоновой лампы, контакта-наконечника и пр.; изолирующую обеспечивающую изоляцию оператора от токоведущих частей и представляющую собой трубку из изоляционного материала; рукоятку, предназначенную для удерживания указателя рукой и являющуюся обычно продолжением изолирующей части.

Наименьшие допустимые размеры указателей высокого напряжения, установленные ГОСТ 20493-75, приведены в табл. 8.2.

При пользовании УВН необходимо надевать диэлектрические перчатки.

Таблица 8.2. Наименьшие допустимые размеры указателей напряжения выше 1000 В (по ГОСТ 20493-75)

Номинальное напряжение электроустановки, кВ	Длина, м	
	изолирующей части	рукоятки
Свыше 1 до 10	0,23	0,11
Свыше 10 до 20	0,32	0,11
35	0,51	0,12
110	1,40	0,60
Свыше 110 до 220	2,50	0,80

Каждый раз перед применением УВН необходимо произвести его наружный осмотр, чтобы убедиться в отсутствии внешних повреждений, и проверить исправность его действия, т. е. способность подавать сигнал. Для проверки контакт-наконечник указателя приближают к токоведущим частям электроустановки, заведомо находящимся под напряжением. Исправность УВН можно проверять и с помощью специальных приборов — переносных источников высокого напряжения, а также с помощью мегаомметра и, наконец, путем приближения шупа указателя к свече зажигания работающего двигателя автомобиля или мотоцикла.

Указатели запрещается заземлять, так как они и без заземления обеспечивают достаточно четкий сигнал; к тому же заземляющий провод может, прикоснувшись к токоведущим частям, явиться причиной несчастного случая. Лишь когда емкость указателя относительно земли и заземленных предметов оказывается весьма малой (например, при работах высоко над землей и вдали от заземленных частей, в том числе на деревянных опорах воздушных линий электропередачи), указатель напряжения должен быть заземлен, ибо в этом случае его лампочка может не светиться и при наличии на проводах напряжения.

д) Инструмент слесарно-монтажный с изолирующими рукоятками

Назначение инструмента — выполнение работ на токоведущих частях, находящихся под напряжением до 1000 В. Изолированные рукоятки инструмента должны быть длиной не менее 10 см и иметь упоры — утолщения изоляции, препятствующие соскальзыванию и прикосновению руки работающего к неизолированным металлическим частям инструмента; у отверток изолируется не только рукоятка, но и металлический стержень

на всей его длине до рабочего острья (рис. 8.11).

Правила пользования. При работах инструментом с изолирующими рукоятками на токоведущих частях, находящихся под напряжением, работающий должен иметь на ногах диэлектрические галоши либо стоять на изолирующей подставке или диэлектрическом ковре; он должен быть в одежде с опущенными рукавами. Диэлектрические перчатки при этом не требуются. Находящиеся под напряжением соседние токоведущие части, к которым возможно случайное прикосновение, должны быть ограждены изолирующими накладками, электрокартоном и т. п. Работа должна производиться в присутствии второго лица.

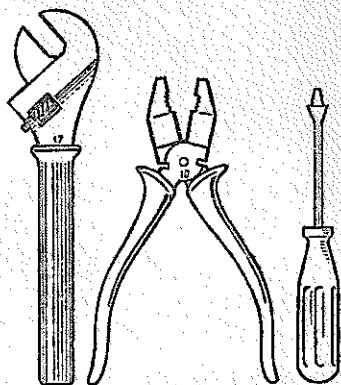


Рис. 8.11. Инструмент слесарно-монтажный с изолирующими рукоятками

е) Диэлектрические перчатки, галоши, боты, сапоги и ковры

Среди средств, защищающих персонал от поражения током, наиболее широкое распространение имеют диэлектрические перчатки, галоши, боты, ковры, а в последнее время и сапоги (рис. 8.12). Их изготавливают из резины специального состава, обладающей высокой электрической прочностью и хорошей эластичностью. Однако резина разрушается под действием тепла, света, минеральных масел, бензина, щелочей и т. п., легко повреждается механически. Сапоги изготавливают также из поливинилхлорида.

Диэлектрические перчатки применяют в электроустановках до 1000 В как основное изолирующее электрозащитное средство при работах под напряжением, а в электроустановках выше 1000 В — как дополнительное электрозащитное средство при работах с помощью основных изолирующих электрозащитных средств (штанг, указателей высокого напряжения, изолирующих и электроизмерительных клещей и т. п.). Кроме того, перчатки используют без применения других электрозащитных средств при операциях с ручными приводами разъе-

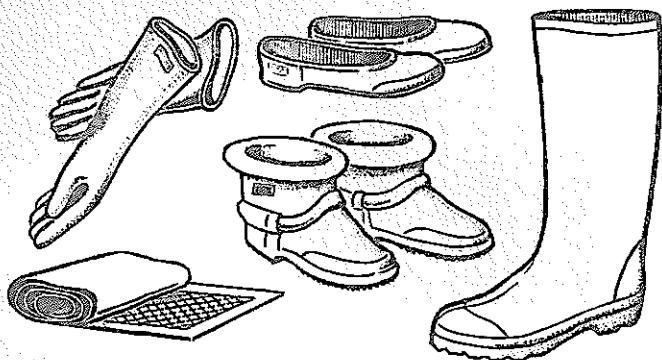


Рис. 8.12. Диэлектрические резиновые перчатки, галоши боты, ковер и сапоги

чителей, отделителей, выключателей и другой аппаратуры напряжением выше 1000 В.

Перчатки следует надевать на полную их глубину, натягивая раструб на рукава одежды. Недопустимо завертывать края перчаток или спускать поверх них рукава одежды.

Каждый раз перед применением перчатки следует проверять на герметичность путем заполнения их воздухом для выявления в них сквозных отверстий и надрывов, которые могут явиться причиной поражения человека током (рис. 8.13).

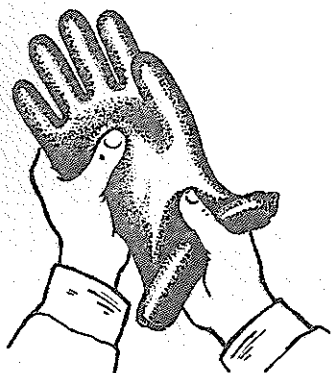


Рис. 8.13. Проверка перчаток на отсутствие сквозных отверстий и глубоких надрывов резины

Диэлектрические галоши и боты как дополнительные электрозащитные средства применяют в закрытых, а в сухую погоду и в открытых электроустановках при операциях, выполняемых с помощью основных электрозащитных средств. При этом боты можно использовать в электроустановках любого напряжения, а галоши — только в электроустановках до 1000 В включительно.

Кроме того, диэлектрические галоши и боты используют в качестве защиты от напряжения шага в электроустановках любого напряжения и типа,

в том числе в ОРУ и на воздушных линиях электропередачи.

Диэлектрические галоши и боты надевают на обычную обувь, которая должна быть чистой и сухой.

В настоящее время промышленность изготавливает также диэлектрические сапоги, являющиеся, как и диэлектрические галоши, дополнительным электрозащитным средством в электроустановках до 1000 В и средством защиты от напряжения шага в электроустановках любого напряжения. Диэлектрические галоши, боты и сапоги в отличие от бытовых не имеют лакового покрытия.

Диэлектрические ковры применяют при обслуживании электрооборудования в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных по условиям поражения током*. При этом помещения не должны быть сырыми и пыльными. Ковры расстилают на полу перед оборудованием в местах, где возможно соприкосновение с токоведущими частями, находящимися под напряжением до 1000 В, в том числе перед щитами и сборками, у колец и щеточных аппаратов генераторов и электродвигателей, на испытательных стендах и т. п. Их применяют также в местах, где производятся включение и отключение рубильников, разъединителей, выключателей, управление реостатами и другие операции с коммутационными и пусковыми аппаратами как до 1000 В, так и выше.

Диэлектрические ковры должны иметь размер не менее 50 × 50 см. В сырых и пыльных помещениях диэлектрические свойства их резко ухудшаются, поэтому в таких помещениях вместо ковров следует применять изолирующие подставки.

ж) Изолирующие подставки

Назначение подставок — изолировать человека от пола в установках любого напряжения. Применяют их в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных по условиям поражения током*.

Подставка представляет собой деревянный решетчатый настил размером не менее 50 × 50 см без металлических деталей, укрепленный на конусообразных фарфоровых или пластмассовых изоляторах, изготавливаемых специально для подставок (рис. 8.14).

* Классификация помещений по степени опасности поражения током приведена в § 12.1, с.

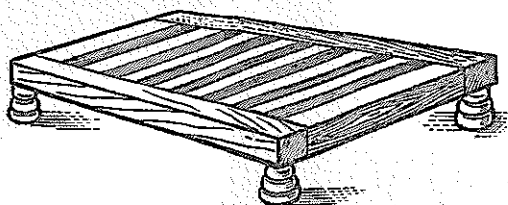


Рис. 8.14. Изолирующая подставка

Подставки применяют при операциях с предохранителями, пусковыми устройствами электродвигателей, приводами разъединителей и выключателей в закрытых электроустановках любого напряжения, если при этом не пользуются диэлектрическими перчатками. В сырых и пыльных помещениях они заменяют диэлектрические ковры.

з) Временные переносные защитные заземления

Назначение. При работах в электроустановках следует считаться с возможностью случайного появления напряжения на отключенных токоведущих частях на месте работ. Это может быть как по прямой вине персонала, так и по другим причинам, в том числе в результате влияния соседних цепей, находящихся в работе; вследствие разряда молнии непосредственно в установку или вблизи нее; в результате падения провода, находящегося под напряжением, на отключенные токоведущие части и т. п. Поэтому при таких работах наряду с мерами, предупреждающими ошибочное включение установки (запирание на замок ручных приводов коммутационных аппаратов, отключение оперативного тока и т. п.), должны быть приняты меры, исключающие поражение работающих током в случае появления по любой причине напряжения на отключенных токоведущих частях, на которых производятся работы. Основной и наиболее надежной мерой в этом случае является соединение накоротко между собой и заземление всех фаз отключенного участка установки с помощью стационарных заземляющих разъединителей, а там, где их нет — с помощью специальных переносных защитных заземлений. Благодаря этому на таком участке в случае его включения напряжение токоведущих частей одной относительно другой и относительно земли оказывается незначительным и, как правило, безопасным для человека. Вместе с тем возникший при этом ток КЗ между фазами

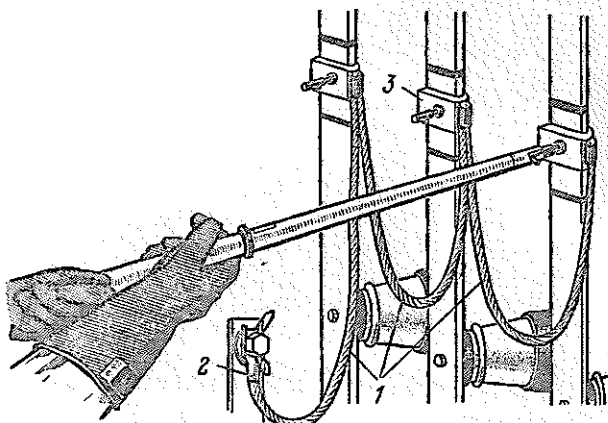


Рис. 8.15. Наложение временного переносного заземления на шины электроустановки с помощью изолирующей штанги:

1 — провод переносного заземления; 2 — наконечник для присоединения переносного заземления к заземляющей шине электроустановки; 3 — винтовой зажим для закрепления заземления на шинах

и ток замыкания на землю вызовут быстрое отключение установки релейной защитой от источника питания.

Конструкция. Переносное заземление — это один или несколько соединенных отрезков неизолированного медного многожильного провода, снабженных зажимами для присоединения к токоведущим частям и заземляющему устройству (рис. 8.15). Проводники переносного заземления должны иметь сечение, исключающее опасность их перегорания или чрезмерного нагревания при прохождении токов короткого замыкания. Наименьшее допустимое сечение их s_{min} , мм², равно

$$s_{min} = I_{уст} \sqrt{t_{\phi} / 272},$$

где $I_{уст}$ — установившийся ток КЗ, А; t_{ϕ} — фиктивное время прохождения установившегося тока КЗ (или наибольшая выдержка времени основной релейной защиты для данной электроустановки), с*.

При выводе этой формулы начальная и конечная температуры проводников приняты равными соответственно 30 и 850 °С.

* Фиктивное время — период, в течение которого установившийся ток КЗ выделяет в проводнике такое же количество теплоты, как затухающий ток КЗ за действительное время его протекания.

Независимо от результатов расчета сечения проводников заземления должны приниматься не больше эквивалентного сечения заземляемых токоведущих частей и не меньше 25 мм^2 для установок выше 1000 В и 16 мм^2 для установок до 1000 В .

Переносное заземление, применяемое для снятия заряда с токоведущих частей при проведении электрических испытаний электрооборудования, а также для заземления испытательной аппаратуры и испытываемого оборудования, должно иметь сечение не меньше 4 мм^2 , а применяемое для временного заземления изолированного от опор грозозащитного троса линий электропередачи, а также передвижных установок (лаборатории, мастерские и т. п.) — не меньше 10 мм^2 .

Правила пользования. Во избежание ошибок, ведущих к несчастным случаям и авариям, наложение переносного заземления на токоведущие части производят сразу после проверки отсутствия напряжения на этих частях. При этом должен соблюдаться следующий порядок. Сначала присоединяют к земле заземляющий проводник переносного заземления, затем указателем напряжения проверяют отсутствие напряжения на заземляемых токоведущих частях, после чего зажимы закорачивающих проводников переносного заземления с помощью изолирующей штанги накладывают на токоведущие части и закрепляют на них этой же штангой (рис. 8.15) или непосредственно руками в диэлектрических перчатках. В установках до 1000 В штангу можно не применять и наложение переносного заземления производить в диэлектрических перчатках в указанном порядке.

Снятие заземления выполняют в обратном порядке.

и) Временные переносные ограждения

Назначение временных ограждений: защита персонала, работающего в электроустановках, от случайного прикосновения и приближения на опасное расстояние к токоведущим частям, находящимся под напряжением; ограждение проходов в помещения, в которые вход работающим запрещен; предотвращение включения аппаратов.

Ограждениями являются специальные щиты, ограждения-клетки, изолирующие накладные, изолирующие колпаки и т. п.

Щиты и ограждения-клетки изготовляют из дерева или других изоляционных материалов без металлических креплений.

Сплошные щиты (рис. 8.16) предназначены для ограждения работающих от случайного приближения к токоведущим частям, находящимся под напряжением, а решетчатые — для ограждения входов в камеры, проходов в соседние помещения и т. п. Ограждения-клетки используют главным образом при работах в камерах масляных выключателей — при доливке, взятии проб масла и т. п.

Изолирующие накладки — пластины из резины (для установок до 1000 В) или гетинакса, текстолита и тому подобного материала (для установок выше 1000 В) — предназначены для предотвращения приближения к токоведущим частям в тех случаях, когда нельзя оградить место работы щитами, например для ограждения находящихся под напряжением неподвижных контактов отключенного разъединителя (рис. 8.17, а). В установках до 1000 В накладки применяют также для предупреждения ошибочного включения рубильника (рис. 8.17, б).

Изолирующие колаки изготовляют из резины и применяют в электроустановках напряжением 6—10 кВ для изолирования ножей однополюсных разъединителей, находящихся в отключенном положении, в целях предотвращения их ошибочного



Рис. 8.16. Временное переносное ограждение — сплошной деревянный щит

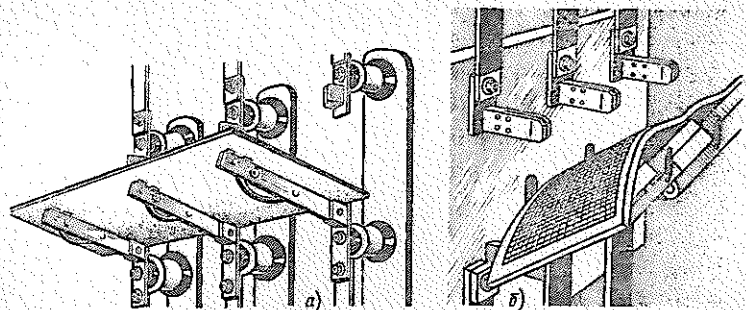


Рис. 8.17. Изолирующие накладки:

а — накладка из прочного изоляционного материала (текстолита, гетинакса и т. п.), закрывающая ножи отключенного разъединителя; б — накладка резиновая, закрывающая ножи отключенного рубильника

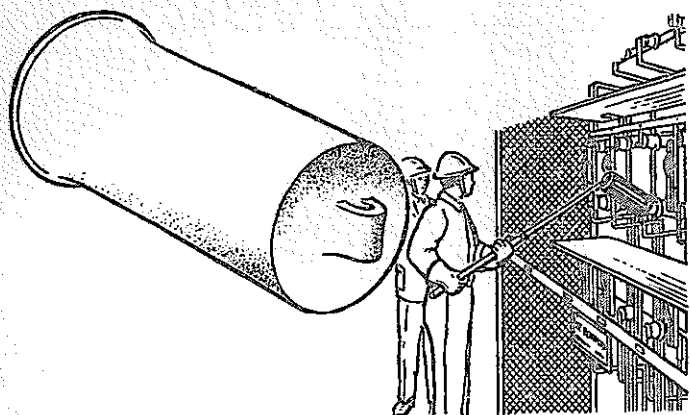


Рис. 8.18. Установка изолирующего колпака на нож отключенного однополюсного разъединителя с помощью штанги

включения. Колпаки особенно удобны для применения на сборках типа Мосэнерго с двумя и более однополюсными разъединителями, ножи которых расположены по вертикали один над другим (рис. 8.18).

8.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛИРУЮЩИХ ЭЛЕКТРОЗАЩИТНЫХ СРЕДСТВ

а) Условия, нормы и сроки испытаний

Для проверки диэлектрических свойств все изолирующие электрозащитные средства, находящиеся в эксплуатации, подвергают периодическим электрическим испытаниям повышенным напряжением. Лишь штанги, предназначенные исключительно для наложения временных заземлений и не имеющие металлических звеньев, и изолирующие подставки, а на объектах Минэнерго СССР еще и диэлектрические ковры периодическим испытаниям не подвергаются*. Испытания производят, как правило переменным током промышленной частоты (50 Гц).

* В электроустановках, на которые распространяется действие «Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей», диэлектрические ковры должны подвергаться периодическим электрическим испытаниям 1 раз в 2 года по нормам, установленным ГОСТ 4997-75 «Ковры диэлектрические резиновые. Технические условия».

Таблица 8.3. Нормы и сроки периодических электрических испытаний изолирующих электрозащитных средств, находящихся в эксплуатации

Электрозащитные средства	Напряжение электроустановки, кВ	Испытательное напряжение, кВ	Продолжительность испытания, мин	Ток утечки, мА, не более	Сроки периодических испытаний, мес
1. Перчатки резиновые диэлектрические	Любое	6	1	6	6
2. Галоши резиновые диэлектрические	До 1	3,5	1	2	12
3. Боты резиновые диэлектрические	Любое	15	1	7,5	36
4. Ковры резиновые диэлектрические	Любое	В соответствии с ГОСТ 4997-75			24
5. Инструмент слесарно-монтажный с изолирующими рукоятками	До 1	2	1	—	12
6. Указатели напряжения до 1000 В	До 0,5	1	1	—	12
7. Указатели напряжения выше 1000 В с неоновой лампой: изолирующая часть	2—35	$3U_n$, но не менее 40	5	—	12
рабочая часть	35—220	$3U_{ф}$	5	—	12
	2—10	20	1	—	12
	6—20	40	1	—	12
8. Указатели напряжения выше 1000 В бесконтактного типа (изолирующая часть)	10—35	70	1	—	12
	6—35	105	5	—	24
9. Указатели напряжения для фазировки:					
изолирующая часть	3—10	40	5	—	12
	6—20	40	5	—	12
	35—110	190	5	—	12
рабочая часть	3—10	20	1	—	12
	6—20	40	1	—	12
	35	70	1	—	12
	110	140	1	—	12
соединительный провод	3—10	20	1	—	12
	6—20	20	1	—	12
	35—110	30	1	—	12

Продолжение табл. 8.3.

Электрозащитные средства	Напряжение электроустановки, кВ	Испытательное напряжение, кВ	Продолжительность испытания, мин	Ток утечки, мА, не более	Сроки периодических испытаний, мес
10. Изолирующие штанги (кроме измерительных)	Ниже 110	$3U_{\text{л}}$, но не менее 40	5	—	24
11. Измерительные штанги	110—500	$3U_{\text{ф}}$	5	—	24
	Ниже 110	$3U_{\text{л}}$, но не менее 40	5	—	См. примечание 9
12. Головки измерительных штанг	110—500	$3U_{\text{ф}}$	5	—	То же
	35—500	30	5	—	То же
13. Продольные и поперечные планки ползунковых головок и изолирующий капроновый канатик измерительных штанг	220—500	2,2I	5	—	То же
14. Изолирующие штанги составные с металлическими звеньями для наложения заземления на провод ВЛ 330—500 кВ. Изолирующая часть	330—500	100	5	—	24
15. Изолирующие клещи	До 1	2	5	—	24
	2—35	$3U_{\text{л}}$, но не менее 40	5	—	24
16. Электронизмерительные клещи	До 0,66	2	5	—	24
	До 10	40	5	—	24
17. Изолирующие накладки:					
жесткие	До 1	2	1	—	24
	До 10	20	5	—	24
	До 15	30	5	—	24
	До 20	40	5	—	24
резиновые	До 1	2	1	6,0	24

Примечания: 1. $U_{\text{л}}$ и $U_{\text{ф}}$ — линейное и фазное напряжения электроустановки, кВ.

2. К п. 4. Ковры резиновые диэлектрические испытываются путем протягивания их между вращающимися цилиндрическими электродами со скоростью 3 см/с (рис. 8.21). Периодические электрические испытания ковров обязательны для предприятий и организаций, на которые распространяются «Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей».

3. К п. 6. В таблице приведены нормы испытания электрической прочности изоляции корпусов и соединительного провода указателя напряжения. Одновременно должны проверяться порог зажигания указателя, который должен быть не выше 90 В, и исправность его схемы.

Продолжение табл. 8.3

4. К п. 7. Одновременно следует проверять порог зажигания указателя, который должен быть не выше: 550 В для указателей 2—10 кВ; 1,5 кВ для указателей 6—20 кВ; 2,5 кВ для указателей 10—35 кВ и 9 кВ для указателей 110—220 кВ.

5. К п. 8. Одновременно следует испытывать рабочую часть указателя.

6. К п. 9. Одновременно проверяют порог зажигания при схемах согласно и встречного включения.

7. К пп. 10 и 16. Продолжительность испытания изолирующих штанг и электроизмерительных клещей, имеющих изолирующую часть из фарфора, может быть сокращена до 1 мин.

8. К п. 10. Изолирующие штанги, применяемые в комплекте с указателем напряжения или другим инструментом и приспособлением, должны испытываться по нормам, установленным для изолирующих штанг на соответствующее напряжение и в те же сроки.

9. К пп. 11—13. Измерительные штанги и их элементы (головки, планки, изолирующий канатик) должны испытываться 1 раз в 12 мес. а в сезон измерений 1 раз в 3 мес. в том числе перед началом сезона.

10. К п. 13. / — длина планки или канатика, см.

11. К п. 14. Другие штанги, предназначенные исключительно для наложения заземлений, электрическим испытаниям не подвергаются.

Испытания резиновых перчаток, бот, галош, колпаков и др., являющиеся испытанием на пробой, можно производить не только переменным, но и постоянным током, который дает лучшие результаты по обнаружению зарождающихся дефектов в резине (трещин, порезов и т. п.) и выявлению скрытого брака, допущенного при изготовлении (пустоты в толще резины, местное уменьшение толщины и т. п.). При постоянном токе испытательное напряжение должно быть в 2,5 раза больше, чем при переменном. Объясняется это тем, что пробивное напряжение твердых диэлектриков при постоянном токе примерно в 2,5 раза выше, нежели при переменном (исключение составляют весьма тонкие образцы, для которых пробивное напряжение практически одинаково при постоянном и переменном токе). Следует отметить, что при испытании на пробой переменным током состояние изоляции резиновых изделий довольно точно оценивается не только приложенным напряжением, но и значением токов утечки через толщу резины, поскольку, как известно, диэлектрические потери со временем возрастают.

При постоянном же токе такую оценку по токам утечки сделать нельзя, поэтому эти токи не нормируются.

Испытания производят при комнатной температуре. Такую же температуру должны иметь и испытуемые объекты. После успешного испытания защитные средства (исключая инструмент с изолирующими рукоятками и указатели напряжения до 1000 В) снабжают штампом, удостоверяющим пригодность их к использованию по назначению.

Нормы и сроки периодических испытаний указаны в табл. 8.3.

6) Производство испытаний

Испытание штанг, изолирующих и электроизмерительных клещей является испытанием их изолирующей части на перекрытие по поверхности. С этой целью один провод от испытательного трансформатора присоединяют к рабочей части электрозащитного средства, а другой — к изолирующей части на границе рукоятки, выше упорного коль-

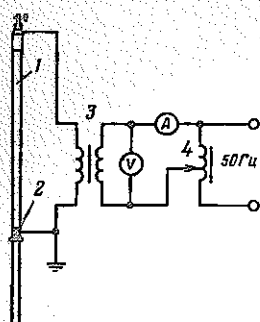
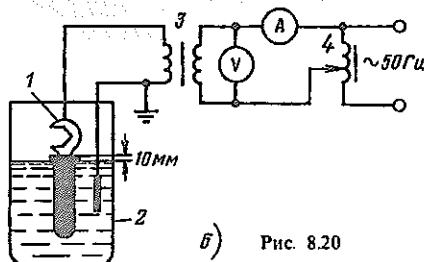
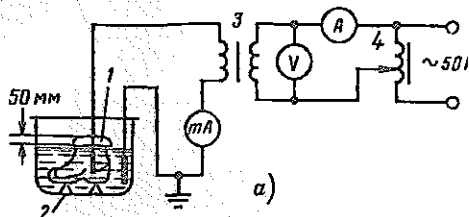


Рис. 8.19. Принципиальная схема испытания изолирующей штанги повышенным напряжением:

1 — испытываемая штанга; 2 — временный электрод (фольга); 3 — испытательный трансформатор; 4 — регулятор напряжения



б) Рис. 8.20

Рис. 8.20. Принципиальные схемы испытания диэлектрических бот, галош, перчаток, колпаков (а) и слесарно-монтажного инструмента с изолирующими рукоятками (б):

1 — испытуемое защитное средство; 2 — ванна с водой; 3 — испытательный трансформатор; 4 — регулятор напряжения

ца, где для этого из полоски фольги наматывают временный электрод (рис. 8.19).

Штанга и клещи считаются выдержавшими испытания, если в течение всего периода нахождения их под испытательным напряжением на их поверхности не возникали электрические разряды и не было отмечено колебаний в показаниях приборов (вольтметра, амперметра). Кроме того, при ощупывании изолирующей части рукой сразу после снятия испытательного напряжения не должно ощущаться местных нагревов.

Испытание диэлектрических резиновых перчаток, бот, галош и колпаков является испытанием на пробой. Его выполняют с помощью специальной установки, в которой главным элементом кроме испытательного трансформатора является ванна — сосуд с водой. Испытуемые средства заполняют водой и погружают в ванну. При этом уровень воды как снаружи, так и внутри должен быть на 50 мм ниже края перчатки и колпака, а также отворота бот и на 10 мм ниже края борта галош, установленных горизонтально. Выступающие над водой края испытуемых средств должны быть сухими. Один электрод опускают внутрь изделия, другой — в воду (рис. 8.20, а). Воду применяют обычную водопроводную без каких-либо добавок.

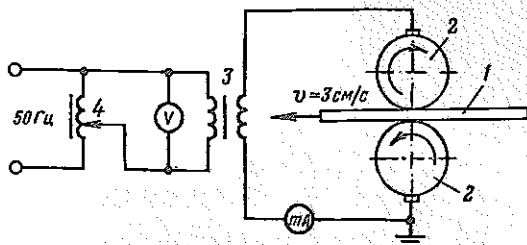


Рис. 8.21. Принципиальная схема установки для испытания диэлектрического ковра на пробой:

1 — испытуемый ковёр; 2 — цилиндрические электроды; 3 — испытательный трансформатор; 4 — регулятор напряжения

Изделие считается выдержавшим испытание, если не произошло его пробоя и показания миллиамперметра не превышали установленных норм.

Испытание слесарно-монтажного инструмента с изолирующими рукоятками является испытанием изоляции рукояток на пробой и производится аналогично испытанию перчаток с погружением в воду большей части изолированных рукояток (рис. 8.20, б).

Испытание диэлектрического резинового ковра на пробой производится обычно путем его протягивания со скоростью 3 см/с между двумя вращающимися цилиндрическими электродами, к которым приложено испытательное напряжение (рис. 8.21).

Испытание указателя напряжения выше 1000 В заключается в испытании изолирующей части на перекрытие по поверхности и производится аналогично испытанию штанг. Кроме того, испытанию подвергается и рабочая часть указателя, для чего к ней прикладывается повышенное напряжение на 1 мин. При этом проверяется исправность неоновой лампы и определяется порог ее зажигания.

Испытание указателя напряжения до 1000 В заключается в испытании изоляции рукояток и соединяющего их провода на пробой и в проверке схемы указателя повышенным напряжением, определении порога зажигания лампы и измерении тока, проходящего через указатель при наибольшем его рабочем напряжении.

Глава 9

ЗАЩИТА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

9.1. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Влияние поля на здоровье людей. В процессе эксплуатации электроэнергетических установок — открытых распределительных устройств (ОРУ) и воздушных линий (ВЛ) электропередачи сверхвысокого напряжения (330 кВ и выше) было отмечено ухудшение состояния здоровья персонала, обслуживающего указанные установки. Субъективно это выражалось в ухудшении самочувствия работающих, которые жаловались на повышенную утомляемость, вялость, головные боли, плохой сон, боли в сердце и т. п.

Специальные наблюдения и исследования, проводимые в Советском Союзе и за рубежом, подтвердили обоснованность этих жалоб и установили, что фактором, влияющим на здоровье обслуживающего персонала, является электромагнитное поле, возникающее в пространстве вокруг токоведущих частей действующих электроустановок.

В электроустановках напряжением меньше 330 кВ также возникают электромагнитные поля, но менее интенсивные и, как показал длительный опыт эксплуатации таких установок, не оказывающие отрицательного влияния на биологические объекты.

Интенсивное электромагнитное поле промышленной частоты вызывает у работающих нарушение функционального состояния центральной нервной и сердечно-сосудистой системы, а также периферической крови. При этом наблюдается повышенная утомляемость, снижение точности рабочих движений, изменение кровяного давления и пульса, возникновение болей в сердце, сопровождающихся сердцебиением и аритмией, и т. п.

Эффект воздействия электромагнитного поля на биологический объект принято оценивать количеством электромагнитной энергии, поглощаемой этим объектом при нахождении его в поле.

Электромагнитное поле можно рассматривать как состоящее из двух полей: электрического и магнитного. Можно также считать, что в электроустановках электрическое поле возникает при напряжении на токоведущих частях, а магнитное — при прохождении тока по этим частям.

Допустимо считать, что при малых частотах, в том числе 50 Гц, электрическое и магнитное поля не связаны, поэтому их можно рассматривать раздельно, как и оказываемые ими влияния на биологический объект.

Выполненные для действительных условий расчеты показали, что в любой точке электромагнитного поля, возникающего в электроустановках промышленной частоты, поглощенная телом человека энергия магнитного поля примерно в 50 раз меньше поглощенной им энергии электрического поля. Вместе с тем измерениями в реальных условиях было установлено, что напряженность магнитного поля в рабочих зонах ОРУ и ВЛ напряжением до 750 кВ включительно не превышает 25 А/м, в то время как вредное действие магнитного поля на биологический объект проявляется при напряженности, во много раз большей.

На основании этого был сделан вывод, что отрицательное действие на организм человека электромагнитного поля в электроустановках промышленной частоты обусловлено электрическим полем; магнитное же поле оказывает незначительное биологическое действие, и в практических условиях им можно пренебречь.

Электрическое поле электроустановок промышленной частоты можно рассматривать в каждый данный момент как электростатическое поле, т. е. применять к нему законы электростатики. Это поле создается по крайней мере между двумя электродами (телами), которые несут заряды разных знаков и на которых начинаются и оканчиваются силовые линии.

Поле электроустановок неравномерное, т. е. напряженность его изменяется вдоль силовых линий. Вместе с тем оно обычно несимметричное, поскольку возникает между электродами различной формы, например между токоведущей частью и землей или металлической заземленной конструкцией.

Поле воздушной линии электропередачи можно считать, кроме того, плоскопараллельным, т. е. форма его одинакова в параллельных плоскостях, называемых плоскостями поля. В данном случае плоскости поля перпендикулярны оси линии.

Механизм биологического действия электрического поля на организм человека изучен недостаточно. Предполагается, что

нарушение регуляции физиологических функций организм обусловлено воздействием поля на различные отделы нервной системы. При этом повышение возбудимости центральной нервной системы происходит вследствие рефлекторного действия поля, а тормозной эффект — результат прямого воздействия поля на структуры головного и спинного мозга. Считается, что кора головного мозга, а также промежуточный мозг особенно чувствительны к воздействию электрического поля.

Предполагается также, что основным материальным фактором, вызывающим указанные изменения в организме, является индуцируемый в теле ток, а влияние самого электрического поля значительно меньше.

Наряду с биологическим действием электрическое поле обуславливает возникновение разрядов между человеком и металлическим предметом, имеющим иной, чем человек, потенциал

Если человек стоит непосредственно на земле или на токопроводящем заземленном основании, то потенциал его тела практически равен нулю, а если он изолирован от земли, то тело оказывается под некоторым потенциалом, достигающим иногда нескольких киловольт.

Очевидно, что прикосновение человека, изолированного от земли, к заземленному металлическому предмету, равно как и человека, имеющего контакт с землей, к металлическому предмету, изолированному от земли, сопровождается прохождением через человека в землю разрядного тока, который может вызывать болезненные ощущения, особенно в первый момент. Часто прикосновение сопровождается искровым разрядом.

В случае прикосновения к изолированному от земли металлическому предмету большой протяженности (трубопровод, проволочная ограда на деревянных стойках и т. п.) или большого размера (крыша деревянного здания и пр.) ток, проходящий через человека, может достигать значений, опасных для жизни.

9.2. НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

В разных точках пространства вблизи электроустановок промышленной частоты напряженность электрического поля имеет разные значения. Она зависит от ряда факторов: номинального напряжения электроустановки; расстояния между точкой, в которой определяется напряженность поля, и токоведущими частями; высоты размещения над землей токоведущих частей и интересующей нас точки и т. п.

Напряженность может быть измерена с помощью специальных приборов, а в некоторых случаях, например вблизи воздушных линий электропередачи, определена расчетом.

В качестве примера найдем выражение напряженности электрического поля, создаваемого трехфазной ВЛ с горизонтальным расположением проводов.

Для упрощения примем, что линия не имеет грозозащитных тросов или они изолированы от опор в целях использования их, например, для отбора мощности. В результате этого тросы не оказывают существенного влияния на электрическое поле проводов. При этом условия вычисленные значения напряженности поля будут несколько завышенными по сравнению с фактическими, что в итоге ужесточает требования безопасности и поэтому допустимо.

Из курса электротехники известно, что напряженность электрического поля уединенного бесконечно длинного прямолинейного проводника, заряженного равномерно по длине, выражается следующей зависимостью, В/м:

$$E = \tau / 2\pi\epsilon_0 m,$$

где τ — линейная плотность заряда провода, Кл/м; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная; m — кратчайшее расстояние от провода до точки, в которой определяется напряженность, м.

Известно также, что вектор напряженности поля $\vec{E}$ совпадает с линией, соединяющей интересующую нас точку с проводником по кратчайшему расстоянию. При этом если проводник несет положительный заряд, то вектор напряженности $\vec{E}$ будет направлен от проводника, а при отрицательном заряде — к проводнику.

В нашем примере провода ВЛ, которые мы уподобляем упомянутым бесконечно длинным прямолинейным проводникам, расположены вблизи плоской поверхности проводящей среды, каковой является земля. Поэтому поле ВЛ будет создаваться не только зарядами проводов, но и зарядами их зеркальных изображений. При этом вектор напряженности суммарного поля будет равен геометрической сумме векторов напряженностей полей всех зарядов.

Рассмотрим вначале одну фазу линии, например фазу A (рис. 9.1), приняв заряд провода положительным $+\tau_A$, а заряд его зеркального изображения отрицательным $-\tau_A$.

Модуль (т. е. длина, абсолютное значение) вектора напряженности электрического поля в некоторой точке P , обусловленного зарядом $+\tau_A$, В/м,

$$E_{A(+)} = \tau_A / 2\pi\epsilon_0 m_A, \quad (9.1)$$

а обусловленного зарядом $-\tau_A$, В/м,

$$E_{A(-)} = \tau_A / 2\pi\epsilon_0 n_A. \quad (9.2)$$

Здесь m_A и n_A — кратчайшие расстояния от точки P до провода (фазы) A и его зеркального изображения соответственно, м.

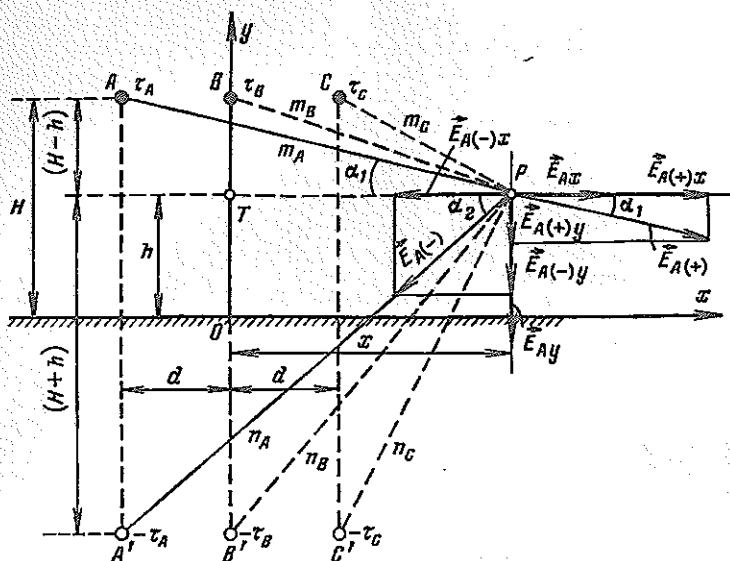


Рис. 9.1. К вычислению напряженности электрического поля вблизи воздушной линии электропередачи в точке P :

A, B, C — фазы (провода) линии; A', B', C' — зеркальные изображения фаз; m_A, m_B, m_C — кратчайшие расстояния от точки P до фаз линий; n_A, n_B, n_C — кратчайшие расстояния от точки P до зеркальных изображений фаз.

Теперь разложим векторы $\vec{E}_{A(+)}$ и $\vec{E}_{A(-)}$ на их составляющие по горизонтали $\vec{E}_{A(+)}x$ и $\vec{E}_{A(-)}x$ и вертикали $\vec{E}_{A(+)}y$ и $\vec{E}_{A(-)}y$ (см. рис. 9.1).

Модули этих векторов, как следует из построения, равны, В/м,

$$E_{A(+)}x = E_{A(+)} \cos \varphi_1 = E_{A(+)}(x + d)/m_A;$$

$$E_{A(-)}x = E_{A(-)} \cos \varphi_2 = E_{A(-)}(x + d)/n_A;$$

$$E_{A(+)}y = E_{A(+)} \sin \varphi_1 = E_{A(+)}(H - h)/m_A;$$

$$E_{A(-)}y = E_{A(-)} \sin \varphi_2 = E_{A(-)}(H + h)/n_A.$$

где x — расстояние по горизонтали от оси линии до точки P , м; d — расстояние между осями соседних проводов линии, м; H — высота размещения провода над землей (при более точных расчетах — над проводящим слоем грунта), м; h — высота точки P над землей, м.

Далее путем сложения векторов $\vec{E}_{A(+)}x$ и $\vec{E}_{A(-)}x$ а также векторов $\vec{E}_{A(+)}y$ и $\vec{E}_{A(-)}y$ получаем векторы $\vec{E}_{Ax}$ и $\vec{E}_{Ay}$, которые являются соответственно горизонтальной и вертикальной составляющими вектора напряженности поля фазы A (с учетом ее зеркального изображения) в точке P .

При этом, поскольку векторы $\vec{E}_{A(+)}x$ и $\vec{E}_{A(-)}x$ имеют противоположные направления (см. рис. 9.1), модуль суммарного вектора $\vec{E}_{Ax}$ будет равен разности модулей этих векторов, В/м:

$$E_{Ax} = E_{A(+)}(x+d)/m_A - E_{A(-)}(x+d)/n_A.$$

Модуль вектора $\vec{E}_{Ay}$, В/м, равен сумме модулей векторов $\vec{E}_{A(+)}y$ и $\vec{E}_{A(-)}y$, поскольку они направлены в одну сторону:

$$E_{Ay} = E_{A(+)}(H-h)/m_A + E_{A(-)}(H+h)/n_A.$$

Заменив в этих выражениях $E_{A(+)}$ и $E_{A(-)}$ их значениями из (9.1) и (9.2), получим, В/м,

$$E_{Ax} = \frac{\tau_A}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{x+d}{m_A^2} - \frac{x+d}{n_A^2} \right);$$

$$E_{Ay} = \frac{\tau_A}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{H-h}{m_A^2} + \frac{H+h}{n_A^2} \right).$$

Поскольку мы рассматриваем ВЛ переменного тока, заряд провода τ_A , а следовательно, и напряженности E_{Ax} и E_{Ay} являются синусоидальными функциями времени, т. е. мы можем изображать их комплексными величинами, что удобнее при дальнейшем изложении материала.

Для перевода последних двух уравнений в комплексную форму достаточно буквенные обозначения заряда и напряженностей написать с точками над ними.

Учитывая, что

$$\dot{\tau}_A = C_A \dot{U}_A$$

и производя эту замену в последних уравнениях, получаем окончательные выражения в комплексной форме для горизонтальной и вертикальной составляющих вектора напряженности поля фазы A (с учетом ее зеркального изображения) в точке P , В/м:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{Ax} &= \frac{C_A \dot{U}_A}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{x+d}{m_A^2} - \frac{x+d}{n_A^2} \right) = \frac{C_A \dot{U}_A}{2\pi\epsilon_0} k_1; \\ \dot{E}_{Ay} &= \frac{C_A \dot{U}_A}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{H-h}{m_A^2} + \frac{H+h}{n_A^2} \right) = \frac{C_A \dot{U}_A}{2\pi\epsilon_0} k_2, \end{aligned} \quad (9.3)$$

где C_A — емкость фазы A относительно земли, Ф/м; $\dot{U}_A$ — комплекс напряжения фазы A относительно земли (эффективное значение фазного напряжения), В; k_1, k_2 — коэффициенты.

Аналогично получим выражения для горизонтальных и вертикальных составляющих напряженностей полей двух других фаз линии В и С, В/м:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{Bx} &= \frac{C_B \dot{U}_B}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{x}{m_B^2} - \frac{x}{n_B^2} \right) = \frac{C_B \dot{U}_B}{2\pi\epsilon_0} k_3; \\ \dot{E}_{By} &= \frac{C_B \dot{U}_B}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{H-h}{m_B^2} + \frac{H+h}{n_B^2} \right) = \frac{C_B \dot{U}_B}{2\pi\epsilon_0} k_4; \\ \dot{E}_{Cx} &= \frac{C_C \dot{U}_C}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{x-d}{m_C^2} - \frac{x-d}{n_C^2} \right) = \frac{C_C \dot{U}_C}{2\pi\epsilon_0} k_5; \\ \dot{E}_{Cy} &= \frac{C_C \dot{U}_C}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{H-h}{m_C^2} + \frac{H+h}{n_C^2} \right) = \frac{C_C \dot{U}_C}{2\pi\epsilon_0} k_6. \end{aligned} \right\} \quad (9.4)$$

Горизонтальная и вертикальная составляющие напряженности суммарного поля, В/м, т. е. обусловленные зарядами всех фаз линии и их зеркальных изображений, будут равны

$$\begin{aligned} \dot{E}_x &= \dot{E}_{Ax} + \dot{E}_{Bx} + \dot{E}_{Cx}; \\ \dot{E}_y &= \dot{E}_{Ay} + \dot{E}_{By} + \dot{E}_{Cy}. \end{aligned}$$

Подставляем в эти уравнения соответствующие значения из (9.3) и (9.4). При этом с учетом того, что для линий с горизонтальным расположением проводов

$$C_A = C_B = C_C = C$$

и для симметричной трехфазной системы

$$\dot{U}_A = U_\phi; \quad \dot{U}_B = a^2 U_\phi; \quad \dot{U}_C = a U_\phi,$$

где U_ϕ — фазное напряжение линии, В; a — фазовый оператор:

$$a = -1/2 + j\sqrt{3}/2,$$

получим, В/м,

$$\begin{aligned} \dot{E}_x &= \frac{CU_\phi}{2\pi\epsilon_0} (k_1 + a^2 k_3 + a k_5); \\ \dot{E}_y &= \frac{CU_\phi}{2\pi\epsilon_0} (k_2 + a^2 k_4 + a k_6). \end{aligned}$$

После простейших преобразований будем иметь, В/м,

$$\begin{aligned} \dot{E}_x &= \frac{CU_\phi}{4\pi\epsilon_0} [(2k_1 - k_3 - k_5) - j\sqrt{3}(k_3 - k_5)]; \\ \dot{E}_y &= \frac{CU_\phi}{4\pi\epsilon_0} [(2k_2 - k_4 - k_6) - j\sqrt{3}(k_4 - k_6)]. \end{aligned}$$

или в действительной форме, В/м,

$$E_x = \frac{CU_\phi}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{(2k_1 - k_3 - k_5)^2 + 3(k_3 - k_5)^2};$$

$$E_y = \frac{CU_\phi}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{(2k_2 - k_4 - k_6)^2 + 3(k_4 - k_6)^2}.$$

Искомая напряженность электрического поля, В/м, трехфазной воздушной линии электропередачи с горизонтальным расположением проводов

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

или

$$E = \frac{CU_\phi}{4\pi\epsilon_0} \times \sqrt{(2k_1 - k_3 - k_5)^2 + 3(k_3 - k_5)^2 + (2k_2 - k_4 - k_6)^2 + 3(k_4 - k_6)^2}. \quad (9.5)$$

Коэффициенты k имеют следующие значения:

$$k_1 = \frac{x+d}{m_A^2} - \frac{x+d}{n_A^2}; \quad k_2 = \frac{H-h}{m_A^2} + \frac{H+h}{n_A^2};$$

$$k_3 = \frac{x}{m_B^2} - \frac{x}{n_B^2}; \quad k_4 = \frac{H-h}{m_B^2} + \frac{H+h}{n_B^2};$$

$$k_5 = \frac{x-d}{m_C^2} - \frac{x-d}{n_C^2}; \quad k_6 = \frac{H-h}{m_C^2} + \frac{H+h}{n_C^2}.$$

Отрезки m и n являются гипотенузами соответствующих прямоугольных треугольников (рис. 9.1) и определяются следующими уравнениями, м:

$$m_A = \sqrt{(x+d)^2 + (H-h)^2}; \quad n_A = \sqrt{(x+d)^2 + (H+h)^2};$$

$$m_B = \sqrt{x^2 + (H-h)^2}; \quad n_B = \sqrt{x^2 + (H+h)^2};$$

$$m_C = \sqrt{(x-d)^2 + (H-h)^2}; \quad n_C = \sqrt{(x-d)^2 + (H+h)^2}.$$

Высота размещения провода над землей H должна приниматься равной фактической высоте размещения участка (точки) провода, ближайшего к точке P , поскольку на формирование поля в этой точке основное влияние оказывает ближайший участок

провода (рис. 9.2). Эта высота, м, определяется из следующего выражения:

$$H = H_n - \frac{4fx}{l} \left(1 - \frac{x}{l}\right),$$

где H_n — высота крепления провода на опоре, м; $f = H_n - H_0$ — стрела провеса провода, м; H_0 — габарит линии (наименьшее расстояние от проводов до земли), м; x — расстояние по горизонтали от опоры до интересующей нас точки провода, м; l — длина пролета линии, м.

Емкость фазы трехфазной линии с горизонтальным расположением проводов относительно земли на единицу длины линии, Ф/м, определяется следующим известным выражением:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2H_{cp}d}{r\sqrt{(4H_{cp}^2 + d^2)\sqrt{H_{cp}^2 + d^2}}}}, \quad (9.6)$$

где H_{cp} — средняя высота подвеса проводов над поверхностью земли, м:

$$H_{cp} = H_n - 2f/3 = (H_n + 2H_0)/3.$$

Пренебрегая влиянием земли, т. е. полагая $H_{cp} \gg d$, получаем упрощенное выражение, Ф/м,

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{d\sqrt{2}}{r}}, \quad (9.7)$$

где r — радиус провода, м.

При расщепленных фазах, состоящих каждая из n проводов радиусом r_0 , м, с расстоянием между ними (шаг расщепления) a , м, вместо r в (9.6) и (9.7) надо подставить эквивалентный радиус $r_{\text{экв}}$, м:

$$r_{\text{экв}} = P \sqrt[n]{r_0 a^{n-1}}, \quad (9.8)$$

где P — поправочный коэффициент.

При $n=2$ и $n=3$ коэффициент $P=1$, а при $n=4$ $P=1,09$.

Пример 9.1. Определить напряженность электрического поля на высоте $h=2$ м от земли на разных расстояниях от оси линии 500 кВ в середине промежуточного пролета. Линия имеет горизонтальное расположение проводов с расстоянием между ними $d=10,5$ м; фазы — расщепленные, состоящие из трех проводов АСО-500 радиусом $r_0 = 0,0151$ м с шагом расщепления $a=0,40$ м. Высота подвеса проводов на опоре $H_n=22$ м, габарит линии $H_0=8,65$ м, средняя высота подвеса проводов над землей $H_{cp}=13,1$ м. Грозозащитные тросы изолированы от опор, поэтому влияние их на электрическое поле проводов не учитываем.

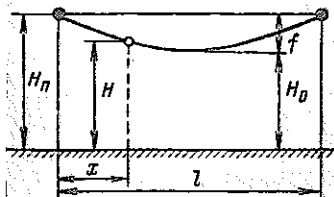


Рис. 9.2. К определению высоты размещения провода над землей H на разных расстояниях от опоры x

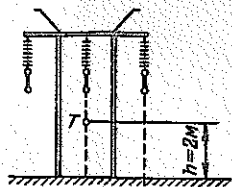
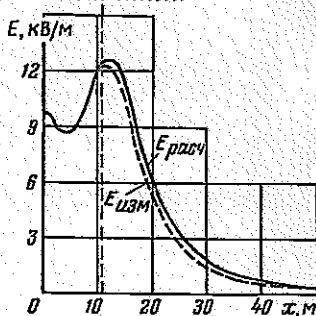


Рис. 9.3. К вычислению напряженности электрического поля на разных расстояниях от оси линии 500 кВ (на высоте 2 м от земли)



Решение. Предварительно определяем емкость фазы относительно земли по (9.6):

$$C = \frac{2\pi \cdot 8,65 \cdot 10^{-12}}{\ln \frac{2 \cdot 13,1 \cdot 10,5}{\sqrt[3]{0,0151 \cdot 0,4^2} \sqrt[3]{(4 \cdot 13,1^2 + 10,5^2)} \sqrt[3]{13,1^2 + 10,5^2}}} = 12 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.}$$

Теперь по уравнению (9.5) находим напряженность поля в интересующих нас точках. При этом, поскольку напряженность поля требуется определить в середине пролета, высоту H принимаем равной габариту линии, т. е. 8,65 м.

Вначале вычислим напряженность E в точке T , находящейся под средней фазой на высоте 2 м от земли (рис. 9.3). Для этой точки $x = 0$ (см. также рис. 9.1), а отрезки m и n равны

$$m_A = m_C = \sqrt{(8,65 - 2)^2 + 10,5^2} = \sqrt{131,9} \text{ м;}$$

$$n_A = n_C = \sqrt{(8,65 + 2)^2 + 10,5^2} = \sqrt{223,6} \text{ м;}$$

$$m_B = 8,65 - 2 = 6,65 \text{ м; } n_B = 8,65 + 2 = 10,65 \text{ м.}$$

Коэффициенты k для точки T будут равны

$$k_1 = 10,5/131,9 - 10,5/223,6 = 3,28 \cdot 10^{-2};$$

$$k_2 = 6,65/131,9 + 10,65/223,6 = 9,8 \cdot 10^{-2};$$

$$k_3 = 0;$$

$$k_4 = \frac{6,65}{6,65^2} + \frac{10,65}{10,65^2} = 24,42 \cdot 10^{-2};$$

$$k_5 = \frac{-10,5}{131,9} - \frac{-10,5}{223,6} = -3,28 \cdot 10^{-2};$$

$$k_6 = \frac{6,65}{131,9} + \frac{10,65}{223,6} = 9,8 \cdot 10^{-2}.$$

Подставив численные значения величин, входящих в выражении (9.5), получим значение напряженности электрического поля в точке

$$E = \frac{12 \cdot 10^{-12} \cdot 500 \cdot 10^3}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \sqrt{3}} \times \\ \times \sqrt{10^4 [(2 \cdot 3,28 + 3,28)^2 + 3 \cdot 3,28^2 + (2 \cdot 9,8 - 24,42 - 9,8)^2 + \\ + 3 (24,42 - 9,8)^2]} = 9700 \text{ В/м} = 9,7 \text{ кВ/м}.$$

Аналогичным путем определяем напряженность поля в других точках (при разных значениях x). Результаты расчета изображаем в виде кривой $E_{\text{расч}}$ на рис. 9.3. Там же приведена кривая $E_{\text{изм}}$, построенная по данным измерений на линии 500 кВ.

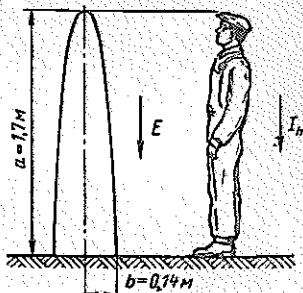
9.3. ТОК, ПРОХОДЯЩИЙ ЧЕРЕЗ ЧЕЛОВЕКА В ЗЕМЛЮ

Через тело человека, находящегося вблизи действующих электроустановок переменного тока, т. е. в области создаваемого ими электрического поля, постоянно проходит в землю ток. При этом, если человек не изолирован от земли, т. е. стоит в токопроводящей обуви непосредственно на земле или проводящем основании, соединенном с нею, ток будет стекать в землю через площадь соприкосновения человека с землей. Если же человек изолирован от земли [стоит на сухой доске, имеет на ногах изолирующую (резиновую) обувь, поднимается по деревянной опоре ВЛ и т. п.], ток в землю будет стекать через емкостную связь между телом человека и землей.

В обоих случаях значение тока практически одинаково, при условии что человек находится на одном и том же месте и не слишком высоко над землей.

Значение тока, проходящего через человека, зависит от номинального напряжения электроустановки, места нахождения человека относительно токоведущих частей и земли и ряда других факторов.

рис. 9.4. Размещение на земле электрического поле половины эллипсоида вращения, эквивалентной по объему и высоте телу человека среднего роста



Найдем выражение этого тока, обозначив его через I_h , для случая, когда человек стоит непосредственно на земле в токопроводящей обуви.

Предварительно делаем следующие допущения:

1) заменяем тело человека равной ему по высоте и объему половиной вытянутого эллипсоида вращения (овоида) с полуосями a и b , стоящего на земле так, что большая полуось его перпендикулярна поверхности земли (рис. 9.4);

2) материал эллипсоида принимаем однородным с электропроводностью, равной средней электропроводности тела человека. Однако вначале будем считать, что полуэллипсоид выполнен из непроводящего материала с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r ;

3) электрическое поле до внесения в него полуэллипсоида полагаем однородным, поэтому результирующее поле внутри непроводящего полуэллипсоида будет также однородным;

4) вектор напряженности внешнего электрического поля E считаем направленным вертикально, т. е. вдоль большой полуоси эллипсоида.

Размеры половины эллипсоида, эквивалентной телу человека, найдем, зная высоту и объем тела человека среднего роста*: $l_h = 1,7$ м и $V_h = 0,068$ м³.

Длина большой полуоси a согласно принятому допущению равна 1,7 м. Длина малой полуоси b определяется из формулы для объема половины эллипсоида вращения, м³,

$$V_h = \frac{2}{3} \pi a b^2 \quad (9.9)$$

и составляет $b = 0,14$ м.

Как известно из основ электротехники, при этих условиях напряженность поля внутри диэлектрика (полуэллипсоида), В/м,

$$E_r = E - P_r N_s / \epsilon_0, \quad (9.10)$$

где P_r — поляризованность диэлектрика, Кл/м²:

$$P_r = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) E_r; \quad (9.11)$$

* Исходные данные для определения объема тела человека: масса тела человека среднего роста 71,9 кг, средняя плотность тела 1,05 г/см³ [7, табл. 198].

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ — электрическая постоянная, Ф/м; N_a — коэффициент д поляризации эллипсоида вращения вдоль оси вращения (т. е. оси a

$$N_a = \left[\frac{k}{\sqrt{k^2 - 1}} \ln(k + \sqrt{k^2 - 1}) - 1 \right] / (k^2 - 1). \quad (9.1)$$

Здесь $k = a/b$ — отношение полуосей эллипсоида.

При большом значении k (в нашем случае $k > 10$) можно принять $\sqrt{k^2 - 1} = k$. Тогда (9.12) значительно упростится:

$$N_a = \frac{b^2}{a^2} \left(\ln \frac{2a}{b} - 1 \right). \quad (9.1)$$

Подставив (9.11) в (9.10), получим, В/м,

$$E_r = \frac{E}{1 + N_a(\epsilon_r - 1)}. \quad (9.1)$$

Электрическое смещение (электрическая индукция) в диэлектрике Кл/м²,

$$D_r = \epsilon_0 \epsilon_r E_r. \quad (9.1)$$

На полуэллипсоиде, находящемся в электрическом поле, индуцируется некоторый заряд, значение которого нам неизвестно. Выражение мгновенного значения этого заряда имеет следующий вид, Кл

$$q = -Q_{\max, h} \cos \omega t.$$

Дифференцируя q по времени, получаем выражение мгновенного значения тока, стекающего с эллипсоида, А,

$$i_h = \frac{dq}{dt} = Q_{\max, h} \omega \sin \omega t.$$

Вместе с тем известно, что $i_h = I_{\max, h} \sin \omega t$, откуда

$$I_{\max, h} = \omega Q_{\max, h}$$

или

$$I_h = \omega Q_h. \quad (9.16)$$

В этих уравнениях $Q_{\max, h}$ и Q_h — максимальное и действующее (эффективное) значения заряда, индуцированного на полуэллипсоиде, Кл; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота, с⁻¹; f — частота тока, Гц; $I_{\max, h}$ и I_h — максимальное и действующее (эффективное) значения тока, стекающего с полуэллипсоида в землю, А.

Заряд Q_h можно определить из выражения

$$Q_h = \oint_S \sigma dS, \quad (9.17)$$

где S — площадь поверхности полуэллипсоида, м²; σ — поверхностная плотность заряда полуэллипсоида, Кл/м².

Далее переходим к решению задачи с проводящим полуэллипсоидом. Поскольку электрическое смещение в любой точке диэлектрика, непосредственно примыкающей к поверхности проводящего тела, численно равно плотности заряда на поверхности этого тела, т. е. $D_r = \sigma$, решив совместно (9.14), (9.15) и (9.17), получим

$$Q_h = \oint_S \frac{E\epsilon_0}{1/\epsilon_r + N_a(1 - 1/\epsilon_r)} dS.$$

Имея в виду, что для *проводящего* материала можно принять $\epsilon_r \rightarrow \infty$, и выполнив интегрирование по площади основания полуэллипсоида $S = \pi b^2$, получим

$$Q_h = E\epsilon_0 \frac{\pi b^2}{N_a}. \quad (9.18)$$

Подставив (9.18) в (9.16), получим искомое выражение для тока, проходящего через человека, A ,

$$I_h = E\epsilon_0 \frac{\pi b^2 \omega}{N_a}; \quad (9.19)$$

заменив N_a его значением из (9.13), окончательно будем иметь, A ,

$$I_h = E\epsilon_0 \frac{\pi a^2 \omega}{\ln \frac{2a}{b} - 1}. \quad (9.20)$$

Для человека среднего роста ($a = 1,7$ м, $b = 0,14$ м) значение тока A будет равно

$$I_h = E \cdot 8,65 \cdot 10^{-12} \frac{\pi \cdot 1,7^2 \cdot 314}{\ln \frac{2 \cdot 1,7}{0,14} - 1} = 11,4 \cdot 10^{-9} E.$$

Округлив постоянный множитель в сторону увеличения, получим окончательное выражение для тока, проходящего в землю через человека, находящегося в электрическом поле промышленной частоты и стоящего на земле в токопроводящей обуви, мкА,

$$I_h = 12E, \quad (9.21)$$

где E — напряженность электрического поля на высоте человека среднего роста, кВ/м.

В производственных условиях возможно как увеличение, так и уменьшение тока, проходящего через человека, по сравнению с расчетным его значением вследствие искажения поля из-за наличия металлических конструкций и других предметов, что особенно вероятно на территории ОРУ.

Здесь уместно еще раз подчеркнуть, что если человек, стоящий на земле, изолирован от нее и заземленных предметов, то через него в землю также будет проходить ток, но вследствие емкостной связи человек — земля. Этот ток практически равен току I_h . Объясняется это большим значением емкостного сопротивления между токоведущей частью и телом человека по сравнению с емкостным сопротивлением человек — земля.

Приближенные значения емкости между человеком, стоящим на земле под крайним проводом ВЛ в середине промежуточного пролета, и проводами линии (с горизонтальным расположением проводов) составляют на ВЛ 330 кВ 0,5–1 пФ, на ВЛ 500 кВ 1–2 пФ, на ВЛ 750 кВ 1,5–3 пФ. Емкость тела человека относительно земли зависит от высоты размещения его над землей h и составляет 1000–1100 пФ при $h = 1$ мм (толщина ткани), 150–190 пФ при $h = 1$ см (резина, кожа, ткань), 50–60 пФ при $h = 25$ см.

Пример 9.2. Человек стоит на земле на сухой деревянной доске и касается рукой заземленной конструкции. Определить ток, проходящий через него в землю, если напряженность электрического поля на высоте роста человека $I_h = 1,7$ м составляет $E = 9000$ В/м.

Решение. По (9.21) находим $I_h = 12 \cdot 9 = 108$ мкА.

Токи, стекающие в землю через человека, имеющего хороший контакт с землей или с заземленным предметом, имеют разные значения в одной и той же установке. Это подтверждается данными табл. 9.1, в которой приведены значения токов, проходящих через человека и измеренных в разных местах ОРУ 500 кВ.

Максимальное значение этого тока в ОРУ 500 кВ составляет 250, а среднее 130 мкА; в ОРУ 750 кВ максимальный ток достигает 350, а среднее значение 180 мкА.

Таблица 9.1. Измеренные значения токов I_h , стекающих в землю через человека, находящегося на территории ОРУ 500 кВ

Местонахождение человека	I_h , мкА
Под шиной, соединяющей опорный изолятор с разъединителем и расположенной на высоте 6,95 м над землей	207
Под шиной между трансформатором тока и воздушным выключателем	183
На уровне коробки зажимов трансформатора тока	225
У агрегатного шкафа воздушного выключателя	145
У шкафа управления фазой воздушного выключателя	84
У привода разъединителей	160
У трансформатора напряжения и высокочастотного фильтра	40,5

При подъеме на опору линии электропередачи ток через человека также меняется в широких пределах. Например, когда человек стоит на земле у опоры линии 500 кВ, через него протекает ток в несколько микроампер; по мере подъема человека по опоре, т. е. по мере приближения к проводу, ток нарастает, и когда человек находится на опоре на уровне провода или на траверсе непосредственно над крайним проводом, ток, проходящий через него, достигает 500–600 мкА.

Вблизи опоры ток мал потому, что сказывается экранирующее действие заземленной опоры. Если же человек стоит под проводом вдали от опоры, например в середине пролета, то на линии 500 кВ протекающий через него ток достигает 100–150 мкА.

Из (9.18) можно получить выражение для мощности электрического поля P_h , Вт, поглощаемой полуэллипсоидом, т. е. телом человека. Эта мощность, выраженная через плотность тока в полуэллипсоиде J , А/м², его объем V_h , м³ и удельное сопротивление тела ρ , Ом·м, равна

$$P_h = J^2 V_h \rho.$$

Полагая с некоторым допущением, что

$$J = I_h / S,$$

где $S = \pi b^2$ — площадь основания полуэллипсоида, м², и с учетом (9.9) и (9.19) получаем, Вт,

$$P_h = I_h^2 \frac{2a\rho}{3\pi b^2} = \frac{2\pi a b^2 \rho \omega^2 E^2 \epsilon_0^2}{3N_a^2}. \quad (9.22)$$

9.4. ГИГИЕНИЧЕСКИЕ НОРМАТИВЫ

Степень отрицательного воздействия электрического поля промышленной частоты на организм человека можно оценить по количеству поглощаемой телом человека энергии электрического поля, по току, проходящему через человека в землю, и, наконец, по напряженности поля в месте, где находится человек. Все эти величины связаны между собой простыми математическими зависимостями (см. § 9.3), поэтому безразлично, какую из них принять для указанной цели и нормировать по условиям безопасности для человека. Однако с точки зрения привычных представлений о физической сущности явлений, возникающих в теле человека как в проводнике, находящемся в электрическом поле, целесообразно при исследовании воздействия электрического поля на организм, а также при соответствующих расчетах использовать электрический ток, проходящий через человека. Но как критерий безопасности для

человека, находящегося в электрическом поле промышленной частоты, необходимо использовать напряженность поля в месте нахождения человека. Дело в том, что значения тока, протекающего через человека, а следовательно, и энергии, поглощаемой его телом, зависят от положения тела относительно источника поля. При изменении положения тела (человек повернулся боком, наклонился и т. п.) значение тока может измениться в 1,5–2 раза, а энергии – в 2–4 раза при практически сохранившейся интенсивности биологического воздействия поля на человека. Кроме того, в производственных условиях напряженность поля значительно проще измерить, чем ток, проходящий через человека, и энергию, поглощаемую телом.

Допустимое значение тока, длительно проходящего через человека и обусловленного воздействием электрического поля, как показали исследования и опыт работы в электроустановках, составляет примерно 50–60 мкА, что соответствует напряженности электрического поля на высоте роста человека примерно 5 кВ/м.

Установлено также, что если при электрических разрядах, возникающих в момент прикосновения человека к металлической конструкции, имеющей иной, чем человек, потенциал, установившийся ток не превышает 50–60 мкА, то человек, как правило, не испытывает болевых ощущений.

Гигиенические нормы времени пребывания человека без средств защиты в электрическом поле электроустановок промышленной частоты установлены действующими правилами [15] в зависимости от напряженности поля в зоне, где будет находиться человек, то есть от напряженности поля, не искаженного присутствием человека (табл. 9.2).

Таблица 9.2. Нормы времени пребывания человека в электрическом поле электроустановок промышленной частоты в течение одних суток

Напряженность электрического поля, кВ/м, включительно	Допустимое время пребывания человека в поле, мин
1. До 5	Не ограничивается
2. Свыше 5 до 10	Не более 180
3. » 10 до 15	» » 90
4. » 15 до 20	» » 10
5. » 20 до 25	» » 5

Примечания: 1. При промежуточных значениях напряженности электрического поля следует ориентироваться на приведенное в таблице ближайшее значение.

2. Нормативы по пп. 2–5 действительны при условии, что остальное время человек находится в местах, где напряженность электрического поля меньше или равна 5 кВ/м.

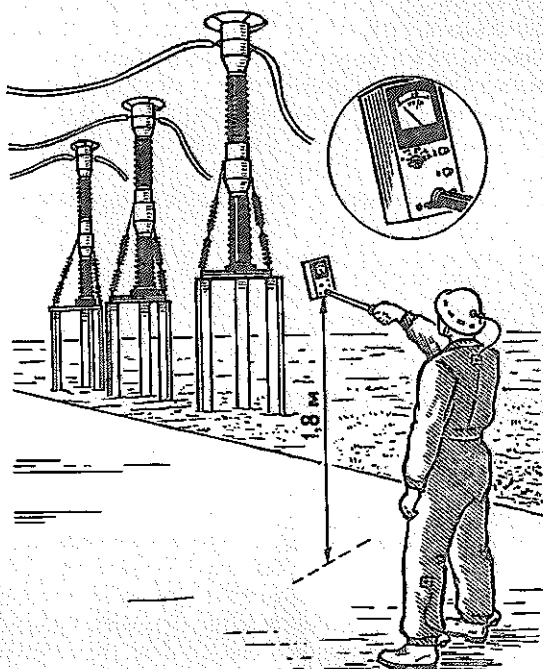


Рис. 9.5. Измерение напряженности электрического поля в ОРУ сверхвысокого напряжения

Эти нормы обязательны для персонала, обслуживающего электроустановки 50 Гц сверхвысокого напряжения — 330 кВ и выше.

Согласно нормам пребывание персонала без средств защиты в электрическом поле напряженностью до 5 кВ/м включительно может быть сколь угодно длительным. При большей напряженности вплоть до 25 кВ/м включительно продолжительность пребывания в поле ограничивается. Если требуется большая продолжительность пребывания в поле, чем указано в табл. 9.2, или если напряженность поля на рабочем месте превышает 25 кВ/м, работы должны производиться с применением средств защиты от воздействия поля — экранируемых костюмов или экранирующих устройств.

Пространство, в котором напряженность электрического поля превышает 5 кВ/м, называется зоной влияния электрического поля или просто зоной влияния.

Определение напряженности электрического поля на рабочих местах, а также определение границ зоны влияния производится измерением напряженности поля с помощью специального прибора — измерителя напряженности (рис. 9.5).

Этот прибор работает следующим образом. В антенне прибора электрическое поле создает ЭДС, которая усиливается с помощью транзисторного усилителя, выпрямляется полупроводниковыми диодами и измеряется стрелочным микроамперметром. Антенна представляет собой симметричный диполь, выполненный в виде двух металлических пластин, размещенных одна над другой. Поскольку наведенная в симметричном диполе ЭДС пропорциональна напряженности электрического поля, шкала миллиамперметра отградуирована в киловольтах, деленных на метр.

На рабочих местах напряженность измеряют в следующих случаях: при приемке электроустановки в эксплуатацию; при изменении конструкции электроустановки, а также экранирующих устройств, схемы подключения токоведущих элементов и режимов работы установки; при создании нового рабочего места и, наконец, в порядке текущего санитарного надзора.

Измерение напряженности должно производиться во всей зоне, где может находиться человек в процессе выполнения работы. Наибольшее измеренное значение напряженности является определяющим. При размещении рабочего места на земле наибольшая напряженность обычно бывает на высоте роста человека.

9.5. ЭКРАНИРУЮЩИЙ КОСТЮМ

Экранирующий костюм является индивидуальным защитным средством от воздействия электрического поля при работах в действующих электроустановках промышленной частоты сверхвысокого напряжения, а также при работах под напряжением на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения.

а) Защитный принцип

Защитные свойства костюма основаны на принципе электростатического экранирования. Как известно, в проводящем теле, внесенном в электрическое поле, происходит перегруппировка, т. е. кратковременное движение электронов, в результате чего на поверхности тела, а точнее, в очень тонком молекулярном слое этой поверхности, возникают заряды,

причем на стороне тела, обращенной к внешнему заряду, создавшему поле, заряд имеет знак, противоположный знаку внешнего заряда, а на другой стороне — знак внешнего заряда.

Поле, создаваемое разделенными зарядами внутри проводящего тела, оказывается равным и противоположным внешнему полю. В результате этого напряженность результирующего поля внутри тела оказывается равной нулю, т.е. поле внутри проводящего тела независимого от того, сплошное оно или полое, отсутствует (рис. 9.6). Таким образом, чтобы оградить какое-либо тело от воздействия на него электрического поля, достаточно поместить его в тонкую металлическую оболочку (экран).

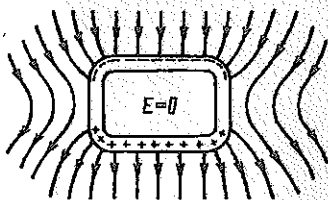


Рис. 9.6. Электростатический экран

Опытом установлено, что экран может быть не только сплошным, но и сетчатым: если плетение сетки не особенно редко, то силовые линии (линии напряженности) электрического поля будут замыкаться на ее проволочках и во внутреннее (огражденное сеткой) пространство не проникнут. Для надежности экранирования и устранения возникшего на экране потенциала экран заземляется.

6) Конструкция костюма

Экранирующий костюм (рис. 9.7) изготавливается из специальной токопроводящей ткани, в которой, например, наряду с обычными нитями содержится изолированный микропровод, расположенный в виде сетки.

Применяется и так называемая металлизированная ткань — обычная хлопчатобумажная ткань, на поверхности которой путем шоопирования нанесен тонкий слой металла.

Экранирующий костюм изготавливается в виде комбинезона или куртки с брюками, а также в виде плаща с капюшоном. В комплект костюма входят также экранирующий головной убор, специальная обувь и рукавицы или перчатки, покрытые электропроводящей тканью.

Головной убор — металлическая либо пластмассовая металлизированная каска, применяемая в теплое время года, или шапка-ушанка с прокладкой из токопроводящей (металлизированной) ткани, применяемая зимой. Удобным оказывается капюшон из токопроводящей ткани, которым снабжаются плащи и нередко куртки. От головной

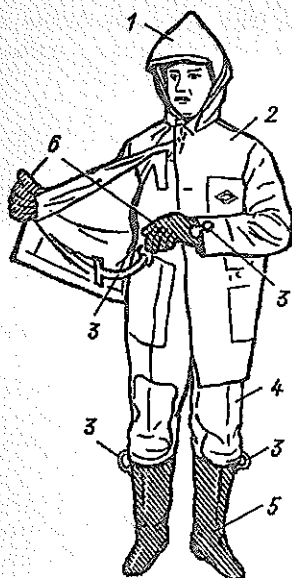


Рис. 9.7. Экранирующий костюм:

1 — капюшон из токопроводящей ткани, выполненный как одно целое с курткой; 2 — куртка из токопроводящей ткани; 3 — проводники, обеспечивающие электрическую связь между отдельными элементами костюма; 4 — брюки из токопроводящей ткани; 5 — сапоги из токопроводящего материала; 6 — перчатки из токопроводящей ткани

го убора требуется, чтобы он экранировал всю голову за исключением лица, благодаря чему устраняется наиболее опасный для человека путь емкостного тока — через голову. При большой напряженности поля на уровне головы человека (свыше 25 кВ/м) рекомендуется защищать и лицо с помощью специального съемного экрана из мелкой металлической сетки или электропроводящего органического стекла, укрепленных на каске или шапке.

Обувь, как правило, не является экранирующей; назначение ее — обеспечить заземление костюма, т. е. хороший контакт с основанием, на котором стоит

человек. Обычно это кожаные ботинки с подошвами, из электропроводящей резины. Применяется также обувь, целиком выполненная из такой резины, — ботинки, сапоги, галоши (на валенки).

Сопротивление подошвы обуви, т. е. сопротивление между внутренней и наружной поверхностями подошвы, не должно превышать 50 кОм, благодаря чему обеспечивается хороший контакт костюма с основанием, на котором стоит человек.

При большой напряженности поля рекомендуется использовать обувь с электропроводящим верхом, чтобы полностью защитить ноги от воздействия поля.

Все предметы экранирующего костюма — головной убор, куртка, рукавицы (перчатки), брюки и обувь, а точнее, их токопроводящие элементы, должны иметь между собой надежную электрическую связь, осуществляемую специальными проводниками связи (поз. 3 на рис. 9.7).

Костюм надевается на белье, чтобы тело человека было изолировано от него. Допустимо также иметь хороший контакт тела человека с токопроводящей основой костюма, что может быть достигнуто с помощью токопроводящих манжет костюма, плотно охватывающих руки выше кистей. Этим исключаются покалывания и пощипывания при влажном белье или случайном прикосновении костюма к телу (например,

в области шеи). При необходимости поверх костюма можно надевать другую одежду — телогрейку, халат, пальто и т. п.

в) Область и условия применения

Экранирующие костюмы как средства защиты от воздействия электрических полей следует применять при работах, проводимых в ОРУ и на ВЛ сверхвысокого напряжения вне области стационарных и временных экранирующих устройств, если напряженность поля на рабочем месте превышает 25 кВ/м или если продолжительность работы больше установленных норм (см. табл. 9.2).

Таковыми работами являются ремонтные, монтажные и строительные работы, осмотры оборудования, благоустройство и уборка территории ОРУ, проверка исправности изоляторов на опорах ВЛ, а также работы под напряжением на линиях электропередачи высокого и сверхвысокого напряжений и т. п. Кроме того, экранирующие костюмы необходимо применять и при кратковременных работах (т. е. в пределах норм), если требуется подъем на оборудование или на конструкции. Эта необходимость обусловлена тем, что при подъеме человека на оборудование или конструкцию без экранирующего костюма разрядный ток, стекающий с него в момент прикосновения к заземленному предмету, может вызвать болезненные ощущения и испуг человека и как следствие падение его с высоты.

Исключение составляют работы по эксплуатационному обслуживанию трансформаторов и шунтирующих реакторов без подъема на вводы; эти работы можно выполнять без экранирующих костюмов и экранов, поскольку вблизи указанных аппаратов поле имеет незначительную напряженность (см. с. 337).

Кроме того, без средств защиты и без определения напряженности электрического поля на рабочем месте правила разрешают выполнять работы на земле вблизи действующих воздушных линий электропередачи сверхвысокого напряжения при соблюдении следующих условий:

на ВЛ 400—500 кВ без ограничения по времени при производстве работ в пределах 20 м от оси опоры любого типа и в течение не более 90 мин при производстве работ в пролете;

на ВЛ 750 кВ в течение не более 180 мин при производстве работ в пределах 30 м от оси промежуточной опоры и в течение не более 10 мин при производстве работ в пролете или вблизи анкерной либо угловой опоры.

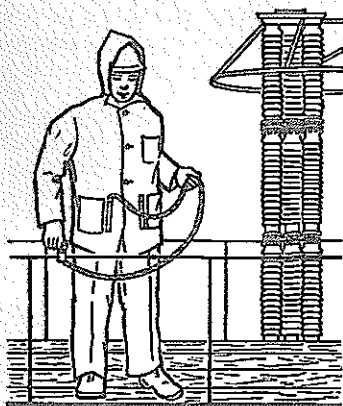


Рис. 9.8. Заземление экранирующего костюма путем присоединения его металлической основы к заземленной конструкции электроустановки с помощью гибкого проводника

Указанная продолжительность пребывания человека в электрическом поле без средств защиты может быть уточнена расчетами и измерениями.

Костюм, т. е. его токопроводящие элементы, при работе должны быть соединены с землей — заземлены.

Работы, не связанные с прикосновением человека к заземленным предметам — оборудованию, конструкциям и пр., например осмотры оборудования, уборка снега, кошение травы и другие работы в ОРУ, а также обходы линий электропередачи можно производить без специального заземления костюма. В этом случае достаточной оказывается связь костюма с землей благодаря контактам токопроводящих подошв обуви с грунтом.

Работы, связанные с прикосновением человека к заземленным предметам, например ремонт оборудования и т. п., можно производить при условии специального заземления экранирующего костюма путем создания металлической связи между ним и заземляющим устройством электроустановки.

При этих работах специальное заземление костюма выполняется независимо от того, стоит ли человек непосредственно на земле или изолирован от нее.

Специальное заземление экранирующего костюма может осуществляться обеспечением контакта токопроводящих подошв обуви с так называемыми заземляющими площадками — металлическими рифлеными (для исключения скольжения) листами или сетками, размещенными на месте работ и надежно соединенными с заземляющим устройством электроустановки.

Лица, выполняющие работу с прикосновением к заземленным частям, обязаны во время работы всегда находиться на этих площадках.

Специальное заземление костюма может быть осуществлено также присоединением его к заземленным частям оборудования с помощью гибкого медного провода сечением не менее 4 мм^2 , снабженного на

концах надежными зажимами. Контакт этого провода с костюмом осуществляется присоединением его к любому из проводников связи в комплекте костюма (рис. 9.8).

При работах на высоте с применением лесов используют переносные заземляющие площадки, которые надежно укрепляют на лесах и металлически соединяют между собой и с заземляющим контуром. В этом случае применяют и полосы рифленой стали, прибиваемые к доскам настила. Их также соединяют одну с другой и с заземляющим устройством.

Длительность работы в экранирующем костюме Правилами не ограничивается. Однако надо иметь в виду, что длительная работа в экранирующем костюме сопровождается нарушением терморегуляции организма, в особенности при повышенной или пониженной температуре окружающего воздуха.

Запрещается применение экранирующих костюмов в тех случаях, когда возможно случайное прикосновение к частям, находящимся или могущим оказаться под напряжением, в том числе: при работах на действующих сборках и в цепях до 1000 В; при работах переносным электрифицированным инструментом; при электрических испытаниях оборудования; при электросварочных работах и др. Во всех этих случаях защита работающих от воздействия электрического поля должна осуществляться с помощью стационарных или временных экранирующих устройств, описанных ниже.

Исправность костюма проверяется периодически, например через каждые 2 мес. Необходимо проверять надежность электрической связи между всеми элементами костюма; у комбинезонов, выполненных из ткани с изолированным микропроводом, следует контролировать с помощью омметра наличие гальванической связи между верхними и нижними накладками из ткани с серебряной мишурой, у ботинок — связь между металлической подошвой и выводом. Если подошва — из проводящей резины, то для проверки используется мегаомметр 2500 В; при этом сопротивление не должно превышать 50 кОм.

9.6. ЭКРАНИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Экранирующие устройства (экраны) в зависимости от их конструкции и размеров, а также от места и условий размещения могут служить индивидуальными или коллективными средствами защиты людей от воздействия электрического поля при работах в действующих электроустановках промышленной частоты сверхвысокого напряжения.

а) Защитный принцип

Защитные свойства экранирующих устройств основаны на эффекте ослабления напряженности и искажения электрического поля в пространстве вблизи заземленного металлического предмета.

Если в электрическое поле внести заземленный металлический предмет, произойдет разделение индуцированных на нем зарядов и стекание в землю заряда одного знака (соответствующего знаку заряда проводника, создавшего поле). Оставшийся на предмете заряд распределится по всей его поверхности, но крайне неравномерно.

В результате вблизи внесенного предмета произойдет резкое искажение электрического поля (рис. 9.9, а). При этом на стороне предмета, обращенной к индуцирующему проводнику, напряженность поля значительно возрастет, а на противоположной стороне, как и в пространстве, которое как бы отгора-

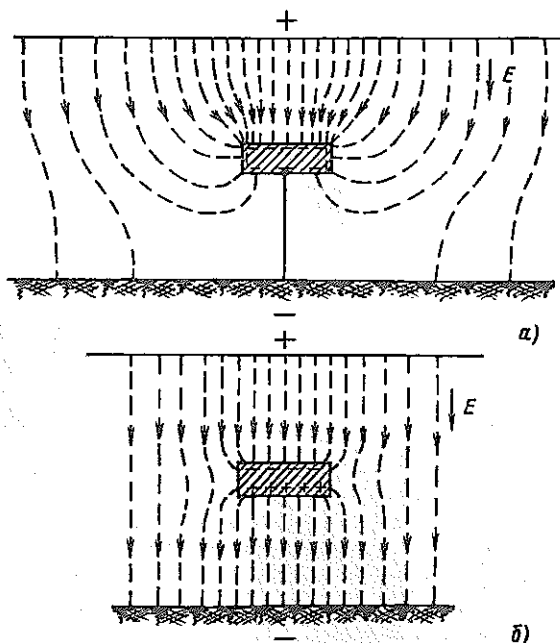


Рис. 9.9. Искривление электрического поля при внесении в него заземленного (а) и незаземленного (б) металлических предметов

живается или экранируется внесенным предметом, резко ослабится.

При соответствующих размерах, форме и размещении экранирующего устройства защищенное пространство может иметь незначительную напряженность электрического поля и достаточно большие размеры, чтобы в нем безопасно и удобно можно было выполнять работы.

Здесь уместно подчеркнуть важность заземления экранирующего устройства. Если это устройство (т. е. внесенный в электрическое поле металлический предмет) не заземлено, то индуцированные на нем заряды также вызовут искажение поля, но в значительно меньших размерах (рис. 9.9, б). При этом оба заряда сосредоточатся на поверхностях противоположных сторон предмета и напряженность электрического поля вокруг него почти не изменится. Иными словами, в пространстве, которое ограждается незаземленным металлическим предметом, будет существовать практически то же самое, хотя и несколько искаженное, электрическое поле, которое существовало до внесения в него этого предмета. Следовательно, никакого экранирующего эффекта незаземленный предмет не дает.

Важно и то, что в отличие от заземленного экрана, потенциал которого практически равен нулю, незаземленный экран может иметь высокий потенциал и тем самым представлять собой известную опасность при касании к нему человека.

6) Конструкция и размещение

Экранирующие устройства в зависимости от их назначения и исполнения подразделяются на стационарные и переносные (передвижные). Они должны обеспечивать снижение напряженности электрического поля в защищаемом пространстве до 5 кВ/м и менее.

Стационарные экранирующие устройства (экраны) являются неотъемлемой частью конструкции электроустановки и предназначены для защиты персонала при эксплуатационных работах (осмотрах оборудования, оперативных переключениях, выполнении обязанностей наблюдающего за производством работ и т. п.), а также при текущих и капитальных ремонтах выключателей и некоторых других работах. Их изготавливают из металла в виде плоских щитов — козырьков, навесов и перегородок.

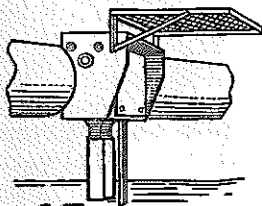


Рис. 9.10. Экранирующий козырек над шкафом управления выключателя 500 кВ

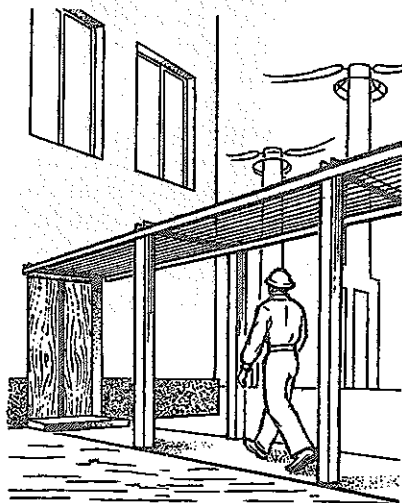


Рис. 9.11. Экранирующий навес над проходом в здание

Козырьки (рис. 9.10) изготавливают из металлической сетки с ячейками не крупнее 50×50 мм, укрепляемой на раме из угловой стали. Устанавливают их над рабочими местами, с которых производятся работы по управлению и обслуживанию аппаратов и устройств; у агрегатных шкафов и шкафов управления воздушных выключателей; у ящиков зажимных сборок и приводов разъединителей (если эти приводы выступают за пределы конструкции, на которой стоит разъединитель); у сборок до 1000 В; у силовых распределительных шкафов; у фильтров присоединений и у других устройств и аппаратов, нуждающихся в периодическом обслуживании.

Ширина козырька должна быть не меньше ширины шкафа, а длина его выступающей части — не менее 1 м.

Навесы (рис. 9.11) изготавливают из стальных прутков, а также из отрезков стального троса или провода диаметром 5–8 мм, которые натягивают параллельно один другому на расстоянии между ними 10–20 см. Навесы устанавливают на высоте 2–2,5 м над землей над проходами, а также над участками ОРУ, с которых производят осмотр оборудования. Ширина навесов не менее 1,5 м, а длина их зависит от размеров защищаемого участка.

Перегородки изготавливают из металлической сетки или стальных прутков, смонтированных на стальной раме соответствующих размеров. Их устанавливают вертикально и точно посередине между соседними ячейками воздушных выключателей и крепят на специальных опорах с оттяжками. При этом нижняя грань перегородки должна находиться над поверхностью земли на высоте 2–3 м, чтобы не мешать проходу людей и проезду машин.

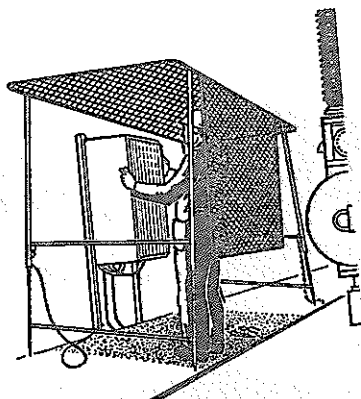


Рис. 9.12. Временный (переносный) экранирующий козырек

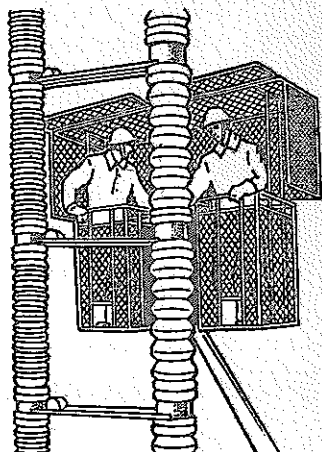


Рис. 9.13. Экранирование люлек гидроподъемника с помощью сетчатых щитов

Длина и высота перегородки должны быть по крайней мере равны длине и высоте воздушного выключателя с учетом всех его токоведущих частей.

При использовании экранирующих перегородок надо иметь в виду, что они защищают от полей, создаваемых лишь соседними присоединениями, и не защищают от поля данного присоединения (т. е. от поля, создаваемого токоведущими частями, размещенными над рабочим местом). Поэтому если работы производятся без снятия напряжения, то требуется применять дополнительные средства экранирования — навесы, щиты и т. п.

Переносные (передвижные) экранирующие устройства, называемые также временными устройствами, предназначены для защиты персонала, выполняющего в течение длительного времени эксплуатационные, ремонтные или монтажные работы на участках действующей электроустановки, не защищенных стационарными экранами. Их изготовляют в виде переносных или передвижных (съемных) козырьков, навесов, перегородок, щитов, палаток и подобных им устройств из тех же материалов, что и стационарные экраны; палатки и навесы можно изготовлять из специальной металлизированной или обычной ткани, например брезента, покрытого алюминиевой краской.

Временные козырьки (рис. 9.12) подобно стационарным устанавливают непосредственно у шкафов и других устройств на высоте, удобной для работы.

Временные навесы используют обычно для экранирования рабочих мест, поэтому их размеры определяются размерами рабочего места или численностью бригады.

Временные перегородки и щиты служат съемными боковыми экранами. Перегородки обычно устанавливают между действующими и отключенными или монтируемыми ячейками, а щиты — на лесах, с которых производятся работы на воздушных выключателях.

С помощью съемных или раздвижных щитов защищают также люльки гидropодъемников и телескопических вышек (рис. 9.13).

Палатки устанавливают над рабочими местами и крепят с помощью тросов или канатов к стойкам порталов или опорам оборудования.

в) Условия применения

Установку экранов как временных, так и постоянных следует выполнять с соблюдением следующих допустимых изоляционных расстояний до токоведущих частей: в установках 400 и 500 кВ — 4,5, в установках 750 кВ — 6 м.

При этом стационарные экраны не должны препятствовать проезду машин и механизмов нормальных габаритов.

Временные перегородки и щиты между действующими и монтируемыми присоединениями следует располагать возможно ближе к защищаемой зоне, благодаря чему усиливается экранирующий эффект и увеличиваются изоляционные расстояния до токоведущих частей, находящихся под напряжением.

Заземление экранирующих устройств исключительно важно для создания защитной зоны, поэтому оно должно быть особенно надежным. Каждый экран заземляют присоединением его не менее чем в двух точках к контуру заземления электроустановки или к заземленным металлическим конструкциям. При этом стационарные экраны присоединяют к заземляющему устройству стальными проводниками с помощью сварки или болтов, а временные — с помощью специальных проводников, для чего на них предусматривают заземляющие зажимы.

Сопrotивление заземления не должно превышать 10 Ом.

9.7. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ

Кроме рассмотренных ранее мер защиты от воздействия электрического поля с помощью экранирующих костюмов и экранирующих устройств при работах в ОРУ сверхвысоких

напряжений необходимо выполнять и другие меры защиты и соблюдать определенные условия работы, также обусловленные наличием интенсивного электрического поля.

Так, перед началом работ, даже кратковременных, необходимо заземлять как отключенные, так и вновь монтируемые токоведущие части, а также другие металлические части оборудования и предметы, изолированные от земли, для того чтобы исключить воздействие на человека искрового разряда в случае прикосновения его к этим частям и предметам (рис. 9.14).

Заземление указанных частей и предметов необходимо и потому, что в этом случае они становятся как бы экранами, значительно уменьшающими интенсивность электрического поля на рабочем месте. С этой же целью следует заземлять отключенные токоведущие части ближайших к месту работы аппаратов, даже если работа на них не предполагается. Заземление осуществляется с помощью заземляющих ножей или временных переносных заземлений.

Для увеличения степени естественного экранирования рабочих мест следует при работах в шкафах и ящиках так открывать их дверцы, чтобы они служили защитными экранами для работающих.

В пространстве около зданий и сооружений, находящихся в электрическом поле, а также вблизи заземленных металлоконструкций, фундаментов под оборудование и крупногабаритных объектов напряженность электрического поля может не превышать 5 кВ/м. В таком случае это пространство называется зоной экранирования, границы которой определяются измерением напряженности поля. В пределах зоны экранирования персонал может находиться без средств защиты сколь угодно долго. Например, вблизи трансформаторов и шунтирующих реакторов постоянно существует зона экранирования с незначительной напряженностью электрического поля. Поэтому эксплуатационное обслуживание этих аппаратов без подъема на вводы (отбор проб масла из баков и вводов; обслуживание системы охлаждения, цепей контрольно-измерительной аппаратуры и приборов; производство мелкого ремонта и т. п.) можно производить без экранирующих средств независимо от продолжительности работы.

В помещениях ОРУ — на пульте управления, в трансформаторной башне, компрессорной, мастерской и др., имеющих заземленную металлическую кровлю или выполненных из



Рис. 9.14. Плакат, иллюстрирующий необходимость заземления отключенных токоведущих частей с целью исключить искровой разряд между человеком и этими частями в момент прикосновения к ним

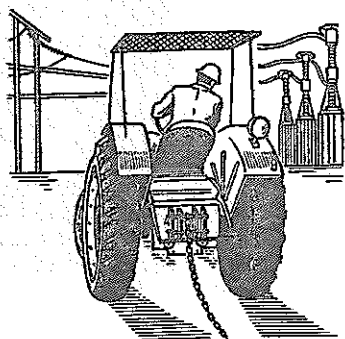


Рис. 9.15. Заземление транспортной машины на резиновом ходу с помощью металлической цепи

железобетона, электрическое поле отсутствует. Поэтому в таких помещениях средств защиты не требуется.

Передвижные мастерские, лаборатории и прицепные фургоны по этим же соображениям должны быть металлическими или иметь металлическую крышу. И в том, и в другом случае металлические части должны заземляться.

Машины и механизмы на резиновом ходу — автокраны, тракторы, автомобили, и т. п., работающие в зоне влияния, снабжаются металлической цепью, соединенной с рамой или кузовом. Перед въездом на территорию ОРУ или в зону влияния ВЛ цепь опускают до надежного соприкосновения с землей (рис. 9.15). При работе таких машин и механизмов в зоне влияния без перемещения они должны быть заземлены путем соединения кузова или рамы с заземляющим устройством электроустановки специальным проводником.

Глава 10

**БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ПОФАЗНОМ
РЕМОНТЕ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ****10.1. ОСОБЕННОСТИ ПОФАЗНОГО РЕМОНТА**

В нашей стране нашел применение так называемый *пофазный ремонт воздушных линий электропередачи (ВЛ), т. е. ремонт отключенной фазы, в то время как две другие фазы остаются в работе и обеспечивают электроснабжение потребителей.* Таким методом выполняют различные виды работ как на ВЛ, так и на подстанциях, в том числе ремонт и замену опор, проводов, выключателей и оборудования, а также ревизии и профилактические испытания. Работы ведут обычными способами, т. е. так же, как и при отключении всех трех фаз линии, но лишь на одной (отключенной) фазе.

При пофазном ремонте персонал, выполняющий работы на отключенной фазе, находится в условиях повышенной опасности поражения током по следующим причинам: наличие на отключенном проводе значительного потенциала, обусловленного электростатическим и электромагнитным влиянием остающихся в работе проводов; близость проводов линии, находящихся под рабочим напряжением; возникновение электрической дуги, вызываемой емкостным током, при наложении и снятии временного заземления на отключенный провод и др.

Указанные обстоятельства определяют особенности пофазного ремонта и требуют принятия специальных мер, обеспечивающих безопасные и высокопроизводительные условия работы ремонтного персонала.

Главной из этих мер является снижение до безопасного для человека значения потенциала отключенного провода линии на месте производства работ путем соблюдения особых условий его заземления. Вместе с тем должна быть безошибочно определена протяженность участка линии, на котором ремонтному персоналу обеспечена безопасность прикосновения к отключенному проводу из условий допустимого напряжения прикосновения. Лица, выполняющие работы, обязаны соблюдать определенные безопасные расстояния до проводов линии, находящихся под напряжением. Наложение и снятие переносного заземления с отключенного провода должны осуществляться с по-

мощью специального дугогасящего устройства — штанги-гасителя.

Выполнение работ при пофазном ремонте ВЛ должно поручаться специально обученным лицам при постоянном надзоре производителя работ. Пофазный ремонт разрешается производить на ВЛ 35—220 кВ одноцепных и двухцепных с любым расположением проводов, но при условии, что расстояние от проводов, находящихся под напряжением, до оси стойки деревянной опоры или тела стойки металлической и железобетонной опор составляет не менее 1,5 м на линиях напряжением до 110 кВ включительно, 2,0 м на линиях 150 кВ и 2,5 м на линиях 220 кВ.

На ВЛ 35 кВ в тех случаях, когда указанное расстояние меньше 1,5 м, но не меньше 1,0 м, работы со стойки опоры можно производить лишь при условии применения съемных сплошных жестких ограждений из изоляционного материала, препятствующих приближению и прикосновению работающего к проводу и изоляторам.

В настоящей главе дан анализ электрических явлений, возникающих на отключенном проводе трехфазной ВЛ, и рассмотрены меры, обеспечивающие безопасность ремонтного персонала. При этом для упрощения излагаемых вопросов электростатическое и электромагнитное влияние описывается отдельно; с той же целью не учитывается сопротивление провода, которое в действительных условиях может заметно влиять на характер распределения, значение потенциала провода и на ток. Все вопросы рассматриваются применительно к воздушным линиям с горизонтальным расположением проводов, имеющим нормальное выполнение транспозиций.

10.2. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ

а) Значение наведенного потенциала на отключенном проводе

Отключенный провод трехфазной воздушной линии электропередачи находится в электрическом поле оставшихся в работе проводов, вследствие чего на нем наводится электростатический потенциал φ_3 , В, значение которого можно определить следующим образом.

Пусть на линии отключена фаза С, что соответствует, например, проводу 3 (рис. 10.1, а). Тогда наведенный на нем электри-

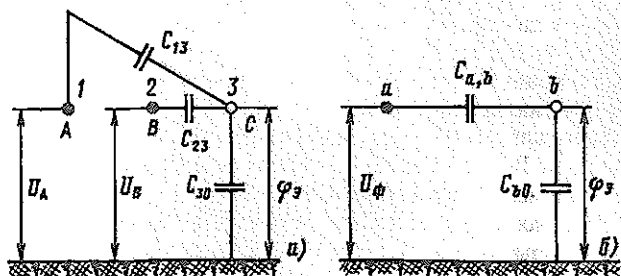


Рис. 10.1. Емкостные связи между рабочими проводами и отключенным проводом трехфазной линии (а) и проводами эквивалентной ей двухпроводной линии (б)

ческим полем фазы A потенциал φ_A , B , найдем из следующего соотношения:

$$\frac{\varphi_A}{-j/\omega C_{30}} = \frac{\dot{U}_A}{-j/\omega C_{13} - j/\omega C_{30}},$$

откуда

$$\varphi_A = \dot{U}_A C_{13} / (C_{13} + C_{30}). \quad (10.1)$$

В этом случае мы пренебрегли активной проводимостью изоляции проводов, которая незначительна, и учли лишь емкостные проводимости.

Таким же путем определим потенциал φ_B , наводимый на этом же проводе полем фазы B :

$$\varphi_B = \dot{U}_B C_{23} / (C_{23} + C_{30}).$$

Результирующий потенциал φ_3 , B , провода 3 будет равен согласно принципу наложения электрических полей алгебраической сумме потенциалов, наводимых полями обеих фаз:

$$\varphi_3 = \varphi_A + \varphi_B = \dot{U}_A C_{13} / (C_{13} + C_{30}) + \dot{U}_B C_{23} / (C_{23} + C_{30}). \quad (10.2)$$

Если бы в качестве отключенного мы рассматривали провод 1 или 2, то получили бы аналогичные уравнения, но в них участвовали бы также $\dot{U}_C$, C_{12} , C_{10} , C_{20} .

В этих уравнениях φ_A , φ_B — комплексные значения потенциалов, наведенных на отключенном проводе 3 (фаза C), оставшимися в работе фазами A и B соответственно, B ; $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$,

$\dot{U}_C$ — комплексные значения фазных напряжений, В; C_{10} , C_{20} , C_{30} — емкости проводов ВЛ относительно земли, Ф/км; C_{12} , C_{13} , C_{23} — взаимные емкости между проводами ВЛ, Ф/км; $\omega = 314$ — угловая частота, с^{-1} .

Уравнение (10.2) определяет потенциал отключенного провода лишь на участках ВЛ, где он числится под № 3.

Однако на транспонированной линии с целым числом циклов транспозиции* это уравнение справедливо для потенциала отключенного провода по всей его длине. При этих условиях можно считать равными емкости проводов относительно земли, а также взаимные емкости между проводами и приравнять их некоторым эквивалентным емкостям C_{b0} и $C_{a,b}$

$$C_{10} = C_{20} = C_{30} = C_{b0};$$

$$C_{12} = C_{13} = C_{23} = C_{a,b}.$$

Тогда после соответствующей подстановки (10.2) примет вид

$$\phi_3 = (\dot{U}_A + \dot{U}_B) C_{a,b} / (C_{a,b} + C_{b0}) = -\dot{U}_C C_{a,b} / (C_{a,b} + C_{b0}).$$

Это уравнение показывает, что ϕ_3 находится в противофазе с напряжением $\dot{U}_C$, которое существовало на проводе до его отключения.

В действительной форме наведенный на отключенном проводе ВЛ электростатический потенциал, В,

$$\phi_3 = U_\phi C_{a,b} / (C_{a,b} + C_{b0}). \quad (10.3)$$

Уравнение (10.3) показывает, что для определения электростатического потенциала, наводимого на отключенном проводе трехфазной ВЛ полями оставшихся в работе фаз, можно пользоваться эквивалентной двухпроводной линией (рис. 10.1, б) у которой один из проводов a является влияющим и находится под потенциалом, равным фазному напряжению рассматриваемой линии U_ϕ , а другой провод b подвержен влиянию и на нем

* Транспозиция — изменение порядка расположения проводов воздушной линии путем кругового перемещения их (перекрещивания) на опорах вдоль всей линии через равные расстояния, при котором каждый провод линии занимает поочередно одинаковое положение на опоре. Благодаря транспозиции уравниваются падения напряжений в фазах и емкости одной фазы относительно другой и относительно земли.

наводится искомый потенциал Φ_3 . Частичные емкости этой линии эквивалентны частичным емкостям трехфазной линии и обозначены C_{b0} и $C_{a,b}$.

Формулы для вычисления частичных емкостей проводов воздушных линий электропередачи известны из основ электротехники. Так, для однофазной двухпроводной линии (рис. 10.2, а) емкость провода относительно земли C_{b0} , Ф/км, и взаимная емкость $C_{a,b}$, Ф/км, двух параллельных проводов, подвешенных на одинаковой высоте над землей, равны соответственно

$$C_{b0} = (\alpha_{b0} - \alpha_{a,b}) / \Delta;$$

$$C_{a,b} = \alpha_{a,b} / \Delta.$$

Здесь α_{b0} и $\alpha_{a,b}$ — потенциальные коэффициенты проводов:

$$\alpha_{b0} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2H}{r};$$

$$\alpha_{a,b} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{a,b}}{d_{a,b}};$$

Δ — определитель, равный $(\alpha_{b0}^2 - \alpha_{ab}^2)$.

Таким образом,

$$C_{b0} = \frac{\ln(2H/r) - \ln(D_{ab}/d_{a,b})}{\Delta} \frac{1}{2\pi\epsilon_0}; \quad (10.4)$$

$$C_{a,b} = \frac{\ln(D_{a,b}/d_{a,b})}{\Delta} \frac{1}{2\pi\epsilon_0}. \quad (10.5)$$

В этих выражениях и на рис. 10.2 обозначено: H — средняя высота подвеса проводов над поверхностью земли, м,

$$H = H_n - 2f/3 = (H_n + 2H_0)/3;$$

H_n — высота крепления провода на опоре, м; $f = H_n - H_0$ — стрела провеса провода, м; H_0 — габарит линии (наименьшее расстояние по вертикали от провода до земли), м;

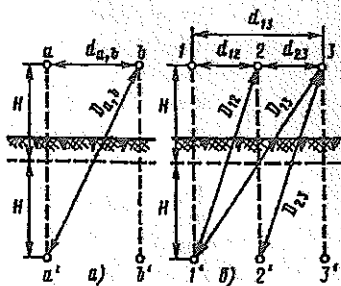


Рис. 10.2. Расчетные схемы (к определению частичных емкостей):

а — эквивалентная двухпроводная линия;
б — трехфазная линия

r — радиус провода, м; $D_{a,b}$ — расстояние от провода b до зеркального изображения провода a , м, равное среднегеометрическому значению соответствующих расстояний трехфазной линии, м:

$$D_{a,b} = \sqrt[3]{D_{12}D_{13}D_{23}} \approx 2H;$$

$d_{a,b}$ — расстояние между проводами a и b , м, равное среднегеометрическому значению расстояний между проводами трехфазной линии, м:

$$d_{a,b} = \sqrt[3]{dd \cdot 2d} = 1,26d,$$

d — расстояние между соседними проводами трехфазной линии м; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ — электрическая постоянная, Ф/м.

Подставив в (10.3) значения C_{b0} и $C_{a,b}$ из (10.4) и (10.5), получим окончательное выражение для электростатического потенциала φ_3 , В, наведенного на отключенном проводе трехфазной ВЛ полями оставшихся в работе проводов:

$$\varphi_3 = U_\Phi \frac{\ln(D_{a,b}/d_{a,b})}{\ln(2H/r)} \quad (10.6)$$

или

$$\varphi_3 = kU_\Phi, \quad (10.7)$$

где k — коэффициент емкостной связи:

$$k = \frac{C_{a,b}}{C_{a,b} + C_{b0}} = \frac{\ln(D_{a,b}/d_{a,b})}{\ln(2H/r)}. \quad (10.8)$$

Из выражения (10.6) видно, что наведенный на отключенном проводе ВЛ электростатический потенциал φ_3 зависит от фазного напряжения линии, диаметра и расположения проводов на опоре и не зависит от длины провода и тока в линии.

Пример 10.1. Определить частичные емкости C_{b0} и $C_{a,b}$ провода и электростатический потенциал φ_3 отключенного и незаземленного провода ВЛ 110 кВ с горизонтальным расположением проводов. Данные провода марки АС-95 ($r = 6$ мм); $H_n = 8$ м; $H_0 = 6,5$ м, $d = 4$ м.

Решение. Средняя высота подвеса проводов $H = (H_n + 2H_0)/3 = (8 + 2 \cdot 6,5)/3 = 7$ м; расстояние D_{ab} принимаем равным $2H$; среднегеометрическое значение расстояний между проводами ВЛ $d_{ab} = 1,26d = 1,26 \cdot 4 = 5,04$ м. По (10.4) и (10.5) определяем частичные емкости проводов:

относительно земли

$$C_{b0} = \frac{\ln \frac{2.7}{6 \cdot 10^{-3}} - \ln \frac{2.7}{5.04}}{\left(\ln \frac{2.7}{6 \cdot 10^{-3}} \right)^2 - \left(\ln \frac{2.7}{5.04} \right)^2} \frac{10^{-6}}{18} = 6,15 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км};$$

взаимную емкость

$$C_{a,b} = \frac{\ln \frac{2.7}{5.04}}{\left(\ln \frac{2.7}{6 \cdot 10^{-3}} \right)^2 - \left(\ln \frac{2.7}{5.04} \right)^2} \frac{10^{-6}}{18} = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км}.$$

Используя полученные значения C_{b0} и $C_{a,b}$, находим по (10.8) коэффициент емкостной связи

$$k = \frac{1,1 \cdot 10^{-9}}{1,1 \cdot 10^{-9} + 6,15 \cdot 10^{-9}} = 0,135.$$

Затем по (10.7) определяем значение наведенного электростатического потенциала

$$\varphi_3 = 0,135 \frac{110}{\sqrt{3}} = 8,5 \text{ кВ}.$$

Для линий с горизонтальным расположением проводов диаметром 6–25 мм при расстоянии $d = 3 \div 4$ м и $H = 8,3$ м коэффициент связи k колеблется в пределах 0,13–0,18.

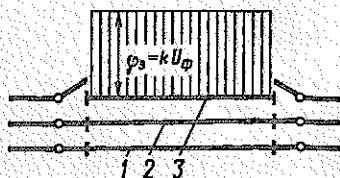
б) Потенциальная характеристика незаземленного провода

Потенциальная характеристика, т. е. линия, характеризующая распределение наведенного потенциала вдоль провода, определяется для незаземленного провода уравнением (10.7).

Поскольку правая часть этого уравнения — величина постоянная, оно является уравнением прямой линии, параллельной оси абсцисс (если по этой оси отложить длину провода). Иначе говоря, электростатический потенциал φ_3 одинаков по всей длине подверженного влиянию провода (рис. 10.3).

Рис. 103. Потенциальная характеристика отключенного и незаземленного провода, подверженного электростатическому влиянию:

1, 2 — провода линии, оставшиеся в работе;
3 — отключенный провод



в) Опасность прикосновения к проводу

Прикосновение к проводу, находящемуся под электростатическим потенциалом, таит для человека опасность поражения током. При этом степень опасности зависит не от значения потенциала, а от значения тока, который будет проходить через человека, I_h , или напряжения прикосновения $U_{пр} = I_h R_h$, где R_h — сопротивление тела человека, Ом.

Для случая прикосновения к незаземленному проводу (рис. 10.4, а) можно написать

$$\frac{\dot{U}_\phi}{1/j\omega C_{a,b}l + 1/(1/R_h + j\omega C_{b0}l)} = \frac{\dot{U}_{пр}}{1/(1/R_h + j\omega C_{b0}l)},$$

откуда напряжение прикосновения $U_{пр}$, В, т. е. напряжение, под которым окажется человек после прикосновения к проводу,

$$\dot{U}_{пр} = \dot{U}_\phi \frac{\omega C_{a,b} l R_h}{\omega (C_{a,b} + C_{b0}) l R_h - j}$$

или в действительной форме

$$U_{пр} = U_\phi \frac{\omega C_{a,b} l R_h}{\sqrt{[\omega (C_{a,b} + C_{b0}) l R_h]^2 + 1}}. \quad (10.9)$$

Ток, А, проходящий через человека, равен

$$I_h = U_\phi \frac{\omega C_{a,b} l}{\sqrt{[\omega (C_{a,b} + C_{b0}) l R_h]^2 + 1}}. \quad (10.10)$$

В этих выражениях l — длина провода, км; R_h — сопротивление тела человека, Ом.

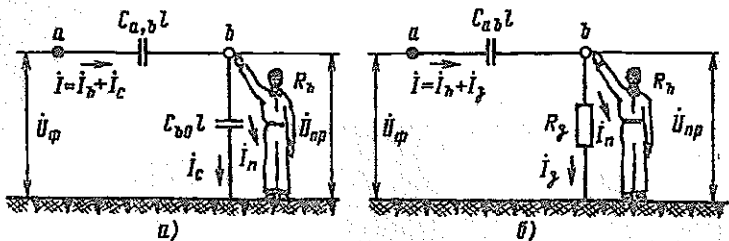


Рис. 10.4. Схема электрических связей при прикосновении человека к отключенному проводу:

а — провод не заземлен; б — провод заземлен

При небольших значениях R_h , например 1000 Ом, и $l < 100$ км выражение в квадратных скобках под корнем в (10.10) весьма мало по сравнению с единицей и поэтому может быть принято равным нулю*. Тогда напряжение прикосновения, В,

$$U_{\text{пр}} = U_{\phi} \omega C_{a,b} l R_h, \quad (10.11)$$

а ток, А, проходящий через человека,

$$I_h = U_{\text{пр}} / R_h = U_{\phi} \omega C_{a,b} l. \quad (10.12)$$

Нетрудно видеть, что этот ток в результате принятых нами допущений — ток замыкания отключенного провода на землю.

Пример 10.2. На отключенном и незаземленном проводе линия 110 кВ наводится электростатический потенциал $\phi_s = 8,5$ кВ (см. пример 10.1). Человек прикоснулся к этому проводу. Определить I_h и $U_{\text{пр}}$ для двух случаев: при $l = 100$ км и $l = 0,02$ км; $R_h = 1000$ Ом. Дано: $C_{a,b} = 1,1 \cdot 10^{-9}$ Ф/км.

Решение. Пользуясь уравнениями (10.11) и (10.12), находим:

1) при $l = 100$ км

$$U_{\text{пр}} = \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} 314 \cdot 1,1 \cdot 10^{-9} \cdot 100 \cdot 1000 = 2200 \text{ В};$$

$$I_h = 2200 / 1000 = 2,2 \text{ А}.$$

Следовательно, в данном случае прикосновение является смертельно опасным;

2) при $l = 0,02$ км

$$U_{\text{пр}} = \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} 314 \cdot 1,1 \cdot 10^{-9} \cdot 0,02 \cdot 1000 = 0,45 \text{ В};$$

$$I_h = 0,45 / 1000 = 0,45 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 0,45 \text{ мА}.$$

В этом случае прикосновение является безопасным несмотря на то, что наведенный потенциал очень высок: 8,5 кВ. Понятно, что после прикосновения человека этот потенциал снизился до $U_{\text{пр}} = 0,45$ В.

Прикосновение к заземленному проводу (рис. 10.4, б) можно рассматривать как повторное заземление провода через тело человека.

Напряжение прикосновения в указанном случае определяется уравнением (10.9), в котором вместо R_h надо под-

* В самом деле, при $C_{a,b} = 1,1 \cdot 10^{-9}$ Ф/км, $C_{b0} = 6,15 \cdot 10^{-9}$ Ф/км (см. пример 10.1), $l = 100$ км, $R_h = 1000$ Ом получим $[\omega(C_{a,b} + C_{b0}) l R_h]^2 = [314(1,1 \cdot 10^{-9} + 6,15 \cdot 10^{-9}) \cdot 10^2 \cdot 10^3]^2 = 0,052 \ll 1$.

ставить сопротивление, равное параллельно соединенным сопротивлениям R_h и R_3 :

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{ф}} \frac{\omega C_{a,b} I R_h}{\sqrt{[\omega(C_{a,b} + C_{b0}) I R_h]^2 + [(R_h + R_3)/R_3]^2}}, \quad (10.13)$$

где R_3 — сопротивление заземления, Ом.

Поскольку, как правило,

$$R_3 \ll R_h \text{ и } [\omega(C_{a,b} + C_{b0}) I R_h] \ll (R_h + R_3)/R_3,$$

можно считать, что знаменатель дроби в (10.13) равен отношению R_h/R_3 . Тогда напряжение прикосновения, В,

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{ф}} \omega C_{a,b} I R_3, \quad (10.14)$$

а ток I_h , А, проходящий через человека,

$$I_h = U_{\text{пр}}/R_h = U_{\text{ф}} \omega C_{a,b} I R_3/R_h. \quad (10.15)$$

Ток I_3 , А, стекающий в землю через заземлитель, равен

$$I_3 = U_{\text{пр}}/R_3 = U_{\text{ф}} \omega C_{a,b} I. \quad (10.16)$$

Если задано допустимое напряжение прикосновения $U_{\text{пр, доп}}$, то можно определить сопротивление заземления $R_{3,6}$, Ом, при котором прикосновение к проводу вблизи заземления безопасно. Для этого в (10.14) надо заменить $U_{\text{пр}}$ на $U_{\text{пр, доп}}$, а R_3 на $R_{3,6}$. В итоге получим

$$R_{3,6} = U_{\text{пр, доп}}/U_{\text{ф}} \omega C_{a,b} I. \quad (10.17)$$

Сказанное о проводе, заземленном в одной точке, относится и к проводу, заземленному в нескольких местах, поскольку под сопротивлением R_3 можно понимать общее сопротивление нескольких заземлителей.

Пример 10.3. Человек прикоснулся к отключенному и заземленному проводу линии 110 кВ, в то время как другие два провода находились под напряжением. Определить $U_{\text{пр}}$, I_h и $R_{3,6}$. Дано: $R_3 = 20$ Ом; $l = 100$ км; $C_{a,b} = 1,1 \cdot 10^{-9}$ Ф/км; $R_h = 1000$ Ом; $U_{\text{пр, доп}} = 12$ В.

Решение. Из (10.14) и (10.15) находим

$$U_{\text{пр}} = \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} 314 \cdot 1,1 \cdot 10^{-9} \cdot 100 \cdot 20 = 44 \text{ В};$$

$$I_h = 44/1000 = 0,044 \text{ А} = 44 \text{ мА},$$

т. е. прикосновение недопустимо.

Из (10.17) имеем

$$R_{3,6} = \frac{12}{\frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} 314 \cdot 1,1 \cdot 10^{-9} \cdot 100} = 5,5 \text{ Ом.}$$

При этом сопротивлении заземления напряжение прикосновения к проводу, обусловленное электростатическим влиянием, не превысит наперед заданного значения 12 В, т. е. прикосновение к проводу допустимо.

10.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЛИЯНИЕ

а) Значение наведенной ЭДС

Токи, проходящие по оставшимся в работе проводам ВЛ, образуют вокруг них переменное магнитное поле, часть силовых линий которого пересекает третий отключенный провод и наводит на нем ЭДС взаимной индукции.

Каждый из оставшихся в работе проводов можно рассматривать как первичную обмотку одновиткового трансформатора тока, а отключенный провод — как разомкнутую вторичную обмотку (рис. 10.5). Напряжение на концах вторичной обмотки, т. е. между началом и концом отключенного провода, есть наведенная ЭДС взаимной индукции, которую обычно называют продольной ЭДС.

Как известно из основ электротехники, мгновенное значение продольной ЭДС, наведенной магнитным полем одного из оставшихся в работе проводов, например провода 1 (фаза А), определяется выражением

$$e_A = -M_{A1} \frac{di}{dt}. \quad (10.18)$$

Поскольку влияющий ток — синусоидальный, взяв производную по времени от $i = I_{\max} \sin \omega t$ и подставив ее в выражение (10.18), получим

$$e_A = \omega M_{A1} I_{\max} \sin(\omega t - \pi/2),$$

откуда действующее значение ЭДС E_A , В, будет равно:
в комплексной форме

$$\dot{E}_A = -j\omega M_{A1} \dot{I}_A;$$

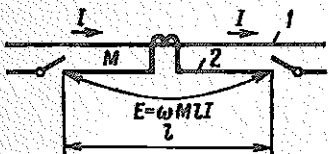


Рис. 10.5. Схема, имитирующая возникновение продольной ЭДС E на отключенном проводе как во вторичной обмотке трансформатора тока:

1 — работающий (неотключенный) провод — первичная обмотка трансформатора тока; 2 — отключенный провод — вторичная разомкнутая обмотка трансформатора тока

в действительной форме

$$E_A = \omega M_{AII_A}, \quad (10.19)$$

где M_A — взаимная индуктивность между рабочим и отключенным проводами, Гн/км; l — длина подверженного влиянию, т. е. отключенного, провода, км; I_A — индуцирующий ток (ток в фазе A), А.

Продольная ЭДС $\dot{E}$, В, обусловленная влиянием обоих рабочих проводов, равна сумме ЭДС, наведенных полями этих проводов:

$$\dot{E} = \dot{E}_A + \dot{E}_B = -j\omega M l (\dot{I}_A + \dot{I}_B).$$

В данном случае считаем, что благодаря транспозиции проводов их взаимные индуктивности равны.

В действительной форме эта суммарная ЭДС, В,

$$E = \omega M l I. \quad (10.20)$$

Значение продольной ЭДС на единицу длины провода E_0 В/км, равно

$$E_0 = E/l = \omega M I. \quad (10.21)$$

В этих уравнениях I — действующее значение суммарного индуцирующего тока обоих работающих проводов, А. В рабочем режиме ВЛ, когда по оставшимся в работе проводам проходят токи нагрузки I_A и I_B (которые могут отличаться от токов на грузки до отключения третьего провода), индуцирующий ток является суммой этих токов:

$$I = I_A + I_B,$$

причем угол между векторами токов I_A и I_B , а следовательно и значение I зависят от соотношения сопротивлений обратной и нулевой последовательностей. В аварийном режиме

т. е. при КЗ одной из работающих фаз на землю, индуцирующий ток будет равен току замыкания на землю: $I = I_3$.

Таким образом, значение E зависит от длины отключенного участка провода, взаимной индуктивности проводов и влияющего тока и не зависит от напряжения линии.

Длина отключенного провода определяется местными условиями — схемой сети, наличием на линии коммутационных аппаратов и т. п.

Взаимная индуктивность проводов зависит от расстояния между ними d , м, высоты подвеса проводов над землей и удельного сопротивления грунта ρ , Ом·м.

Для условий пофазного ремонта модуль взаимной индуктивности проводов, Гн/км, можно определить по следующей приближенной формуле:

$$M = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{113\sqrt{\rho}}{d}. \quad (10.22)$$

Пример 10.4. Определить M линии 110 кВ с горизонтальным расположением проводов, если расстояние между проводами $d = 4$ м, а удельное сопротивление земли $\rho = 30$ Ом·м.

Решение. Согласно (10.22)

$$M = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{113\sqrt{30}}{4^2} = 10^{-3} \text{ Гн/км.}$$

Индуцирующий ток одной и той же линии может иметь разные значения. Это — ток холостого хода линии, ток нагрузки и, наконец, ток замыкания одной из фаз линии на землю, который обычно во много раз превышает ток нормального режима. Очевидно, что по условиям безопасности надо ориентироваться на худший случай, т. е. принимать в качестве индуцирующего ток замыкания на землю одной из работающих фаз (рис. 10.6), и, следовательно, пользоваться уравнением (10.19). Однако это не значит, что продольная ЭДС, обусловленная током нагрузки, мала; как правило, она оказывается значительной.

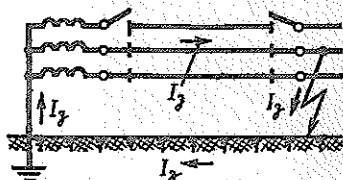


Рис. 10.6. Замыкание на землю одной из оставшихся в работе фаз ВЛ

Пример 10.5. Определить продольную ЭДС, наводимую на отключенном проводе линии 110 кВ длиной 100 км. Дано $M = 10^{-3}$ Гн/км; индуцирующий ток в нормальном режиме $I = 35$ А, а при замыкании одной из фаз на землю (за пределами отключенного провода) $I_3 = 950$ А.

Решение. Из (10.19) находим:
при нормальном режиме

$$E = 314 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 35 = 1000 \text{ В};$$

при замыкании фазы на землю

$$E = 314 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 950 = 30 \cdot 10^3 \text{ В}.$$

6) Потенциальная характеристика незаземленного провода

Уравнение потенциальной характеристики, определяющее потенциал провода в разных его местах, находим следующим путем. Для упрощения принимаем, что продольная ЭДС E на проводе обусловлена работой генератора, включенного в расщепку провода, и что распределенные емкостные сопротивления провода относительно земли* сосредоточены по его концам $X_{C,н}$ и $X_{C,к}$ и имеют одинаковые значения (рис. 10.7):

$$X_{C,н} = X_{C,к} = 2/\omega C_{б0}l, \quad (10.23)$$

где $C_{б0}$ — емкость провода относительно земли, Ф/км; l — длина провода, км.

Тогда в замкнутом контуре провод — $X_{C,н}$ — земля — $X_{C,к}$ пойдет ток электромагнитной индукции, А,

$$I_k = \frac{E}{X_{C,н} + X_{C,к}} = \frac{E}{2X_{C,н}}. \quad (10.24)$$

Теперь можно найти выражение для потенциала φ_x , В, любой точки провода, например точки А, отстоящей от начала провода на расстоянии x (рис. 10.8).

Приняв потенциал земли равным нулю, мы вправе написать

$$\varphi_x = I_k X_{C,н} - \frac{E}{l} x.$$

* Проводимостью изоляции провода относительно земли пренебрегаем за ее малостью.

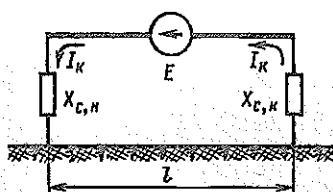


Рис. 10.7. Схема, имитирующая условия возникновения продольной ЭДС E в проводе с помощью генератора, включенного в рассечку провода и обладающего ЭДС, равной наводимой ЭДС E

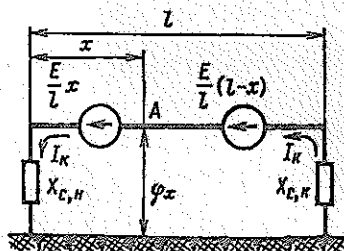


Рис. 10.8. К определению уравнения потенциальной характеристики незаземленного провода, подверженного электромагнитному влиянию

Заменив здесь I_K его значением из (10.24), получим искомое уравнение потенциальной кривой, позволяющее определить потенциал φ_x В, любой точки провода:

$$\varphi_x = -\frac{E}{l}x + \frac{E}{2}. \quad (10.25)$$

Это же уравнение может быть найдено более точным путем.

Отключенный провод можно рассматривать как однопроводную цепь с распределенными параметрами и с возвратом тока через землю.

При электромагнитном влиянии рабочего провода на этот провод установившийся процесс распространения электрической энергии будет определяться следующими дифференциальными уравнениями:

$$-\frac{d\dot{\varphi}_x}{dx} = j\omega M \dot{I} + (r_0 + j\omega L_0) \dot{I}_x; \quad (10.26)$$

$$-\frac{d\dot{I}_x}{dx} = (g_{b0} + j\omega C_{b0}) \dot{\varphi}_x, \quad (10.27)$$

где $\dot{\varphi}_x$ и $\dot{I}_x$ — потенциал провода, В, и ток в проводе, А, в точке, отстоящей от начала провода на расстоянии x ; r_0 , L_0 , g_{b0} , C_{b0} — постоянные провода на 1 км длины; I — индуцирующий ток, А.

Продифференцировав (10.26) и подставив в полученное выражение значение производной $d\dot{I}_x/dx$ из (10.27), будем иметь

$$\frac{d^2\dot{\varphi}_x}{dx^2} - \dot{\varphi}_x \underline{Y}^2 = 0, \quad (10.28)$$

где $\underline{\gamma}$ — постоянная распространения цепи провод — земля (комплексное выражение), 1/км:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0)(g_{b0} + j\omega C_{b0})}.$$

Уравнение (10.28) имеет, как известно, следующее решение, определяющее потенциал ϕ_x , В, в любой точке провода:

$$\phi_x = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x}. \quad (10.29)$$

Продифференцировав это уравнение и подставив результат в (10.26), получим выражение, определяющее значение индуцированного тока I_x , А, в любой точке провода:

$$I_x = -\frac{1}{\underline{Z}_C} (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}) - k I, \quad (10.30)$$

где A_1 и A_2 — постоянные интегрирования (комплексные числа); $\underline{Z}_C$ — характеристическое сопротивление провода, Ом,

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega L_0}{g_{b0} + j\omega C_{b0}}}; \quad (10.31)$$

k — коэффициент,

$$k = \frac{j\omega M}{r_0 + j\omega L_0}. \quad (10.32)$$

Чтобы определить постоянные A_1 и A_2 , подставим в уравнения (10.29) и (10.30) значения x , ϕ_x , I_x , соответствующие началу и концу провода, в результате получим

$$\left. \begin{aligned} \phi_n &= A_1 + A_2; \\ \phi_k &= A_1 e^{\gamma l} + A_2 e^{-\gamma l}; \\ I_n &= -\frac{1}{\underline{Z}_C} (A_1 - A_2) - k I; \\ I_k &= -\frac{1}{\underline{Z}_C} (A_1 e^{\gamma l} - A_2 e^{-\gamma l}) - k I. \end{aligned} \right\} \quad (10.33)$$

Здесь ϕ_n , ϕ_k , I_n , I_k — потенциалы и токи в начале и конце провода. Решив систему уравнений (10.33), будем иметь

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= k I \underline{Z}_C \frac{e^{-\gamma l} - 1}{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}; \\ A_2 &= k I \underline{Z}_C \frac{e^{\gamma l} - 1}{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}. \end{aligned} \right\} \quad (10.34)$$

Подставив в (10.29) и (10.30) значения A_1 и A_2 из (10.34) и произведя соответствующие преобразования, получим выражения для потен-

пнала $\dot{\Phi}_x$, $\dot{B}$, и тока $\dot{I}_x$, A , в любой точке отключенного и изолированного от земли провода ВЛ:

$$\dot{\Phi}_x = \frac{\dot{E}}{\gamma l} \frac{\text{sh}(0,5\gamma l - \gamma x)}{\text{ch}(0,5\gamma l)};$$

$$\dot{I}_x = \frac{\dot{E}}{l(r_0 + j\omega L_0)} \left[\frac{\text{ch}(0,5\gamma l - \gamma x)}{\text{ch}(0,5\gamma l)} - 1 \right]$$

или

$$\dot{\Phi}_x = \frac{\dot{E}}{\gamma l} \frac{\text{sh}(0,5\gamma l) \text{ch}(\gamma x) - \text{ch}(0,5\gamma l) \text{sh}(\gamma x)}{\text{ch}(0,5\gamma l)}; \quad (10.35)$$

$$\dot{I}_x = \frac{\dot{E}}{l(r_0 + j\omega L_0)} \times \left[\frac{\text{ch}(0,5\gamma l) \text{ch}(\gamma x) - \text{sh}(0,5\gamma l) \text{sh}(\gamma x)}{\text{ch}(0,5\gamma l)} - 1 \right] \quad (10.36)$$

Для проводов воздушных линий даже при больших длинах (до 100–200 км) $0,5\gamma l < 0,025$.

Например:

а) для провода АС-150 на ВЛ 35 кВ при $C_{\text{в}0} = 5,3 \cdot 10^{-9}$ Ф/км, $r_0 = 0,21$ Ом/км, $L_0 = 13 \cdot 10^{-4}$ Гн/км и $l = 50$ км имеем $0,5\gamma l = 0,022$;

б) для провода АСО-500 на ВЛ 220 кВ при $C_{\text{в}0} = 6,05 \cdot 10^{-9}$ Ф/км, $r_0 = 0,065$ Ом/км, $L_0 = 14 \cdot 10^{-4}$ Гн/км и $l = 200$ км имеем $0,5\gamma l = 0,0245$.

Поэтому можно считать, что

$$\text{sh}(0,5\gamma l) = 0,5\gamma l \quad (\text{так как } \text{sh } 0,025 = 0,025);$$

$$\text{sh}(\gamma x) = \gamma x \quad (\text{так как } x \leq l \text{ и } \text{sh } 0,05 = 0,05);$$

$$\text{ch}(0,5\gamma l) = 1 \quad (\text{так как } \text{ch } 0,025 = 1);$$

$$\text{ch}(\gamma x) = 1 \quad (\text{так как } x \leq l \text{ и } \text{ch } 0,05 = 1).$$

В этом случае из (10.35) и (10.36) получим

$$\dot{\Phi}_x = -\frac{\dot{E}}{l} x + \frac{\dot{E}}{2}; \quad (10.37)$$

$$\dot{I}_x = 0.$$

При определении выражения для $\dot{I}_x$ из (10.36) приняли, что

$$0,5\gamma l \gamma l = 0,025 \cdot 0,05 \approx 0.$$

Уравнение (10.37) есть искомое уравнение потенциальной кривой в комплексной форме. В действительной форме оно будет таким же, но без точек над буквами. Таким образом, мы получили уравнение (10.25).

Нетрудно видеть, что (10.25) является уравнением прямой линии.

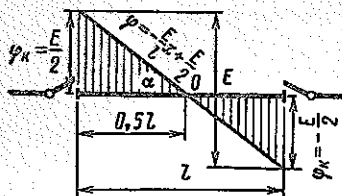


Рис. 10.9. Потенциальная характеристика незаземленного провода, подверженного электромагнитному влиянию

Угол наклона потенциальной прямой (характеристики) α к оси абсцисс зависит от значения коэффициента при переменной величине в уравнении (10.25). В самом деле, тангенс угла наклона, В/км равен

$$\operatorname{tg} \alpha = E/l = E_0 = \omega MI, \quad (10.38)$$

откуда угол наклона, рад,

$$\alpha = \operatorname{arctg} E_0 = \operatorname{arctg} \omega MI.$$

Следовательно, угол, а точнее — тангенс угла наклона потенциальной характеристики, определяет степень нарастания потенциала на проводе по мере удаления от точки нулевого потенциала. Он изменяется с изменением индуцирующего тока. Эта величина ($\operatorname{tg} \alpha$ или E_0) есть в то же время продольная ЭДС на единицу длины провода, В/м.

Пример 10.6. На отключенном проводе длиной $l = 100$ км наводится продольная ЭДС $E = 30 \cdot 10^3$ В (см. пример 10.5). Определить потенциалы провода на его концах и в середине φ_n , φ_k и $\varphi_{ср}$, а также наклон потенциальной прямой $\operatorname{tg} \alpha$.

Решение. Из (10.25) находим общее выражение для потенциала провода, В,

$$\varphi_x = -\frac{30 \cdot 10^3}{100} x + \frac{30 \cdot 10^3}{2} = -300x + 15 \cdot 10^3.$$

Теперь, подставив заданные значения x , получим:

$$\text{при } x = 0 \quad \varphi_n = 15 \cdot 10^3 \text{ В};$$

$$\text{при } x = l \quad \varphi_k = -15 \cdot 10^3 \text{ В};$$

$$\text{при } x = 0,5l \quad \varphi_{ср} = 0.$$

Из (10.38) находим

$$\operatorname{tg} \alpha = E_0 = 30 \cdot 10^3 / 100 = 300 \text{ В/км}.$$

Следовательно, потенциал отключенного и незаземленного провода, обусловленный электромагнитным влиянием оставшихся в работе проводов, меняется по закону прямой линии. При этом (рис. 10.9):

в начале провода, т. е. при $x = 0$, $\varphi_n = 0,5E$;

в конце провода, т. е. при $x = l$, $\varphi_k = -0,5E$;

в середине провода, т. е. при $x = 0,5l$, $\varphi_{ср} = 0$.

в) Потенциальная характеристика заземленного провода

Уравнение потенциальной характеристики. Пусть отключенный провод, на котором в результате электромагнитного влияния наводится продольная ЭДС, заземлен в нескольких местах (рис. 10.10).

Потенциал провода φ_x , В, в какой-либо точке, например в точке А, отстоящей от крайнего заземления R_1 на расстоянии x , км,

$$\varphi_x = \varphi_n - \frac{E}{l}(x - L_k)$$

или после преобразования

$$\varphi_x = -\frac{E}{l}x + \left(\frac{E}{l}l_k + \varphi_k\right), \quad (10.39)$$

где φ_k — потенциал провода в точке В или, что одно и то же, падение напряжения в сопротивлении заземления R_k , В; l_k — расстояние от крайнего заземления R_1 до точки В (до заземления R_k), км.

Значение φ_k нам неизвестно, однако бесспорно, что этот потенциал не зависит от переменной x и поэтому в данной формуле является постоянной величиной, так же как E , l и l_k .

Отсюда следует, что выражение (10.39) является уравнением прямой линии, имеющей наклон к оси абсцисс, В/км:

$$\operatorname{tg} \alpha = E/l = E_0.$$

Таким образом, потенциал заземленного провода (при любом числе заземлений) меняется по закону прямой линии, так же

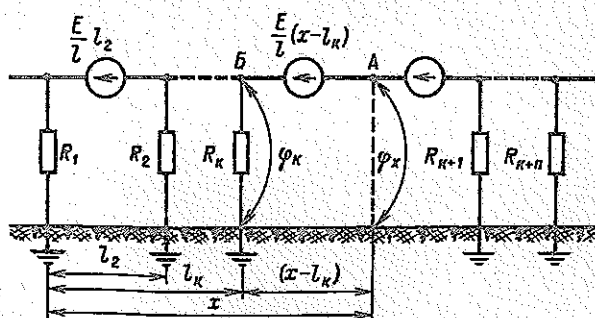


Рис. 10.10. К определению уравнения потенциальной характеристики заземленного провода, подверженного электромагнитному влиянию

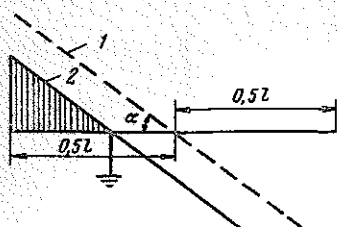


Рис. 10.11. Потенциальные характеристики провода, подверженного электромагнитному влиянию:

1 — провод изолирован от земли; 2 — провод заземлен (в одной точке)

как и изолированного от земли провода. Эти прямые имеют одинаковый наклон, но сдвинуты одна относительно другой, т. е. их точки нулевого потенциала расположены в разных местах по длине провода (рис. 10.11).

Положение точки нулевого потенциала на проводе — место пересечения потенциальной характеристики с осью абсцисс — найдем следующим образом.

Пусть на провод наложено несколько заземлений с сопротивлениями $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$, Ом (рис. 10.12). Расстояния их от крайнего заземления R_1 равны $l_2, l_3, \dots, l_n$, км. Через заземлители протекают неизвестные нам токи $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$, А. Известны наведенная ЭДС E и угол наклона потенциальной характеристики α . Требуется найти положение точки нулевого потенциала 0 , т. е. расстояние от R_1 до точки 0 . Обозначим это расстояние буквой x_0 .

В соответствии с рис. 10.12 можно составить n следующих уравнений:

$$\left. \begin{aligned} I_1 R_1 &= x_0 \operatorname{tg} \alpha; \\ I_2 R_2 &= (x_0 - l_2) \operatorname{tg} \alpha; \\ I_3 R_3 &= (x_0 - l_3) \operatorname{tg} \alpha; \\ I_n R_n &= (x_0 - l_n) \operatorname{tg} \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (10.40)$$

Кроме того, нам известно еще одно уравнение

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = 0.$$

Решив совместно эти уравнения, получим уравнение, определяющее положение точки нулевого потенциала при любом числе заземлений, т. е. значение x_0 , км:

$$x_0 = \frac{l_2/R_2 + l_3/R_3 + \dots + l_n/R_n}{1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \dots + 1/R_n} = \frac{\sum_2^n l/R}{\sum_1^n 1/R}. \quad (10.41)$$

Рис. 10.12. Потенциальная характеристика провода, заземленного в нескольких точках

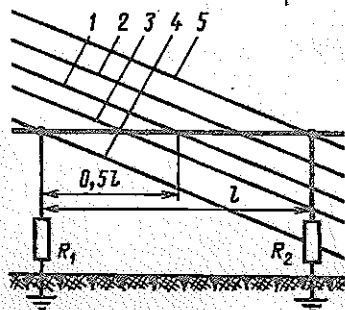
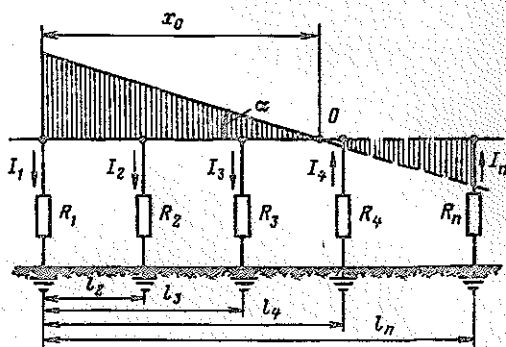


Рис. 10.13

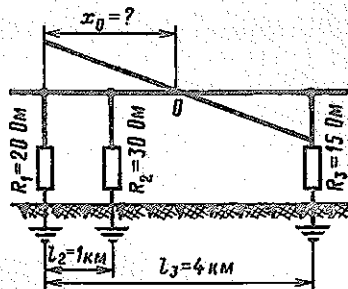


Рис. 10.14

Рис. 10.13. Потенциальные характеристики провода, заземленного в двух точках:

1 — при $R_1 = R_2$; 2 — при $R_1 > R_2$; 3 — при $R_1 < R_2$; 4 — при $R_1 = 0$ и $R_2 \neq 0$; 5 — при $R_1 \neq 0$ и $R_2 = 0$

Рис. 10.14. К примеру 10.7. (определение положения точки нулевого потенциала)

В частности, при одном заземлении, т. е. когда $l_2 = l_3 = \dots = l_n = 0$, точка нулевого потенциала совпадает с точкой наложения на провод заземления и, следовательно, $x_0 = 0$ (рис. 10.11).

При двух заземлениях с сопротивлениями R_1 и R_2 и расстоянии между ними l , т. е. когда $l_3 = l_4 = \dots = l_n = 0$ (рис. 10.13),

$$x_0 = \frac{l/R_2}{1/R_1 + 1/R_2} = l \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad (10.42)$$

причем если $R_1 = R_2$, то $x_0 = 0,5l$; если $R_1 > R_2$, то $x_0 > 0,5l$; если $R_1 < R_2$, то $x_0 < 0,5l$; если $R_1 = 0$, то $x_0 = 0$; если $R_2 = 0$, то $x_0 = l$.

Пример 10.7. Отключенный провод, на котором наводится продольная ЭДС, заземлен в трех местах (рис. 10.14), причем $R_1 = 20 \text{ Ом}$; $R_2 = 30 \text{ Ом}$; $R_3 = 15 \text{ Ом}$; $l_2 = 1 \text{ км}$; $l_3 = 4 \text{ км}$. Определить положение точки нулевого потенциала x_0 .

Решение. Из (10.41) находим

$$x_0 = \frac{1/30 + 4/15}{1/20 + 1/30 + 1/15} = 2 \text{ км.}$$

г) Опасность прикосновения к проводу

Опасность прикосновения к проводу, на котором наводится продольная ЭДС, оценивается током I_h , проходящим через человека, или напряжением прикосновения $U_{пр} = I_h R_h$.

Прикосновение к незаземленному проводу можно рассматривать как заземление его через сопротивление тела человека R_h , Ом. При этом надо учесть, что провод, как мы условились ранее, имеет еще две связи с землей: через емкостные сопротивления $X_{C,н}$ и $X_{C,к}$, равные между собой и включенные на его концах (рис. 10.15).

Напряжение прикосновения $U_{пр}$, В, т. е. напряжение, под которым окажется человек после прикосновения к проводу, можно определить методом узлового напряжения:

$$\dot{U}_{пр} = \frac{\frac{\dot{E}}{l} l_{пр} \underline{Y}_{C,н} + \frac{\dot{E}}{l} (l - l_{пр}) \underline{Y}_{C,к}}{\underline{Y}_{C,н} + \underline{Y}_h + \underline{Y}_{C,к}},$$

где $\dot{U}_{пр}$ — комплекс напряжения прикосновения, В; $l_{пр}$ — расстояние от начала провода до места прикосновения, км; $\underline{Y}_{C,н}$ и $\underline{Y}_{C,к}$ — комплексы проводимостей на концах провода, См:

$$\underline{Y}_{C,н} = j/X_{C,н}; \quad \underline{Y}_{C,к} = j/X_{C,к};$$

$\underline{Y}_h = 1/R_h$ — проводимость тела человека, См.

После простейших преобразований, принимая во внимание, что $X_{C,н} = X_{C,к}$, получим

$$\dot{U}_{пр} = \frac{\dot{E}}{l} (l - 2l_{пр}) \frac{R_h}{2R_h - jX_{C,н}}$$

или в действительной форме

$$U_{пр} = \frac{E}{l} (l - 2l_{пр}) \frac{R_h}{\sqrt{4R_h^2 + X_{C,н}^2}} \quad (10.43)$$

Уместно отметить, что $U_{\text{пр}}$ меньше того потенциала, который существовал в данной точке до прикосновения (рис. 10.16).

Ток I_h , А, проходящий через человека, будет равен

$$I_h = \frac{U_{\text{пр}}}{R_h} = \frac{E}{l} \frac{l - 2l_{\text{пр}}}{\sqrt{4R_h^2 + X_{\Sigma, \text{н}}^2}} \quad (10.44)$$

Наиболее безопасной точкой прикосновения будет точка нулевого потенциала, находящаяся в данном случае посередине провода, т. е. при $l_{\text{пр}} = 0,5l$. В этой точке согласно (10.43) и (10.44)

$$U_{\text{пр}} = 0 \text{ и } I_h = 0.$$

Располагая допустимым напряжением прикосновения $U_{\text{пр, доп}}$, В, можно определить зону безопасного прикосновения к проводу, т. е. длину участка провода $l_{\text{без}}$, км, в пределах которой безопасно прикасаться к проводу. Для незаземленного провода эта зона лежит по обе стороны от его середины (рис. 10.16) и равна

$$l_{\text{без}} = l - 2l'_{\text{пр}},$$

где $l'_{\text{пр}}$ — расстояние от начала провода до точки прикосновения, в которой $U_{\text{пр}} = U_{\text{пр, доп}}$, км. Тогда, заменив в (10.43) $U_{\text{пр}}$ на $U_{\text{пр, доп}}$ и $(l - 2l_{\text{пр}})$ на $l_{\text{без}}$ и решив уравнение относительно $l_{\text{без}}$, получим

$$l_{\text{без}} = l \frac{U_{\text{пр, доп}}}{E} \frac{\sqrt{4R_h^2 + X_{\Sigma, \text{н}}^2}}{R_h} \quad (10.45)$$

Пример 10.8. Человек прикасается к отключенному и незаземленному проводу ВЛ 110 кВ длиной 100 км, на котором наводится продольная ЭДС $E = 30 \cdot 10^3$ В (см. пример 10.5).

Определить $U_{\text{пр}}$ и I_h для случаев прикосновения к началу провода и к точке, отстоящей от начала на 40 км, а также $l_{\text{без}}$.

Дано: $C_{b0} = 7,2 \cdot 10^{-9}$ Ф/км; $R_h = 1000$ Ом; $U_{\text{пр, доп}} = 12$ В.

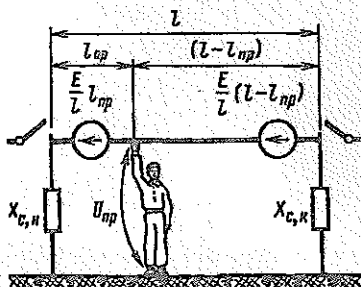


Рис. 10.15. Прикосновение человека к незаземленному проводу, подверженному электромагнитному влиянию

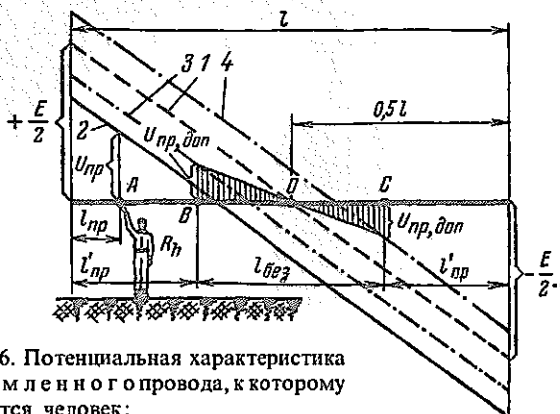


Рис. 10.16. Потенциальная характеристика незаземленного провода, к которому прикасается человек:

1 — до прикосновения человека к проводу; 2 — после прикосновения человека к проводу в точке А (общий случай); 3 и 4 — после прикосновения к точкам В и С, являющимся границами безопасной зоны

Решение. Предварительно определяем $X_{C,н}$ из (10.23):

$$X_{C,н} = \frac{2}{\omega C_{б0} l} = \frac{2 \cdot 10^9}{314 \cdot 7,2 \cdot 100} = 8850 \text{ Ом.}$$

Затем, пользуясь уравнениями (10.43) и (10.44), находим: для случая $l_{пр} = 0$

$$U_{пр} = \frac{30 \cdot 10^3}{100} 100 \frac{1000}{\sqrt{4 \cdot 1000^2 + 8850^2}} = 3250 \text{ В;}$$

$$I_h = 3250/1000 = 3,25 \text{ А;}$$

для случая $l_{пр} = 40 \text{ км}$

$$U_{пр} = \frac{30 \cdot 10^3}{100} (100 - 2 \cdot 40) \frac{1000}{\sqrt{4 \cdot 1000^2 + 8850^2}} = 650 \text{ В;}$$

$$I_h = 650/1000 = 0,65 \text{ А.}$$

Следовательно, в обоих случаях прикосновение совершенно недопустимо. Далее из (10.45) определяем зону, в которой прикосновение безопасно:

$$l_{без} = 100 \frac{12}{30 \cdot 10^3} \frac{\sqrt{4 \cdot 1000^2 + 8850^2}}{1000} = 0,36 \text{ км} = 360 \text{ м.}$$

Таким образом, прикасаться к проводу безопасно в пределах 180 м от его середины как в одну, так и в другую сторону (рис. 10.16).

Прикосновение к проводу, заземленному в одной точке A через сопротивление R_3 , Ом, можно рассматривать как повторное заземление его в точке прикосновения B через сопротивление тела человека R_h (рис. 10.17).

Ток I_h , А, проходящий через человека, равен, как это видно из рис. 10.17,

$$I_h = E_0 l_{AB} \frac{1}{R_h + R_3}, \quad (10.46)$$

где E_0 — продольная ЭДС на единице длины провода, В/км; l_{AB} — длина провода между точками заземления и прикосновения, км.

В данном случае мы пренебрегли емкостной проводимостью провода относительно земли, которая мала по сравнению с $1/R_3$ и $1/R_h$.

Напряжение прикосновения $U_{пр}$, В, будет равно

$$U_{пр} = I_h R_h = E_0 l_{AB} \frac{R_h}{R_h + R_3}. \quad (10.47)$$

Зона безопасного прикосновения $l'_{без}$, км, т. е. расстояние от точки заземления провода A до точки, где напряжение прикосновения не превышает $U_{пр, доп}$, определяется из (10.47), где $U_{пр}$ надо заменить на $U_{пр, доп}$, а l_{AB} — на $l'_{без}$. Тогда получим

$$l'_{без} = \frac{U_{пр, доп}}{E_0} \frac{R_h + R_3}{R_h}. \quad (10.48)$$

Эта зона расположена по одну сторону от точки заземления. Если провод продолжается за точкой A , то и там будет такая же зона (рис. 10.18).

Если $R_3 \ll R_h$, то (10.46) — (10.48) значительно упрощаются:

$$\left. \begin{aligned} I_h &= E_0 l_{AB} / R_h; \\ U_{пр} &= E_0 l_{AB}; \\ l'_{без} &= U_{пр, доп} / E_0. \end{aligned} \right\} \quad (10.49)$$

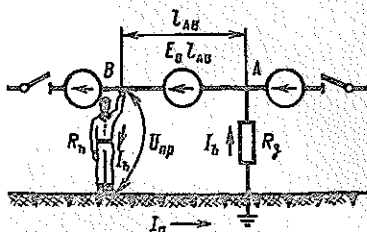


Рис. 10.17. Прикосновение человека к проводу, заземленному в одной точке

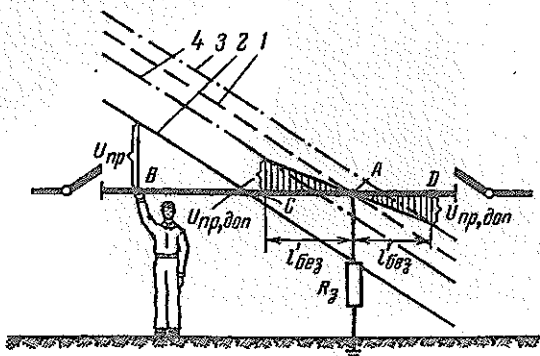


Рис. 10.18. Потенциальные характеристики провода, заземленного в одной точке A , до прикосновения к нему человека и после: 1 — до прикосновения; 2 — после прикосновения в точке B (общий случай); 3 и 4 — после прикосновения в точках C и D , являющихся границами безопасных зон

Пример 10.9. Человек прикасается к отключенному и заземленному в одном месте проводу линии 110 кВ, на котором наводится продольная ЭДС $E_0 = 300$ В/км (см. пример 10.5). Определить $U_{пр}$, I_h и $l_{без}$, если расстояние l_{AB} составляет 100 и 10 км; $R_3 = 10$ Ом; $R_h = 1000$ Ом; $U_{пр, доп} = 12$ В (рис. 10.18).

Решение. Учитывая, что $R_3 \ll R_h$, пользуемся формулами (10.49).

При $l_{AB} = 100$ км получим

$$U_{пр} = 300 \cdot 100 = 30 \cdot 10^3 \text{ В};$$

$$I_h = 30 \cdot 10^3 / 1000 = 30 \text{ А}.$$

При $l_{AB} = 10$ км найдем

$$U_{пр} = 300 \cdot 10 = 3000 \text{ В};$$

$$I_h = 10 \cdot 300 / 1000 = 3 \text{ А}.$$

Безопасная зона

$$l'_{без} = 12 / 300 = 0,04 \text{ км}.$$

Такая же зона находится и за точкой заземления.

Прикосновение к многократно заземленному проводу можно рассматривать как дополнительное заземление его через сопротивление тела человека R_h (рис. 10.19).

Напряжение прикосновения $U_{пр}$, В, определяется одним из уравнений системы (10.40)

$$U_{пр} = I_h R_h = (x_0 - l_{пр}) E_0, \quad (10.50)$$

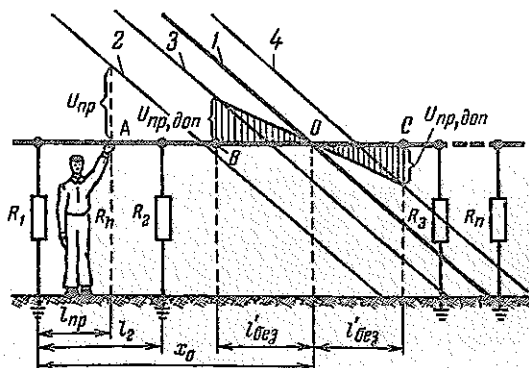


Рис. 10.19. Потенциальная характеристика многократно заземленного провода до и после прикосновения к нему человека:

1 — до прикосновения; 2 — после прикосновения в точке A (общий случай); 3 и 4 — после прикосновения в точках B и C, в которых $U_{пр} = U_{пр,доп}$

где x_0 — расстояние от крайнего заземления R_1 до точки нулевого потенциала, вычисленное с учетом заземления провода через сопротивление тела человека R_h , км; $l_{пр}$ — расстояние от заземления R_1 до точки прикосновения, км.

Ток I_h , А, проходящий через человека,

$$I_h = U_{пр}/R_h = (x_0 - l_{пр})E_0/R_h. \quad (10.51)$$

Зона безопасного прикосновения $l'_{без}$, км (по одну сторону от точки O) определяется из (10.50), если заменить $U_{пр}$ на $U_{пр,доп}$, а $(x_0 - l_{пр})$ на $l'_{без}$:

$$l'_{без} = U_{пр,доп}/E_0. \quad (10.52)$$

Пример 10.10. Человек прикасается к отключенному и заземленному в двух местах проводу, на котором наводится продольная ЭДС $E_0 = 300$ В/км (см. пример 10.6). Определить $U_{пр}$, I_h и $l'_{без}$, если $R_1 = R_2 = 20$ Ом; $l_2 = 100$ км; $R_h = 1000$ Ом; $U_{пр,доп} = 12$ В; $l_{пр} = 0$ и 40 км.

Решение. Пользуясь (10.41), (10.50) и (10.51), находим:

а) для случая $l_{пр} = 0$

$$x_0 = \frac{100/20}{1/20 + 1/1000 + 1/20} = 45 \text{ км};$$

$$U_{пр} = (45 - 0) \cdot 300 = 13\,500 \text{ В};$$

$$I_h = 13\,500/1000 = 13,5 \text{ А};$$

б) для случая $l_{пр} = 40$ км

$$x_0 = \frac{100/20 + 40/1000}{1/20 + 1/1000 + 1/20} = 46 \text{ км};$$

$$U_{пр} = (46 - 40) \cdot 300 = 1800 \text{ В};$$

$$I_n = 1800/1000 = 1,8 \text{ А};$$

в) безопасная зона по (10.52)

$$l'_{бз} = 12/300 = 0,04 \text{ км}.$$

Такая же зона находится и по другую сторону точки нулевого потенциала, лежащей в данном случае на середине провода (т. е. на одинаковом расстоянии от мест его заземления).

10.4. МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РЕМОНТЕ

а) Способы обеспечения безопасности прикосновения к проводу

При рассмотрении электростатического влияния мы установили, что опасность поражения человека током, обусловленная наличием на проводе электростатического потенциала, устраняется при заземлении провода хотя бы в одной точке. При этом сопротивление заземления $R_{з,б}$ должно быть не выше определенного значения, благодаря чему остаточный потенциал провода не превышает допустимого напряжения прикосновения. Значение этого сопротивления определяется выражением (10.17)

$$R_{з,б} = U_{пр, доп} / U_{ф\omega} C_{a,b} l.$$

При рассмотрении электромагнитного влияния нами установлено, что на проводе, как заземленном, так и незаземленном, имеются безопасные зоны — участки провода, к которым безопасно прикасаться (по условиям электромагнитного влияния).

У незаземленного провода указанная зона обычно в несколько раз длиннее. Однако она всегда находится в средней части провода (см. рис. 10.16) и не может быть смещена в необходимое для ремонта место. Это обстоятельство и главным образом то, что незаземленный провод остается опасным по условиям электростатического влияния, исключают возможность производства работ на незаземленном проводе.

У заземленного провода длина безопасной зоны практически не зависит от числа заземлений, т. е. она одина-

кова как у провода, заземленного в одной точке, так и у многократно заземленного [см. (10.49) и (10.52)].

У провода, заземленного в одной точке, безопасная зона примыкает непосредственно к точке заземления и расположена по обе стороны от нее (рис. 10.18).

У многократно заземленного провода указанная зона находится на участке между крайними заземлениями. Точное ее местоположение зависит от числа заземлений, их сопротивления и взаимного размещения (рис. 10.19).

Существенный недостаток многократного заземления провода — это то, что через заземления проходят токи, обусловленные продольной ЭДС. Например, при заземлении провода в двух точках (рис. 10.20) через заземления R_1 и R_2 будет проходить ток электромагнитной индукции I_M , А:

$$I_M = E_0 l_{AB} / (R_1 + R_2),$$

где l_{AB} — расстояние между заземлениями, км.

В нормальном режиме указанный ток относительно невелик, но он протекает непрерывно. В результате происходит высушивание почвы вокруг заземлителей, а следовательно, повышение их сопротивления. При коротком замыкании, когда вместе с E_0 резко возрастает и ток I_M , сопротивления заземлителей могут так измениться (по абсолютному значению или одно относительно другого), что произойдет смещение потенциальной характеристики провода, т. е. возникнет опасность поражения ремонтного персонала током. Вместе с тем большой ток I_M затрудняет устройство заземлений и может вызвать перегорание заземляющих проводов.

Поэтому для защиты от опасности поражения током, обусловленной электромагнитным влиянием, провод необходимо заземлять лишь в одном месте — месте производства работ. При этом на проводе по обе стороны от места заземления создается безопасная зона $l_{б\text{ез}}$, в которой напряжение прикосновения не превышает некоторого заранее заданного значения $U_{\text{пр, доп}}$. Протяженность безопасной зоны практически не зависит от сопротивления заземления провода $R_{3,6}$ (при условии,

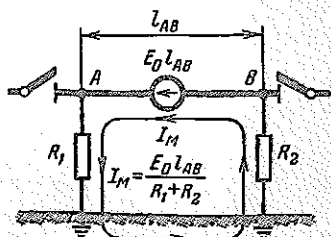


Рис. 10.20. Контур тока электромагнитной индукции при заземлении провода в двух точках

что оно мало по сравнению с сопротивлением тела человека) и определяется (10.52):

$$I'_{\text{без}} = U_{\text{пр, доп}} / E_0.$$

Таким образом, наиболее совершенным способом обеспечения безопасности прикосновения к проводу с учетом как электростатического, так и электромагнитного влияния является заземление его в одном месте.

Этот способ и принят действующими Правилами техники безопасности.

б) Подготовка провода к ремонту и производство работ

Отключение провода производят со всех сторон, откуда может быть подано напряжение. При этом с каждой стороны создают видимый разрыв.

При пофазном управлении провод отключают выключателями (отделителями) и линейными разъединителями. Приводы последних запирают на замки.

При отсутствии пофазного управления видимый разрыв создают путем демонтажа ошиновки на подстанции или разъединения провода в петле концевой опоры ВЛ.

На приводах разъединителей и выключателей вывешиваются плакаты «Не включать — работа на линии».

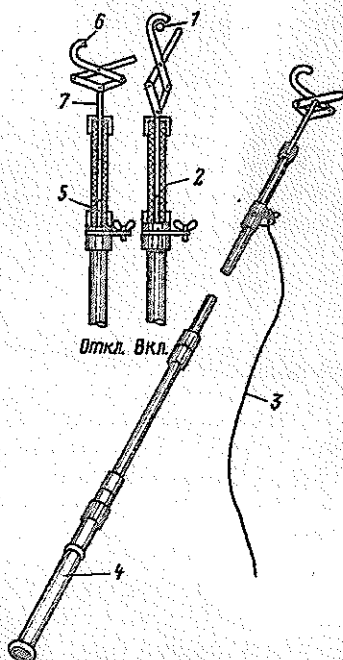
Заземление отключенного провода производят лишь в одном месте — месте выполнения работ. Заземлять провод в других местах, в том числе на подстанциях, где его отключали, запрещается.

Наложение и снятие с провода переносного заземления таит в себе опасность для человека в случае прикосновения его к незаземленному проводу. Кроме того, при этих операциях между проводом и зажимом переносного заземления возникает электрическая дуга, обусловленная емкостным током* и способная в ряде случаев причинить серьезные повреждения проводу и переносному заземлению. Для устранения этих опасностей провод до наложения на него (или снятия с него) обычного переносного заземления должен быть заземлен с помощью специальной изолирующей штанги-гасителя, которая надежно изолирует оператора

* Этот ток можно определить по (10.16), он достигает на линиях 35 кВ 0,01 А и 110 кВ 0,03 А на 1 км линии.

рис. 10.21. Штанга-гаситель для временного заземления отключенного провода воздушной линии 110—220 кВ при пофазном ремонте:

— провод линии, подлежащий заземлению; 2 — гасительная камера; 3 — гибкий заземляющий проводник; 4 — изолирующая штанга; 5 — неподвижный контакт, металлически связанный с проводником 3; 6 — захват, надеваемый на заземляемый провод (выполнен в виде пантографа); 7 — подвижный контакт, соединенный с пантографом и управляемый им; при сложенном пантографе контакт вытягивается (отключение), при растянутом опускается до соприкосновения с контактом 5 (включение)



от провода и гасит возникшую дугу в особой гасительной камере (рис. 10.21).

На линиях 35 кВ вследствие относительно небольшого емкостного тока заземление провода можно выполнять обычной штангой для наложения заземления.

При заземлении отключенного провода следует использовать в первую очередь заземлители опор ВЛ, присоединяя переносное заземление к элементам металлических опор либо к заземляющим спускам на железобетонных и деревянных опорах. На железобетонных опорах допускается присоединять переносное заземление к арматуре или металлическим элементам опоры, имеющим металлическую связь с арматурой. Если такой возможности нет или если сопротивление заземлителя опоры велико и не обеспечивает безопасности прикосновения к проводу (по условиям электростатического влияния), необходимо создать временный дополнительный или отдельный заземлитель из стержневых электродов, погружаемых в землю на глубину не менее 0,5 м и объединяемых проводом в общий контур. Расстояние между ними должно быть не менее 2 м.

Наибольшее допустимое сопротивление заземляющего устройства $R_{3,6}$ определяют уравнением (10.17). Однако на практике $R_{3,6}$ не вычисляют, а подбирают опытным путем, так чтобы падение напряжения в нем не превышало допустимого напряжения прикосновения $U_{пр. доп}$. Для этого, за

землив с помощью штанги-гасителя провод, определяют вольтметру падение напряжения на заземлителе.

Вольтметр должен быть включен между заземлителем и полнительным электродом-зондом, забитым в землю не бли 15 м от контура заземлителя (рис. 10.22). Если показание воли метра будет выше заранее заданного $U_{\text{пр, доп}}$, следует сня штангу-гаситель с провода, а затем принять меры к снижени сопротивления заземлителя путем углубления электродов, ув личения их числа и другими способами. Обычно принимается $U_{\text{пр, доп}} \leq 40$ В.

Переносное заземление должно иметь два спуска каждый из которых одним концом присоединен к контактному зажиму, накладываемому на провод, а другим — к заземляющему устройству (рис. 10.23).

Необходимость двух спусков продиктована требованиями надежности: при случайном срыве или обрыве одного из спусков провод продолжает оставаться заземленным. Это чрезвычайно важно по условиям безопасности, ибо в противном случае потенциал провода резко возрастет со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Место работы, когда требуется прикосновение к отключенному проводу, должно находиться вблизи установленного заземления и не выходить за пределы безопасной зоны.

Протяженность безопасной зоны обусловлена электромагнитным влиянием и, как указывалось, не зависит обычно от сопротивления заземления. Протяженность безопасной зоны, км, может быть определена по (10.49) с введением в него коэффициента запаса,

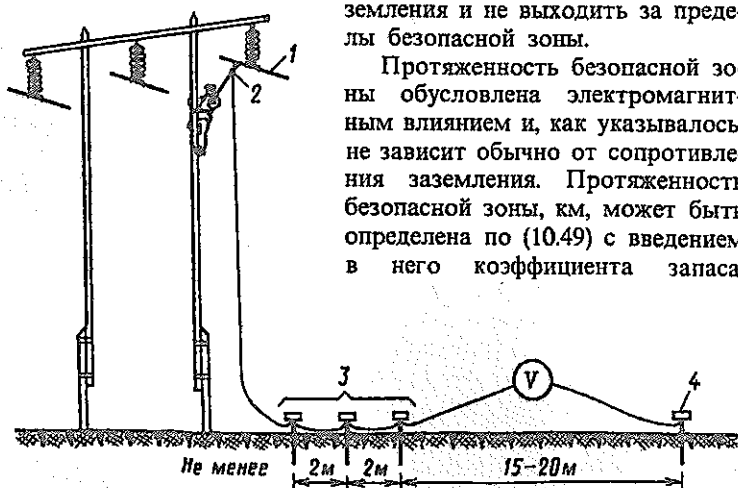
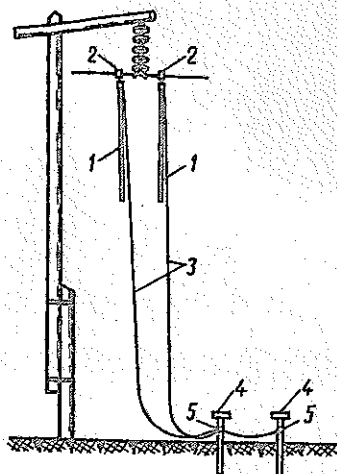


Рис. 10.22. Замер падения напряжения на сопротивлении заземлителя:

1 — отключенный провод; 2 — штанга-гаситель; 3 — заземлители; 4 — электрод-зонд

Рис. 10.23. Переносное заземление, установленное на отключенный провод:

1 — штанга; 2 — контактные зажимы; 3 — заземляющие спуски (гибкий провод); 4 — заземлители; 5 — струбцина заземляющих спусков



равного, например, 2:

$$I'_{\text{без}} = U_{\text{пр. доп}} / 2E_0,$$

где $U_{\text{пр. доп}}$ — допустимое напряжение прикосновения, В; E_0 — продольная ЭДС, наведенная на 1 км провода при замыкании на землю одного из оставшихся в работе проводов линии, В/км, определяется по (10.21).

Эта зона лежит по одну сторону от точки заземления. По другую сторону находится такая же зона*.

Если необходимо работать одновременно в нескольких местах, находящихся за пределами безопасной зоны, то следует разъединить провод в петлях у анкерных опор на электрически не связанные участки и на каждом из них установить одно заземление на месте производства работ.

Работы при пофазном ремонте поручаются специально обученному персоналу, поскольку их выполняют в условиях повышенной опасности.

Работы с прикосновением к отключенному проводу можно производить как с опор, так и с земли без применения каких-либо защитных средств (перчаток, галош, и т. п.) при условии, что потенциал провода, обусловленный электростатическим влиянием (а точнее — остаточный потенциал), не превышает значения заранее заданного допустимого напряжения прикосновения и что персонал не выходит за пределы безопасной зоны.

Во время работы должна быть исключена всякая возможность нарушения заземления провода, так как это грозит поражением людей током.

* На практике протяженность безопасной зоны не вычисляют, а принимают согласно указаниям п. 19.42 Правил [15] равной 20 м (в одну сторону).

Глава 11

БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ РАБОТАХ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

11.1. ОСОБЕННОСТИ И ДОСТОИНСТВА МЕТОДА РАБОТ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

В период Великой Отечественной войны, когда бесперебойное снабжение электроэнергией промышленных предприятий приобрело особо важное значение, в Советском Союзе был разработан и начал применяться метод ремонта воздушных линий электропередачи (ВЛ) 35 и 110 кВ без их отключения, т. е. под напряжением.

Особенности указанного метода заключаются в следующем: 1) линия электропередачи при ремонте остается в работе, благодаря чему обеспечивается бесперебойность электроснабжения потребителей; 2) персонал, выполняющий ремонтные работы, будучи надежно изолирован от земли, может безопасно прикасаться неизолированным инструментом или голыми руками к проводам линии, находящимся под рабочим напряжением.

В последующие годы этот метод непрерывно совершенствовался в целях повышения производительности труда и безопасности работы. Вместе с тем расширялась и область применения его в сторону более высоких и более низких напряжений.

В настоящее время ремонт воздушных линий электропередачи под напряжением производится также в ряде зарубежных стран (ВНР, ГДР, США, Англии, Японии и др.), причем этот метод ремонта применяется на воздушных линиях практически любого напряжения — от 1 до 750 кВ включительно, а иногда и в открытых распределительных устройствах.

Под напряжением на ВЛ производятся: замена изоляторов и арматуры; снятие с проводов набросов; осмотр провода со вскрытием подвесных зажимов; замена провода на отдельных участках линии; ремонт провода в любом месте пролета — установка шунтов, бандажей и ремонтных муфт, вставка жил и небольших кусков провода; установка на проводе контрольно-измерительной аппаратуры и подобные им работы.

Кроме того, без отключения ВЛ выполняются и другие работы, не связанные с прикосновением к проводам: окраска ме-

галлических и антисептирование деревянных опор, выправка опор; замена отдельных деталей деревянных опор — пасынков, траверс, стоек и др., а также опор в целом; замена грозозащитных тросов и т. п.

Опыт энергосистем Советского Союза и зарубежный опыт показывает, что до 90% объема работ по ремонту линий можно выполнять под напряжением.

Достоинством метода ремонта ВЛ под напряжением является то, что он приносит народному хозяйству значительную экономию благодаря исключению недоотпуска электроэнергии потребителям и роста потерь энергии, неизбежных при ремонте с отключением линий. При этом методе ремонта сохраняется не только непрерывность, но и существующая надежность питания потребителей электроэнергии.

При ремонте неотключенных линий требуется меньше ремонтного персонала, так как работы на различных участках линии могут производиться в разное время, а не одновременно, как при ремонтах с отключением линий.

11.2. ПРИНЦИП, ПОЛОЖЕННЫЙ В ОСНОВУ МЕТОДА РАБОТ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

а) Электрическая схема

В основу метода работы с непосредственным прикосновением человека к проводу, находящемуся под рабочим напряжением, положен принцип изоляции человека от земли и тел, имеющих иной, чем провод, потенциал. При опытах, проводившихся во время разработки этого метода, в качестве изоляции использовались обычные фарфоровые опорно-штыревые изоляторы ИШД-35, предназначенные для монтажа колонок разъединителей открытых распределительных устройств, на которых размещался человек (рис. 11.1). При этом было установлено, что человек может касаться неизолированного провода, находящегося под напряжением до 500 В переменного тока (50 Гц), не испытывая неприятных ощущений. При большем напряжении до 1000 В прикосновение к проводу сопровождалось неприятным ощущением, а при напряжении 1000–4000 В — болезненным ощущением с явлением покалывания в месте касания от искры, возникающей между проводом и рукой.

С ростом напряжения мощность искры увеличивалась и болезненность ощущения усиливалась. При напряжении 8–10 кВ

действие искры оказывалось настолько значительным, что исключало возможность прикосновения к проводу.

Указанные ощущения возникали в моменты прикосновения к проводу и отрыва руки от него, а при наложении руки на провод, т. е. при хорошем контакте между ними, эти ощущения исчезали. Однако при дальнейшем повышении напряжения в период неизменного контакта с проводом человек начинал ощущать прохождение через него тока. Повышение напряжения усиливало болезненность этого ощущения и могло при не-

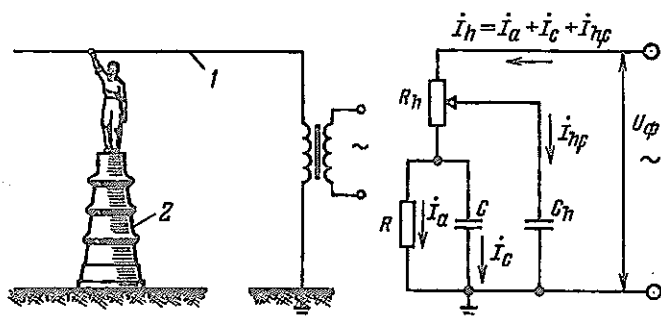


Рис. 11.1. Схема первых опытов прикосновения к проводу, находящемуся под напряжением:

1 — провод, находящийся под напряжением; 2 — изолирующее устройство; R — сопротивление изолирующего устройства; C — емкость изолирующего устройства; R_h — сопротивление тела человека; C_h — емкость человек — земля; I_a — ток проводимости изолирующего устройства; I_c — емкостный ток изолирующего устройства; $I_{h,C}$ — емкостный ток человек — земля; I_h — суммарный ток, проходящий через человека

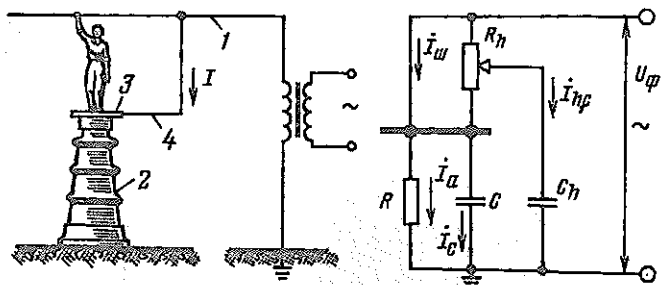


Рис. 11.2. Принятая схема работы под напряжением:

1 — провод, находящийся под напряжением; 2 — изолирующее устройство; 3 — металлический лист; 4 — провод, шунтирующий человека; R — сопротивление изолирующего устройства; C — емкость изолирующего устройства — земля; C_h — емкость человек — земля; $I_{ш}$ — ток, протекающий по шунтирующему проводнику; I_a — ток проводимости изолирующего устройства; I_c — емкостный ток изолирующего устройства — земля; $I_{h,C}$ — емкостный ток человек — земля

котором значении напряжения вызвать поражение человека током.

Эти явления объясняются тем, что через человека проходили ток проводимости и емкостный ток изолирующего устройства I_a и I_C , а также емкостный ток человек — земля $I_{h,C}$, значения которых возрастают с ростом напряжения провода относительно земли (рис. 11.1).

Чтобы исключить воздействие на человека токов I_a и I_C , схема была изменена следующим образом: поверх изолирующего устройства укладывали металлический лист, на котором и располагался человек, после чего этот лист соединяли проводником с проводом линии. В результате тело человека шунтировалось этим проводником, т. е. ток проводимости и емкостный ток изолирующего устройства I_a и I_C проходили через шунтирующий проводник, минуя человека (рис. 11.2). Эта схема положена в основу метода работы с непосредственным прикосновением человека к проводу, находящемуся под напряжением, хотя и она имеет недостаток: емкостный ток человек — земля $I_{h,C}$ и в этом случае проходит через человека.

б) Емкостный ток человек—земля и его ограничение

Поскольку человек, работающий на изолирующем устройстве, подвержен воздействию тока $I_{h,C}$, вызванного наличием емкости C_h человек — земля (рис. 11.2), возникает вопрос: каково значение этого тока, т. е. не опасен ли он для человека, и как устранить эту опасность, если она существует? Чтобы ответить на этот вопрос, определим предварительно значение емкости тела человека относительно земли.

Емкость человек — земля можно определить, заменив для упрощения тело человека цилиндром из проводящего материала, имеющим длину и объем, равные соответственно высоте и объему тела человека.

Приняв, что человек имеет средний рост 1,7 м и соответствующий этому росту объем тела * 0,068 м³, получим размеры эквивалентного цилиндра: длина $l_h = 1,7$ м; диаметр основания $d_h = 0,226$ м. Разместим этот цилиндр в вертикальном положении на такой же высоте H , м, над землей, на которой находится человек, работающий с изолирующего устройства (рис. 11.3).

* Исходные данные: масса человека среднего роста 71,9 кг и средняя плотность тела 1,05 г/см³ [7, табл. 198].

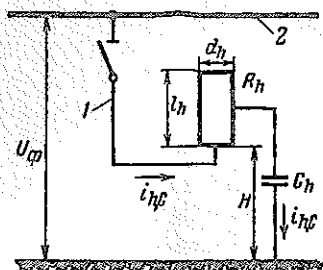


Рис. 11.3. Цепь емкостного тока человек — земля (момент присоединения шунтирующего проводника 1 к проводу линии 2)

Емкость цилиндра относительно земли можно приблизительно определить по известной формуле, Φ ,

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0 l_h}{\ln \frac{4l_h^2(l_h + 4H)}{d_h^2(3l_h + 4H)}}, \quad (11.1)$$

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

При работе с изолирующего устройства человек находится над землей на высоте 5–7 м, поэтому, приняв $H = 6$ м, получим

$$C = \frac{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,7}{4 \cdot 1,7^2 (1,7 + 4 \cdot 6)} = 36 \cdot 10^{-12} \text{ Ф.}$$

$$0,226^2 (3 \cdot 1,7 + 4 \cdot 6)$$

Это значение можно принять за емкость тела человек — земля, т. е. $C_h = 36$ пФ.

Значение емкостного тока, проходящего через тело человека. Из схемы, показанной на рис. 11.3, видно, что наложение шунтирующего проводника на провод линии, т. е. перенос потенциала провода на человека, равносильно включению цепи, содержащей активное сопротивление и емкость, на синусоидальное напряжение. При этом, как известно, возникает переходный процесс и ток в цепи (полный ток) в произвольный момент времени равен:

$$i_h = i_{уст} + i_{св}$$

или

$$i_h = \frac{U_{max}}{z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{U_{max}}{R} \sin \varphi \cos(\psi - \varphi) e^{-t/RC}. \quad (11.2)$$

Для рассматриваемой схемы необходимо в этом выражении заменить R на R_h и C на C_h . Полное сопротивление цепи, Ом.

$$z = \sqrt{R_h^2 + (1/\omega C_h)^2}. \quad (11.3)$$

Наибольшее значение полного тока будет в момент включения цепи под напряжение, т. е. при $t = 0$ и условии, что напряжение в этот момент равно амплитуде U_{max} . Это значит, что $\psi = \varphi = \pi/2$. В этом случае из (11.2) получим, А,

$$i_{h,max} = U_{max}/R_h = 0,82U/R_h,$$

где $U_{max} = U_\phi/\sqrt{2} = 0,82U$ — амплитуда напряжения относительно земли, В; U_ϕ , U — фазное и линейное напряжения линии, В.

Учитывая наличие обуви и одежды на теле человека, принимаем $R_h = 160$ кОм. Тогда окончательное выражение для наибольшего емкостного тока, проходящего через человека в момент переноса на него потенциала, мА,

$$i_{h,max} = 5,1U,$$

где U — в киловольтах.

Как видим, этот ток пропорционален напряжению линии и составляет 180–3825 мА для линий 35–750 кВ соответственно.

Опыт работы под напряжением показывает, что человек не ощущает воздействия этих токов на ВЛ до 110 кВ включительно, когда их значение не превышает 0,5–0,6 А. Объясняется это, очевидно, кратковременностью протекания тока.

На линиях 154–220 кВ, когда $i_{h,max}$ достигает 0,8–0,9 А, у человека возникают неприятные ощущения в виде характерных покалываний, пощипываний и т. п., которые усиливаются на ВЛ более высокого напряжения.

Установившийся емкостный ток, протекающий через человека и обусловленный воздействием на него интенсивного электрического поля, при $t = \infty$

$$i_{уст} = \frac{U_{max}}{z} \sin(\omega t + \psi - \varphi).$$

Действующее значение этого тока с учетом (11.3), А,

$$I_h = \frac{U_{max}}{z\sqrt{2}} = \frac{U_\phi}{\sqrt{R_h^2 + (1/\omega C_h)^2}}.$$

Так как $R_h \ll 1/\omega C_h$, то пренебрегаем значением R_h^2 . Тогда

$$I_h = U_\phi \omega C_h,$$

подставив численные значения $C_h = 36 \cdot 10^{-12}$ Ф и $\omega = 2\pi f = 314$ рад/с и заменив U_ϕ на $U/\sqrt{3}$, получим оконча-

тельное выражение установившегося емкостного тока, проходящего через тело человека, мА:

$$I_h = 6,5 \cdot 10^{-3} U,$$

где U — линейное напряжение линии, кВ.

Этот ток также пропорционален U и равен 0,23–4,88 мА на линиях 35–750 кВ соответственно.

Установившийся ток проходит через человека длительно, т. е. все время, пока он находится под напряжением провода. Однако его воздействие человек ощущает лишь на линиях выше 110 кВ, когда его значение достигает ощутимого тока (в среднем 1,1 мА) или превышает его.

Ограничение емкостного тока. Емкостные токи, как возникающие в момент переноса потенциала на человека $i_{h,max}$, так и установившиеся I_h , не могут вызвать поражения человека и в этом смысле безопасны. Объясняется это тем, что ток $i_{h,max}$, достигая относительно большого значения, действует весьма кратковременно (1–1,5 мкс), а ток I_h , действующий длительно, имеет малое значение. Однако при работах на линиях выше 110 кВ под действием этих токов человек испытывает неприятные и даже болезненные ощущения. Такое воздействие тока отрицательно сказывается на здоровье человека и, кроме того, может явиться косвенной причиной несчастного случая, поскольку человек, почувствовав воздействие тока, теряет уверенность в своей безопасности и может допустить неправильные действия.

Чтобы исключить эти явления, необходимо уменьшить емкостные токи, как кратковременно, так и длительно проходящие через человека, до значения, при котором ток человеком не ощущается.

Для ограничения тока в момент переноса потенциала провода на рабочую площадку на ВЛ 330–500 кВ последовательно с шунтирующим проводником включают резистор сопротивлением 5–10 МОм. Благодаря этому активное сопротивление цепи резко возрастает и ток $i_{h,max}$ уменьшается в несколько раз. Обычно этот резистор встраивают в штангу, с помощью которой шунтирующий проводник накладывают на провод линии. После переноса потенциала на рабочую площадку резистор шунтируется специальным устройством, т. е. ток через него не проходит.

Для защиты человека от воздействия электрического поля ВЛ, т. е. для ограничения установившегося тока, применяют экранирующий костюм, изготовленный из то-

копроводящей ткани, дополняемый специальной обувью *. Используют также металлические экраны, защищающие пространство, в котором находится человек, работающий с изолирующего устройства.

Защитный костюм электрически соединяют с металлической рабочей площадкой изолирующего устройства. Он экранирует все тело человека за исключением лица, кистей рук и ступней ног, благодаря чему емкостные токи уменьшаются в несколько раз и оказываются значительно ниже ощутимых токов. Применение экранирующих костюмов и других средств защиты от воздействия электрического поля обязательно при работах с изолирующих устройств на линиях 220 кВ и выше.

11.3. ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ И ПОРЯДОК ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ

а) Изолирующие устройства и вспомогательные приспособления

Материалом для изготовления изолирующих устройств, предназначенных для изоляции человека от земли, а также вспомогательных изолирующих приспособлений для изоляции отдельных частей ВЛ с разными потенциалами ранее служили в основном бруски из электротехнического древеснослоистого пластика **, а в настоящее время являются трубки и стержни из текстолита ***, стекловолокна **** с эпоксидной смолой, в том числе из стеклотекстолита, и подобные им электроизоляционные материалы, обладающие высокой электрической и механической прочностью.

* Подробное описание экранирующего костюма и его защитных свойств дано в § 9.5.

** Древеснослойный пластик (дельта-древесина) — особый сорт фанеры, изготавливаемой в виде толстых плит путем горячего прессования под большим давлением листов лущеного шпона, склеенных искусственными смолами резольного типа.

*** Текстолит — слоистый пластик на основе хлопчатобумажной ткани (миткаль, шифон, бязь и др.), пропитанной синтетическим связующим (формальдегидными и подобными смолами).

**** Стеклопластики, в том числе стекловолокно, — синтетические композиционные материалы на основе органического (например, эпоксидные смолы) или неорганического (например, щелочные силикаты) полимерного связующего и стеклянного наполнителя (например, стеклянное волокно).

Канаты, применяемые при работах под напряжением, должны быть изготовлены из капрона, дедерона и других синтетических полиамидных волокон, характеризующихся очень большой электрической и механической прочностью, а также повышенной стойкостью к ударным нагрузкам и истиранию.

Конструкция. Изолирующие устройства изготовляют в виде раздвижных лестниц (типа пожарных), смонтированных в кузове грузовой автомашины (рис. 11.4), а также в виде подвесной легкой лестницы, состоящей из нескольких отдельных звеньев и навешиваемой на провод в непосредственной близости от гирлянды изоляторов (рис. 11.5). Изолирующим устройством может служить обычная телескопическая

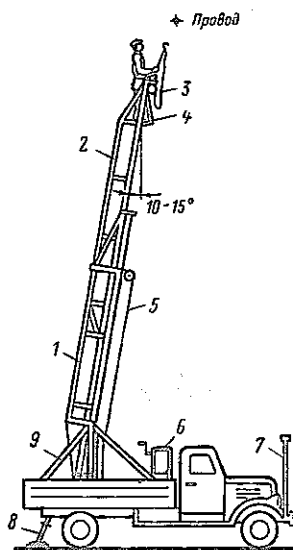


Рис. 11.4

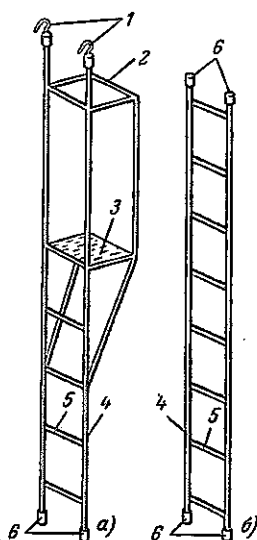


Рис. 11.5

Рис. 11.4. Изолирующая двухзвенная лестница:

1 и 2 — нижнее и верхнее (выдвижное) звенья лестницы; 3 — шунтирующий проводник; 4 — металлическая рабочая площадка; 5 — трос выдвижения верхнего звена; 6 — лебедка подъема и выдвижения; 7 — упор, на котором лежит лестница в сложенном виде; 8 — съемные домкраты; 9 — лафет

Рис. 11.5. Подвесная изолирующая лестница:

а — верхнее звено; б — промежуточное звено; 1 — зацепы — стальные крюки для навешивания лестницы на провод; 2 — корзина — рабочее место монтера; 3 — дно корзины; 4 — тетива — стеклопластиковая трубка; 5 — ступенька — коробчатый стеклопластик; 6 — гайки для соединения звеньев лестницы

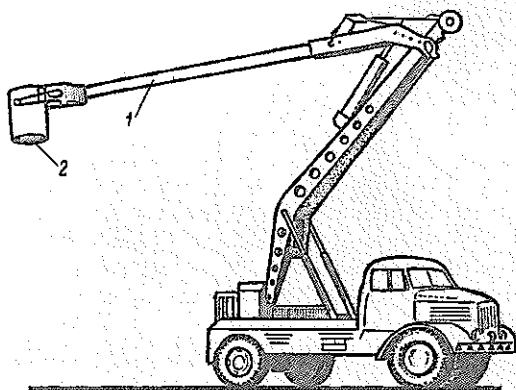


Рис. 11.6. Гидравлический подъемник с изолирующим звеном для работ под напряжением:

1 — изолирующее звено; 2 — корзина — рабочее место монтера.

вышка, верхнее звено которой изготовлено из изоляционного материала, например стеклотекстолита. Применяют также изолирующие устройства в виде кранов, гидравлических подъемников и других конструкций, снабженных изолирующим звеном и установленных на самоходных шасси или автомашинах (рис. 11.6).

Каждое изолирующее устройство, как правило, имеет металлическую рабочую площадку, на которой размещается монтер. К площадке присоединен гибкий медный проводник, оканчивающийся контактным зажимом, закрепленным на изолирующей штанге. Прежде чем прикоснуться к проводу ВЛ, монтер, находящийся на рабочей площадке, накладывает этот зажим на провод линии и закрепляет его, перенося тем самым потенциал провода на рабочую площадку, а следовательно, и на себя.

При работе в экранирующем костюме с изолирующего устройства, не имеющего металлической рабочей площадки, например с подвесной изолирующей лестницы, потенциал провода линии монтер переносит непосредственно на костюм, для чего конец шунтирующего проводника предварительно присоединяет к костюму (выводу на ботинке).

Вспомогательные изолирующие приспособления, к которым относятся в первую очередь тяги и захваты, имеют конструкцию, соответствующую их назначению.

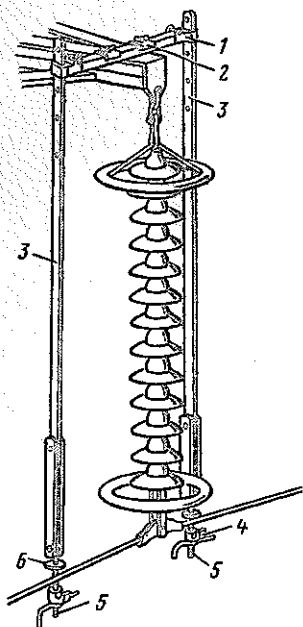


Рис. 11.7. Изолирующие тяги для замены поддерживающих гирлянд:

1 — поперечина тяг; 2 — узел крепления тяг на траверсе опоры; 3 — брусья тяги из изоляционного материала; 4 — захваты для провода; 5 — натяжные винты; 6 — шайбы

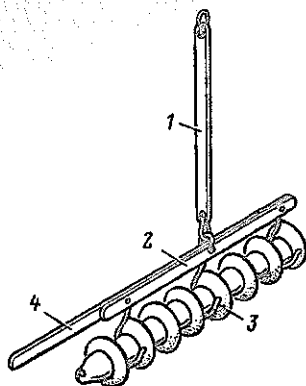


Рис. 11.8. Изолирующий захват:

1 — тяга подвеса; 2 — рейки; 3 — крюки металлические; 4 — рукоятка

Изолирующие тяги (рис. 11.7), служащие для удержания провода в рабочем положении и изоляции его от опоры (взамен гирлянды изоляторов), применяют на линиях выше 35 кВ при замене дефектных гирлянд, а также осмотре провода со вскрытием поддерживающего зажима.

Изолирующие захваты (рис. 11.8) служат для удерживания натяжной гирлянды (дефектной, снимаемой с линии, и новой, устанавливаемой взамен дефектной) при переносе ее специальным так называемым поворотным краном.

6) Описание отдельных видов работ

Ниже в качестве примера кратко описываются два вида работ на неотключенных воздушных линиях.

Ремонт провода на линиях 35—110 кВ путем замены поврежденного участка провода длиной до 2,5 м производится с применением изолирующей лестницы или телескопической автовышки с изолирующим звеном.

Для работы на проводе монтер поднимается на рабочую (металлическую) площадку изолирующего устройства, располагается на ней,

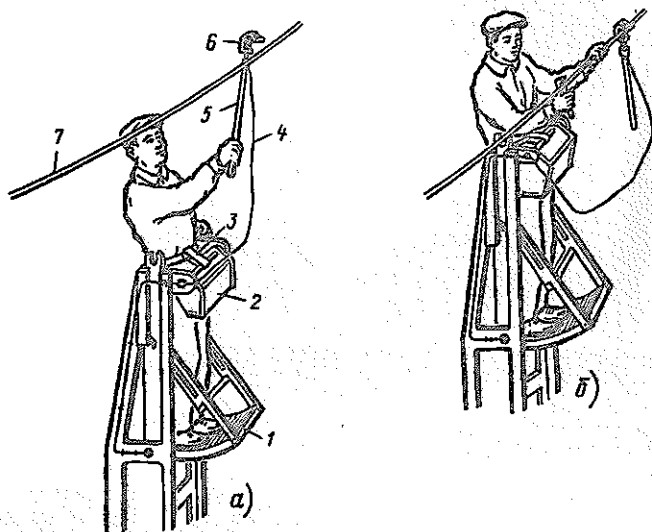


Рис. 11.9. Положение монтера при работе с изолирующей лестницы:

a — момент установки на провод контактного зажима; *б* — при работе на проводе линии; 1 — металлическая рабочая площадка; 2 — инструментальный ящик; 3 — предохранительный пояс, которым монтер прикреплен к изолирующему устройству; 4 — шунтирующий проводник; 5 — штанга; 6 — контактный зажим; 7 — провод ВЛ

т. е. занимает рабочее положение и прикрепляется предохранительным поясом. При этом рабочая часть изолирующего устройства должна находиться на расстоянии не менее 3 м от ближайшего провода ВЛ. Затем по указанию производителя работ изолирующее устройство перемещают вместе с монтером к проводу. Когда расстояние между монтером и проводом сократится до 0,5–1 м, монтер, не касаясь провода, накладывает на него с помощью штанги контактный зажим (рис. 11.9, *a*), в результате чего оказывается под потенциалом провода и может касаться его. После наложения контактного зажима монтера вместе с изолирующим устройством перемещают к проводу на расстояние, удобное для работы (рис. 11.9, *б*).

С помощью плашечных зажимов и обычного инструмента монтер закрепляет на проводе линии заранее подготовленную вставку — кусок провода необходимой длины, свернутый в кольцо. При этом вставку он располагает так, чтобы место повреждения провода приходилось на ее середину.

Убедившись в прочности крепления вставки и достаточности ее натяжения, монтер ножовкой разрезает провод и заводит его концы в овальные соединители, предварительно надетые на вставку. После обжима соединителей монтер снимает плашечные зажимы и обрезает лишние концы провода (рис. 11.10).

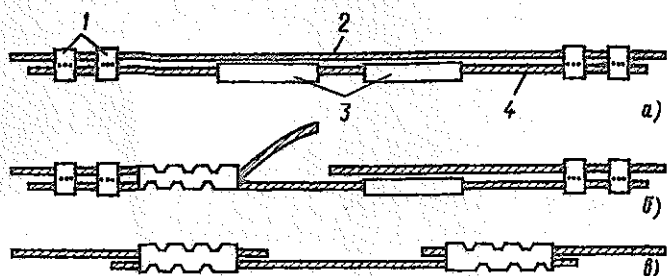


Рис. 11.10. Последовательность операций при ремонте провода путем монтажа вставки — куска провода длиной до 2,5 м:

а — вставка укреплена на проводе с помощью плашечных зажимов; б — провод разрезан, концы его заводятся в соединители, которые обжимаются; в — оба соединителя обжаты, поврежденный участок провода и концы вставки удалены; 1 — плашечные зажимы; 2 — дефектный участок провода; 3 — овальные соединители; 4 — вставки

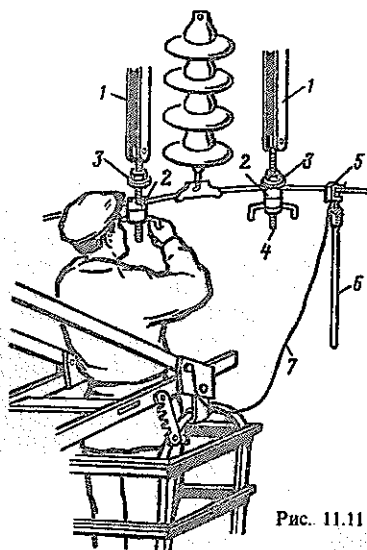


Рис. 11.11

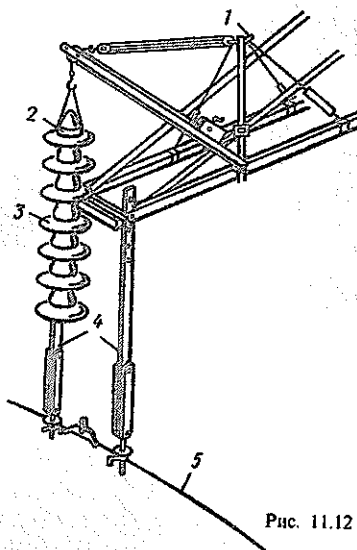


Рис. 11.12

Рис. 11.11. Монтер, находящийся на изолирующем устройстве, переводит с помощью натяжных винтов нагрузку провода с гирлянды на изолирующие тяги:

1 — изолирующие тяги; 2 — захваты для провода; 3 — запорные шайбы; 4 — натяжные винты; 5 — контактный зажим; 6 — штанга; 7 — шунтирующий проводник

Рис. 11.12. Замена поддерживающей гирлянды изоляторов:

1 — поворотный кран; 2 — хомут; 3 — гирлянда; 4 — изолирующие тяги; 5 — провод

Перед спуском с изолирующего устройства монтер должен быть предварительно освобожден от потенциалов провода. Для этого изолирующее устройство вместе с монтером отводят от провода на расстояние 0,5–1,0 м, после чего он снимает с провода контактный зажим.

Замена гирлянды изоляторов на ВЛ 110–220 кВ с металлическими опорами производится с применением изолирующего устройства, изолирующей тяги и поворотного крана, которым перемещают старую и новую гирлянды.

Вначале монтеры, поднявшись на опору, укрепляют на траверсе над сменяемой гирляндой изолирующую тягу и поворотный кран. Затем монтер, находящийся на изолирующем устройстве, укрепляет на проводе захваты тяг, с помощью натяжных винтов переводит нагрузку провода с гирлянды на тяги (рис. 11.11) и отцепляет от гирлянды подвесной зажим, т. е. освобождает заменяемую гирлянду от провода. Монтер, находящийся на траверсе, закрепляет на верхнем изоляторе (заводит в зазор между шапкой и тарелкой изолятора) стальной хомут, укрепленный на конце каната поворотного крана. Краном приподнимают гирлянду, отцепляют ее от траверсы, а затем краном же переносят ее к опоре (рис. 11.12) и с помощью каната опускают на землю.

Новую гирлянду подают к месту установки поворотным краном, сочленяют с подвесной арматурой и с помощью тех же натяжных винтов переносят на нее нагрузку провода, разгружая тяги.

11.4. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ОПАСНОСТЕЙ ПРИ РАБОТЕ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

При работах под напряжением на ВЛ основными опасностями для персонала являются воздействие на работающих интенсивного электрического поля и возможность поражения электрическим током.

Воздействию электрического поля повышенной напряженности подвергаются главным образом лица, которые при выполнении работ непосредственно прикасаются к проводу, находящемуся под напряжением. Мерой защиты для них является применение экранирующих костюмов, принцип действия и конструкции которых описаны в § 9.5, а также экранирующих рабочих площадок, люлек и других устройств.

а) Причины поражения током и способы их устранения

Опасность поражения током существует для человека, работающего как на изолирующем устройстве, т. е. находящегося под потенциалом провода, так и на опоре.

Возможные причины поражения током человека, выполняющего эти работы, следующие:

1) недостаточная электрическая прочность устройства, изолирующего человека от земли или вспомогательных изолирующих приспособлений (тяг, захватов и т. п.) вследствие чего изоляция их может быть перекрыта напряжением провода ВЛ относительно земли;

2) недостаточная электрическая прочность изоляции провода линии на месте работы людей вследствие чего она может быть перекрыта напряжением провода относительно земли;

3) приближение человека, работающего с изолирующего устройства, к телу опоры (или работающего на опоре — к проводу) на расстояние, при котором произойдет пробой воздушного промежутка между человеком и опорой (или проводом).

Электрическая прочность изолирующих устройств и приспособлений, т. е. их разрядное напряжение по поверхности, зависит от длины по изоляции*: чем больше длина, тем выше разрядное напряжение.

Электрическая прочность изоляции провода относительно земли обуславливается разрядным напряжением по поверхности гирлянд изоляторов. На линиях с деревянными опорами фарфоровая (стеклянная) изоляция усиливается последовательно включенным участком деревянной траверсы или стойки опоры.

На месте производства работ изоляция провода может быть значительно ниже нормального уровня, если в гирлянде имеются дефектные изоляторы, что часто и является причиной ремонта линии именно в этом месте (замена дефектных изоляторов исправными или замена гирлянды).

Расстояние от человека, работающего с изолирующего устройства, до опоры (или работающего с опоры до провода) зависит главным образом от организации работы и поддерживается, как правило, самим работающим на глаз.

Условия безопасности. Для устранения указанных причин несчастных случаев необходимо, чтобы изоляция устройств, изо-

* В общем случае разрядное напряжение по поверхности диэлектрика зависит от его природы и свойств, разрядного расстояния, формы его поверхности (гладкая, шероховатая, ребристая), наличия на его поверхности влаги и отложений посторонних веществ и пр. В рассматриваемом случае, когда известно, что изоляцией устройств и приспособлений служат сухие, гладкие, отполированные брусья или стержни можно считать, что разрядное напряжение зависит лишь от их длины

лирующих человека от земли, и вспомогательных изолирующих приспособлений, а также изоляция проводов линий на месте работы людей и воздушный промежуток между человеком и частями линии, имеющими иной потенциал, обладали в период работы разрядными напряжениями, превышающими возможное напряжение проводов линии относительно земли в данном месте.

Напряжение провода относительно земли на месте работы людей может значительно превышать фазное напряжение линии в результате внутренних и атмосферных перенапряжений, значения которых находятся в зависимости от номинального напряжения линии и ряда других факторов.

б) Условия возникновения и значения внутренних перенапряжений на месте работы людей

В период работы людей на неотключенной ВЛ внутренние перенапряжения могут возникнуть в результате резких изменений режима работы электрической системы, т. е. явиться следствием переходных электромагнитных процессов в электрических цепях. Такие изменения режима могут быть вызваны нормальными оперативными переключениями, внезапными изменениями нагрузок, а также повреждениями в сети (обрыв провода, короткое замыкание между проводами, замыкание на землю и т. п.).

Наиболее опасными внутренними перенапряжениями по условиям воздействия на линейную изоляцию являются перенапряжения, возникающие в следующих случаях: при однофазных замыканиях на землю через дугу в сетях с изолированной нейтралью (или заземленной через большое сопротивление); при отключении индуктивных нагрузок (например, ненагруженных трансформаторов), сопровождающемся принудительным ускорением гашения отключаемого тока; при отключении емкостей (например, ненагруженных линий); при резонансе и феррорезонансе в сети (например, вызванных явлениями смещения и колебания нейтрали трехфазной системы); при несимметричных коротких замыканиях в ненагруженных линиях, питаемых гидрогенераторами без ускорительных обмоток.

Внутренние перенапряжения $U_{\text{вт}}$ имеют, как правило, колебательный характер, хотя не исключены импульсы аperiodической формы. Обычно перенапряжения имеют длину фронта, соответствующую первой собственной частоте колебаний напряжения (первая гармоника), которая для ВЛ 110—500 кВ находится в пределах 70—800 Гц. Длительность этих перенапряжений изменяется в широких пределах — от сотен микросекунд до нескольких секунд. Они могут распространяться на всю систему или только на ограниченную ее часть.

Значения указанных перенапряжений $U_{вт}$ не превышают обычно $2,5 - 3 U_{ф}$, а в редких случаях достигают $4U_{ф}$.

Исходя из условий безопасности работ под напряжением на ВЛ, наибольшие возможные значения $U_{вт}$ принимаем равными $4U_{ф}$ на линиях 35 – 220 кВ и $3U_{ф}$ на линиях 330 – 500 кВ, т. е. 80 кВ на линиях 35 кВ; 250 кВ на линиях 110 кВ; 510 кВ на линиях 220 кВ; 570 кВ на линиях 330 кВ; 870 кВ на линиях 500 кВ.

Импульсы перенапряжения принимаем колебательными периодическими синусоидальной формы с частотой 50 Гц.

в) Условия возникновения и значения атмосферных перенапряжений на месте работы людей

Как известно, люди, оказавшиеся вблизи места разряда молнии, подвергаются реальной угрозе смертельного поражения током молнии.

Для лиц, работающих на воздушных линиях электропередачи, опасными являются не только близкие, но и далекие разряды молнии непосредственно в линию или вблизи нее, поскольку возникающие при этом в линии волны перенапряжения, распространяясь по проводам на многие километры в обе стороны от места разряда, могут достичь места работы, сохранив высокую амплитуду, и явиться причиной поражения людей током.

Поэтому при грозе запрещается производить работы на ВЛ и требуется при приближении грозы к месту работ, т. е. при возникновении хотя бы отдаленных молний и грома, прекратить работы, снять людей с линии и удалить их за край трассы.

Однако атмосферные перенапряжения на линии на месте работы людей могут появиться и при отсутствии признаков грозы, т. е. и при соблюдении указанных требований правил, от блуждающих волн, возникающих на проводах при разряде молнии в линию или вблизи нее за пределами видимости грозы или слышимости грома.

При работах на отключенных линиях, когда провода их заземлены по обе стороны от места работы, что предусмотрено правилами безопасности, блуждающая волна, как правило, не опасна для работающих, поскольку амплитуда ее при достижении заземленной точки провода падает практически до нуля.

При работах под напряжением, когда провода линии не заземлены, появление блуждающей волны на месте работ связано с реальной опасностью поражения работающих. Такие случаи возникновения перенапряжения на месте работы людей

являются вполне реальными и должны учитываться при установлении мер безопасности для работ под напряжением.

Чтобы определить значение амплитуды блуждающей волны, достигшей места работы, которая и обуславливает опасность атмосферного перенапряжения, надо знать начальную амплитуду волны в момент ее возникновения, а также длину пробега ее по проводам линии до места работы людей и степень ее затухания.

Первоначальная амплитуда блуждающей волны. При большом токе молнии и высоком сопротивлении заземления опор или грозозащитных тросов волна перенапряжения, возникшая на линии в месте грозового разряда, может иметь амплитуду в несколько миллионов вольт, т. е. во много раз превышающую электрическую прочность изоляции линии. Такая волна, распространяясь по проводам линии в обе стороны, вызовет перекрытие изоляции на соседних с местом поражения опорах, в результате чего амплитуда ее после пробега небольшого расстояния (несколько пролетов) будет снижена до значения, определяемого разрядным напряжением изоляции проводов линии относительно земли.

Дальнейшее распространение волны по проводам линии также будет сопровождаться понижением (затуханием) ее амплитуды, но в значительно меньшей степени. Это затухание будет происходить под влиянием импульсной короны на проводах и тросах, сопротивления земли и проводов и других факторов.

Таким образом, мы можем принять, что наибольшая первоначальная амплитуда блуждающей волны атмосферного перенапряжения U_0 (т. е. амплитуда волны на месте ее возникновения) равна импульсной прочности изоляции проводов линии относительно земли. Вместе с тем, допуская некоторую погрешность (для случаев, когда разряды сопровождаются возникновением весьма высоких напряжений на изоляции линии), считаем, что эта блуждающая волна (т. е. волна с указанной амплитудой) возникает в месте разряда молнии в линию.

Импульсную прочность изоляции проводов относительно земли определяем как 50%-ное разрядное напряжение при полной волне (1,5/40 мкс) отрицательной полярности. Для линий на металлических и железобетонных опорах амплитуду волны принимаем равной импульсной прочности фарфоровой изоляции, а для линий на деревянных опорах — сумме разрядных напряжений фарфора и дерева.

Таблица 11.1. Наибольшие возможные значения амплитуд блуждающих волн атмосферного перенапряжения на линии на месте их возникновения и на месте работы людей

Номинальное напряжение линии, кВ	Материал опор и наличие тросов	Изоляция провода относительно земли		Амплитуда волны, кВ	
		Число изоляторов в поддерживающей гирлянде	Длина дерева, м	на месте возникновения	на месте работы людей
1	2	3	4	5	6
35	Металл и железобетон	3	—	360	260
	Дерево с тросами	2	1,5	850	460
	Дерево без тросов	2	14,15	2430	700
110	Металл и железобетон	7	—	780	450
	Дерево с тросами	6	2,0	1430	590
	Дерево без тросов	6	14,65	2900	790
220	Металл и железобетон	12	—	1300	570
330	Металл и железобетон	16	—	1700	630
500	Металл и железобетон	20	—	2220	700

Примечание. Типы изоляторов: на ВЛ 35 и 110 кВ—П-4,5 (ПФ-6а), на ВЛ 220 и 330 кВ—П-7 (ПФ-9,5), на ВЛ 500 кВ—П-8,5 (ПФ-11).

Сведения о разрядных напряжениях гирлянд изоляторов берем из справочной литературы; импульсное разрядное напряжение дерева принимаем равным 300 кВ/м.

Полученные значения амплитуд U_0 сведены в табл. 11.1 (графа 5).

Длинная волна и отрицательная полярность ее приняты потому, что волны тока молнии более чем в 20% случаев имеют длину 40 мкс и более и почти в 90% случаев — отрицательную полярность. Эти два параметра волны приняты за исходные еще и потому, что они ужесточают требования безопасности к условиям работ под напряжением: длинная волна, обладая меньшей способностью затухания, сохраняет при распространении по проводам от места ее возникновения до места работы людей более высокую амплитуду, а первоначальное значение амплитуды отрицательной волны больше, чем амплитуды положительной волны, ограниченной той же изоляцией.

Длина пробега волны, т. е. наименьшее расстояние от точки линии, в которой возможен разряд молнии, до места работы людей, обуславливается дальностью слышимости грома.

Другой характерный признак приближающейся грозы — молния, которая нередко видна за десятки и даже сотни километров, — может быть не замечена с места работ вследствие особенностей рельефа местности и других причин.

Дальность слышимости грома обычно равна 20 км, но в некоторых случаях она может возрастать до 30 и даже 50 км, а в других — уменьшаться до 10 км. Слышимость грома зависит от интенсивности грозового разряда, погоды, места наблюдения, направления ветра, рельефа местности и ряда других причин.

Основываясь на меньшей из приведенных цифр, что соответствует большей безопасности, можно считать, что первый гром, который услышат работающие на ВЛ и который является сигналом к прекращению работ, сопровождает разряды молнии, происходящие не ближе 10 км от места работы.

Следовательно, наименьшее расстояние, которое должна пройти волна перенапряжения от места ее возникновения до места работы людей, можно считать равным 10 км.

Амплитуда блуждающей волны, достигшей места работы людей $U_{\text{атм}}$, кВ, может быть определена по приближенной формуле Фауста и Менжера, учитывающей затухание волны,

$$U_{\text{атм}} = U_0 / (U_0 L k + 1),$$

где U_0 — первоначальная амплитуда волны, кВ; L — длина пробега волны, км; k — коэффициент затухания, среднее значение которого для длинной волны может быть принято равным 10^{-4} .

Подставив в эту формулу вместо U_0 наибольшие возможные значения первоначальных амплитуд (из табл. 11.1, графа 5) и наименьшую длину пробега волны $L = 10$ км, а также $k = 10^{-4}$, получим наибольшие возможные значения амплитуд блуждающих волн на месте работы людей.

Результаты подсчета сводим в табл. 11.1 (графа 6).

г) Уровень изоляции по условиям безопасности

Располагая наибольшими возможными значениями внутренних и атмосферных перенапряжений на месте работы людей $U_{\text{вт}}$ и $U_{\text{атм}}$, можно определить требующийся по условиям безопасности наинизший уровень изоляции устройств, приспособлений и проводов линии на месте работы, а также длину воздушного промежутка между человеком и частями линии, имеющими иной, чем человек, потенциал.

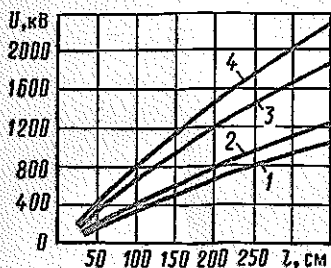


Рис. 11.13. Разрядные напряжения по поверхности гладкого отполированного бруса и воздушного промежутка между электродами стержень — стержень:

1 — сухоразрядное напряжение при 50 Гц по поверхности бруса; 2 — разрядное напряжение воздушного промежутка при 50 Гц; 3 — импульсное разрядное напряжение бруса при полной волне 1,5/40 мкс отрицательной полярности; 4 — импульсное разрядное напряжение воздушного промежутка при полной волне 1,5/40 мкс отрицательной полярности

Наименьшую допустимую длину устройств и приспособлений по изоляции определяют по кривым 1 и 3 на рис. 11.13, исходя из значений $U_{вт}$ и $U_{атм}$. При этом для изолирующих устройств 35 и 110 кВ выбирают наибольшее из трех значений $U_{атм}$ (т. е. для случая «дерево без тросов»), а для изолирующих приспособлений — наименьшее, поскольку эти приспособления включаются параллельно лишь гирлянде изоляторов.

Из полученных по кривым значений длины берется наибольшее и умножается на коэффициент запаса, принимаемый равным 2 для устройств и 1,3 для приспособлений.

Например, для линии 110 кВ по условиям внутренних перенапряжений ($U_{вт} = 250$ кВ) длина устройств и приспособлений по изоляции согласно кривой 1 на рис. 11.13 одинаковая и составляет 62 см. По условиям атмосферных перенапряжений длина устройств по изоляции равна 112 см (по кривой 3 на рис. 11.13 при $U_{атм} = 750$ кВ), а длина изоляции приспособлений 62 см (по кривой 3 на рис. 11.13 при $U_{атм} = 450$ кВ). Тогда, введя коэффициенты запаса, равные 2 и 1,3, окончательно получим наименьшие допустимые длины по изоляции: устройства $112 \cdot 2 \approx 200$ см, приспособления $62 \cdot 1,3 \approx 80$ см.

Аналогично определяется длина устройств и приспособлений по изоляции для линий других напряжений (табл. 11.2).

Таблица 11.2. Наименьшие допустимые длины по изоляции устройства и приспособлений, предназначенных для работ под напряжением, см

Устройства и приспособления	Номинальное напряжение линии, кВ				
	35	110	220	330	500
Лестница, площадка и т. п.	200	200	300	350	550
Тяга, захват и т. п.	50	80	200	230	350

Деление электроустановок на установки низкого и высокого напряжения в настоящее время не применяется.

Опыт эксплуатации показывает, что для обеспечения безопасной, безаварийной и высокопроизводительной работы электроустановок необходимо наряду с совершенным их исполнением и оснащением средствами защиты так организовать их эксплуатацию, чтобы была исключена всякая возможность ошибок со стороны обслуживающего персонала.

Структура такой организации эксплуатации разработана в результате длительного опыта работы множества электроустановок и изложена в виде «Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок» — ПТБ [15] и «Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей» — ПТЭ [16].

Основой организации безопасной эксплуатации электроустановок является высокая техническая грамотность и сознательная дисциплина обслуживающего персонала, который обязан строжайше соблюдать особые организационные и технические мероприятия, а также приемы и очередность выполнения эксплуатационных операций согласно указаниям Правил.

а) Персонал, обслуживающий электроустановки

Персонал, обслуживающий электроустановки, в зависимости от возложенных на него обязанностей и выполняемой работы делится на административно-технический, оперативный, ремонтный, оперативно-ремонтный и неэлектротехнический.

Административно-технический персонал — руководители, начальники служб и отделов районных энергетических управлений (объединений), предприятий, цехов, лабораторий, районов и участков электросетей, заместители указанных лиц, инженеры, техники, мастера, занимающиеся эксплуатационно-ремонтным обслуживанием электроустановок.

Оперативный (дежурный) персонал — лица, имеющие электротехническую квалификацию, несущие дежурство в смене в электроустановках непосредственно или на дому. Обязанностью его является оперативное обслуживание действующих электроустановок*.

* Действующей называется электроустановка, которая (или участок которой) находится под напряжением, либо на которую напряжение может быть подано включением коммутационных аппаратов.

Коммутационным аппаратом называется аппарат, которым отключается ток нагрузки или снимается напряжение (выключатель, выключатель нагрузки, отделитель, разъединитель, автомат, рубильник, пакетный выключатель, предохранители и т. п.).

К дежурному персоналу относятся также допущенные к оперативному управлению и оперативным переключениям диспетчеры, дежурные инженеры и техники, начальники смен, лица из состава оперативно-выездных бригад (т. е. бригад, обслуживающих электроустановки без местного дежурного персонала, воздушные и кабельные линии).

Ремонтный персонал — инженеры, техники, мастера, рабочие, занимающиеся ремонтно-эксплуатационным обслуживанием силового электрооборудования, релейной защиты, автоматики, грозозащиты и изоляции, средств диспетчерского и технологического управления, персонал электролабораторий.

Оперативно-ремонтный персонал — лица, имеющие электротехническую квалификацию из числа ремонтного персонала, на которых возложена обязанность оперативного и ремонтно-эксплуатационного обслуживания закрепленных за ними электроустановок, не имеющих дежурного персонала, в том числе воздушных и кабельных линий электропередачи. Таким образом, эти лица могут выполнять функции оперативного и ремонтного персонала в закрепленных за ними электроустановках за исключением дежурства, которое в этих установках не ведется.

Неэлектротехнический персонал — лица, не имеющие электротехнических специальностей, привлекаемые к работе в электроустановках, — строительные рабочие, уборщики, водители машин и механизмов, лица, работающие с электроинструментом, и др.

б) Медицинские освидетельствования персонала

Лица, обслуживающие электроустановки, не должны иметь увечий или болезней, мешающих производственной работе и усиливающих опасность воздействия тока на организм.

Персонал, несущий дежурство в электроустановках, принимающий непосредственное участие в оперативных переключениях, а также выполняющий ремонтные, монтажные, наладочные и другие работы в действующих электроустановках, подвергается медицинскому освидетельствованию при приеме на работу, а затем периодически 1 раз в 2 года; лица, работающие с ртутными выпрямителями и преобразователями, выполняющие работы на высоте или связанные с подъемом на высоту (верхолазы)*, а также обслуживающие подъемные

* Верхолазными считаются все работы, которые выполняются на высоте более 5 м от поверхности грунта, перекрытия или рабочего настила, над которым производятся работы с временных монтажных приспособлений или непосредственно с элементов конструкций, оборудования, машин и механизмов при их установке, эксплуатации, монтаже и ремонте. При этом основным средством предохранения работающих от падения с высоты во все моменты работы и передвижения является предохранительный пояс.

сооружения, проходят медицинские освидетельствования ежегодно. Перечень болезней и расстройств, препятствующих допуску к работам по обслуживанию электроустановок, утвержден Минздравом СССР.

в) Обучение персонала

Все вновь принятые на работу лица до получения разрешения на посещение ими данного предприятия должны пройти вводный инструктаж, а затем до получения разрешения на посещение рабочего места — первичный инструктаж.

Лица из числа дежурного и оперативно-ремонтного персонала до назначения на самостоятельную работу обязаны, кроме того, пройти необходимую теоретическую подготовку (курсовое или индивидуальное обучение); обучение на рабочем месте; проверку знаний ПТБ и ПТЭ, производственных и должностных инструкций в объеме, обязательном для данной должности; дублирование, т. е. исполнение обязанностей дежурного по месту работы. Остальной вновь принятый производственный персонал, включая ремонтный, а также руководящие и инженерно-технические работники допускаются к самостоятельной работе после первичной проверки знаний ПТБ, ПТЭ и производственных должностных инструкций.

В процессе работы для овладения наиболее совершенными методами безопасной, безаварийной и экономичной работы, внедрения передовых и высокопроизводительных методов труда, овладения вторыми профессиями, повышения уровня профессиональных знаний весь производственный персонал в обязательном порядке должен проходить систематическое производственное обучение.

Установлены следующие обязательные формы производственно-технического обучения и повышения квалификации:

для дежурного и оперативно-ремонтного персонала — периодический инструктаж, курсовое обучение, противоаварийные тренировки, противопожарные тренировки;

для ремонтного производственного персонала — периодический инструктаж, курсовое обучение, техническая учеба на объекте, противопожарные тренировки;

для рабочих различных профессий, не участвующих в обслуживании и ремонте технологического оборудования (грузчики, плотники, столяры, работники механических мастерских и т. п.), — периодический инструктаж, техническая учеба на объекте.

Для инженерно-технических работников (в том числе дежурных) должны проводиться тематические курсы, семинары, лекции и доклады по отдельным вопросам техники и экономики производства.

Вводный инструктаж проводит инженер-инспектор по технике безопасности данного предприятия. Цель этого инструктажа заключается в том, чтобы дать лицу, вновь поступившему на работу, общие представления о правилах техники безопасности, производственной санитарии и пожарной безопасности. При этом разъясняются правила внутреннего трудового распорядка; правила поведения на территории предприятия, в производственных и бытовых помещениях; основные виды опасности при нахождении на территории и в цехах предприятия; значения предупредительных надписей, плакатов, звуковой и световой сигнализации, а также указываются номера телефонов, по которым необходимо звонить в экстренных случаях (пожар, несчастный случай, аварийное состояние оборудования и т. п.).

Первичный инструктаж проводит начальник цеха, района, участка или его заместитель, а в отдельных случаях по письменному распоряжению начальника цеха — инженерно-технический работник цеха. Цель инструктажа — ознакомление лица, вновь поступившего на работу, со спецификой производства цеха или участка, в котором он будет работать, правилами техники безопасности, производственной санитарии и пожарной безопасности применительно к условиям цеха. Инструктаж оформляется записью в журнале инструктажа цеха, района, участка, подстанции с подписями инструктирующего лица и лица, принятого на работу.

Периодический (плановый) инструктаж заключается в обучении работника правильным и безопасным методам труда, уходу за оборудованием, применению правил и инструкций непосредственно в рабочей обстановке. Периодический инструктаж проводят руководители цехов, районов, подстанций, лабораторий, смен, участков, мастера и дежурные инженеры. Инструктаж проводится не реже 1 раза в месяц с дежурным, оперативно-ремонтным персоналом и не реже 1 раза в 3 мес с персоналом (рабочими) вспомогательных цехов.

О проведении планового инструктажа делается запись в специальном журнале.

Теоретическая подготовка персонала осуществляется на постоянно действующих курсах, в учебных комбинатах или с помощью других форм обучения, применяемых на предприятиях. В процессе учебы персонал должен получить необходимые знания для квалифицированного выполнения порученной работы; изучить теоретические основы и процессы работы оборудования, а также ПТЭ, ПТБ, производственные и должностные инструкции и правила пожарной безопасности.

Обучение на рабочем месте работник проходит под руководством опытного лица, которое несет ответственность за безопас-

ность обучаемого и качество его обучения. Одновременно обучаемый обязан изучить правила техники безопасности в объеме, соответствующем выполняемой им работе, правила оказания первой медицинской помощи и т. п.

Дублирование, т. е. исполнение обязанностей дежурного производится после проверки знаний ПТЭ, ПТБ и производственных инструкций под руководством опытного основного дежурного в течение времени, установленного руководством предприятия.

г) Проверка знаний персоналом правил и инструкций

Проверка знаний ПТЭ, ПТБ и производственных инструкций может быть первичной, периодической и внеочередной.

Первичной проверке знаний подвергаются: лица, принятые на работу после производственного обучения перед допуском их на самостоятельную работу; лица, переводимые на другую работу (должность) на том же предприятии либо перешедшие с другого предприятия (даже в той же должности), а также лица, которым присваивается более высокий разряд.

Периодическая (очередная) проверка знаний рабочих и инженерно-технического оперативного и ремонтного персонала энергопредприятий, производственных служб районных энергетических управлений (РЭУ), оперативных диспетчерских управлений (ОДУ), рабочих и инженерно-технического персонала ремонтных и наладочных предприятий и организаций, непосредственно связанных с ремонтом, испытанием и наладкой энергетического оборудования электростанций и сетей, а также других инженерно-технических работников, привлекаемых к переключениям в электрических установках, должна производиться не реже 1 раза в 2 года по ПТЭ и не реже 1 раза в год по ПТБ.

Проверка знания ПТЭ и ПТБ остальными инженерно-техническими, а также руководящими работниками всех предприятий и подразделений РЭУ, ремонтных и наладочных предприятий и организаций проводится с периодичностью 1 раз в 3 года.

Внеочередной проверке знаний подвергаются лица, нарушившие требования ПТЭ, ПТБ и производственных инструкций.

Проверку знаний должна проводить специально созданная приказом (распоряжением) руководства предприятия комиссия в составе не менее 3 чел. в индивидуальном порядке. Проверку знаний ПТЭ и производственных инструкций следует вести, как правило, одновременно с проверкой знаний ПТБ, но с отдельным оформлением результатов проверки в специальном журнале.

В итоге проверки знаний проверяемому присваивается соответствующая его знаниям, стажу и опыту работы квалифика-

ционная группа по технике безопасности; лицу, прошедшему первичную проверку знаний, выдается «Удостоверение о проверке знаний правил технической эксплуатации и техники безопасности», в котором указываются результаты проверки знаний (первичной и периодических) и присвоенная квалификационная группа по технике безопасности.

д) Квалификационные группы по электробезопасности

Существует пять групп по электробезопасности (I—V), которые присваивают лицам, обслуживающим электроустановки.

Группа I присваивается лицам, не имеющим стажа работы в обслуживаемых ими либо аналогичных электроустановках или имеющим стаж менее 1 мес (для неэлектротехнического персонала — менее 2 мес). Для получения группы I достаточно пройти инструктаж по электробезопасности в данной электроустановке с оформлением в журнале инструктажа. Выдача удостоверений о проверке знаний лицам с группой I не требуется.

Группа II присваивается лицам, имеющим стаж работы в обслуживаемых ими либо аналогичных электроустановках не менее 1 мес, за исключением лиц из дежурного, оперативно-ремонтного и ремонтного персонала со специальным средним и высшим техническим образованием, которым группу II присваивают независимо от стажа работы. Для получения группы II персонал должен: иметь отчетливое представление об опасности, связанной с работой в электроустановках; знать и уметь применять на практике правила техники безопасности в объеме, соответствующем выполняемой работе; знать устройство и оборудование электроустановок; уметь практически оказать доврачебную помощь пострадавшим при несчастных случаях, в том числе применять способы искусственного дыхания и наружного массажа сердца.

Группа III присваивается лицам со стажем работы в обслуживаемых ими либо аналогичных электроустановках: для неэлектротехнического персонала — 12 мес, для дежурного, оперативно-ремонтного и ремонтного персонала, имеющего группу II, — 2 мес и для практикантов институтов и техникумов, имеющих группу II, — 3 мес. Для получения группы III персонал должен обладать знаниями в объеме, указанном для группы II. Кроме того, он должен иметь познания в области электротехники в соответствии с его образованием; лица, не имеющие среднего образования, должны иметь элементарные знания электротехники. Лицам моложе 18 лет и практикантам профтехучилищ группы III—V не присваиваются.

Группа IV присваивается лицам из дежурного, оперативно-ремонтного и ремонтного персонала, имеющего группу III, со стажем работы в обслуживаемых ими либо аналогичных электроустановках не менее 3 мес, а не имеющим среднего образования — не менее 6 мес.

Практикантам и неэлектротехническому персоналу группы IV и V не присваиваются. Для получения группы IV персонал должен обладать знаниями в объеме, указанном для группы III, при этом лица, не имеющие среднего образования, должны знать электротехнику в объеме программы профтехучилища. Кроме того, лица IV группы должны знать компоновку электроустановок и уметь организовать безопасное производство работ.

Группа V присваивается лицам из дежурного, оперативно-ремонтного и ремонтного персонала, имеющим стаж работы в группе IV в обслуживаемых ими либо аналогичных электроустановках не менее 24 мес для лиц, не имеющих среднего образования, 12 мес для лиц со средним образованием и 6 мес для лиц, имеющих специальное среднее или высшее техническое образование. Для получения группы V персонал должен обладать знаниями в объеме, указанном для группы IV; кроме того, он должен знать, чем вызваны требования того или иного пункта правил техники безопасности.

е) Классификация помещений по опасности поражения электрическим током

Состояние окружающей воздушной среды, а также окружающая обстановка могут усиливать или ослаблять опасность поражения током. Так, сырость, токопроводящая пыль, едкие пары и газы разрушающе действуют на изоляцию электроустановок, резко снижая ее сопротивление и создавая угрозу перехода напряжения на корпуса, станины, кожухи и тому подобные нетоковедущие металлические части электрооборудования, к которым может прикасаться человек.

Вместе с тем при этих условиях, как и при высокой температуре окружающего воздуха, понижается электрическое сопротивление тела человека, что еще более увеличивает опасность поражения его током.

Воздействие тока на человека усугубляется также наличием токопроводящих полов и близко расположенных к электрооборудованию металлических заземленных предметов, так как одновременное прикосновение человека к этим предметам и корпусу электрооборудования, случайно оказавшемуся под напряжением, или непосредственно к токоведущей части, находящейся под напряжением, будет сопровождаться прохождением через человека большого тока.

В зависимости от тех или иных условий, повышающих опасность воздействия тока на человека, разным помещениям присуща разная степень опасности поражения током — одним бо́льшая, другим — меньшая.

По действующим правилам все помещения делятся по степени опасности поражения людей электрическим током на три класса: без повышенной опасности, с повышенной опасностью и особо опасные.

К помещениям без повышенной опасности относятся сухие, беспыльные помещения с нормальной температурой воздуха, с изолирующими (например, деревянными) полами, в которых отсутствуют заземленные предметы или их очень мало. Иначе говоря, это помещения, в которых отсутствуют признаки, свойственные помещениям с повышенной опасностью и особо опасным.

Примером помещений без повышенной опасности могут служить обычные жилые комнаты, конторы, некоторые лаборатории и т. п.

К помещениям с повышенной опасностью относятся помещения:

сырые, в которых относительная влажность воздуха длительно превышает 75%*;

жаркие, в которых под воздействием различных тепловых излучений температура воздуха превышает постоянно или периодически (более 1 сут) 35°C;

пыльные, с токопроводящей пылью, в которых по условиям производства выделяется токопроводящая технологическая пыль (например, угольная, металлическая и т. п.) в таком количестве, что она может оседать на проводах, проникать внутрь машин, аппаратов и т. п.;

с токопроводящими полами — металлическими, земляными, железобетонными, кирпичными и т. п.;

в которых возможно одновременное прикосновение человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т. п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования, с другой.

Примером помещений с повышенной опасностью могут служить лестничные клетки различных зданий с проводящими полами; склады деталей и материалов; цехи или мастерские по механической обработке металла или дерева, даже если они

* Относительная влажность воздуха — отношение (в процентах) массы водяных паров, содержащихся в воздухе данного пространства, к массе водяных паров, насыщающих это пространство при данной температуре (т. е. когда испарение влаги прекратилось, что соответствует 100%-ной относительной влажности).

В электроустановках выше 1000 В лица из числа дежурного или оперативно-ремонтного персонала, единолично обслуживающие электроустановки, и старшие по смене должны иметь группу IV, остальные – группу III.

В электроустановках до 1000 В лица из числа дежурного или оперативно-ремонтного персонала, единолично обслуживающие электроустановку, должны иметь группу не ниже III.

Старший или одиночный дежурный во время дежурства является лицом, ответственным за правильное обслуживание, безопасную и безаварийную работу всего электрооборудования на порученном ему участке. Он обязан обеспечить безопасные условия работы подчиненных ему лиц и следить за соблюдением ими правил техники безопасности.

Дежурный персонал обязан вести надежный и экономичный режим работы оборудования в соответствии с инструкциями, режимными картами и оперативными требованиями вышестоящих дежурных. Он должен периодически в соответствии с местной инструкцией опробовать действие технологической, пожарной, предупредительной и аварийной сигнализации, связи, а также проверять правильность показаний часов на рабочем месте.

Каждый дежурный, приступая к работе, должен принять смену от предыдущего дежурного, а после окончания работы сдать смену следующему по графику дежурному. Уход с дежурства без сдачи смены запрещается.

При приеме смены дежурный обязан:

а) ознакомиться с состоянием, схемой и режимом работы установок, находящихся в его управлении и ведении;

б) получить сведения от сдающего смену об оборудовании, за которым необходимо вести особо тщательное наблюдение для предупреждения аварии или неполадок, и об оборудовании, находящемся в ремонте и резерве;

в) выяснить, какие работы выполняются по нарядам и распоряжениям на закрепленном участке и где наложены временные заземления и т. п.;

г) проверить и принять инструмент, материалы, ключи от помещений, оперативную документацию и инструкции;

д) ознакомиться со всеми записями и распоряжениями за время, прошедшее с предыдущего его дежурства;

е) принять рапорт от подчиненного персонала и доложить непосредственному начальнику в смене о вступлении на дежурство и о недостатках, выявленных при приемке смены;

ж) оформить прием-сдачу смены записью в журнале или ведомости за своей подписью и подписью сдающего.

Прием и сдача смены во время ликвидации аварии запрещаются. Пришедший на смену оперативный персонал во время аварий используется по усмотрению лица, руководящего ее ликвидацией. При ликвидации аварии в зависимости от ее характера в порядке исключения допускается передача дежурства по разрешению вышестоящего оперативного дежурного.

Прием и сдача смены во время переключений, пуска и останова оборудования допускаются только с разрешения вышестоящего оперативного дежурного и административно-технического персонала.

Руководящий дежурный и административно-технический персонал имеет право отстранять от дежурства подчиненный ему оперативный персонал, не выполняющий свои обязанности.

При нарушении режима работы, повреждениях оборудования или возникновении пожара оперативный персонал обязан немедленно принять меры к восстановлению нормального режима работы или ликвидации аварийного положения и предотвращению развития аварии, а также сразу сообщить о происшедшем вышестоящему оперативному лицу и руководящему административно-техническому персоналу в соответствии с утвержденным списком.

Ликвидацией аварии в энергосистеме или на отдельных ее участках должен руководить диспетчер энергосистемы или диспетчеры электрической сети в зависимости от района распространения аварии, которые несут ответственность за эту работу.

Ликвидацией аварии на электростанции должен руководить начальник смены (дежурный инженер), а на гидроэлектростанциях и подстанциях без постоянного дежурства персонала — местный персонал или оперативно-выездная бригада, которые несут ответственность за эту работу.

Оперативный персонал независимо от присутствия лиц административно-технического персонала несет личную ответственность за ликвидацию аварии, единолично принимая решения и осуществляя мероприятия по восстановлению нормального режима.

В случае необходимости вышестоящее лицо из числа оперативно или административно-технического персонала имеет право поручить руководство ликвидацией аварии другому лицу или взять руководство на себя.

Распоряжения вышестоящего оперативного персонала должны выполняться незамедлительно.

Ответственность за необоснованную задержку выполнения распоряжения вышестоящего оперативного персонала несут лица, нарушившие распоряжения, а также руководители, санкционировавшие это невыполнение.

Распоряжения руководителей энергоуправления, энергопредприятия и их подразделений соответствующему оперативному персоналу о вопросах, входящих в компетенцию вышестоящего оперативного персонала, должны выполняться лишь по согласованию с последним.

Таблица 12.1. Наименьшие допустимые расстояния от людей и применяемых ими инструментов и приспособлений, а также от временных ограждений до токоведущих частей, находящихся под напряжением выше 1000 В

Напряжение электроустановки, кВ	До 1,0	1,0—35	60—110	150	220	330	400—500	750	800 постоянного тока
Наименьшее допустимое расстояние, м	0,6	0,6	1,0	1,5	2,0	2,5	3,5	5,0	3,5

Примечание. При напряжении до 1 кВ расстояние 0,6 м необходимо выдерживать лишь на ВЛ; в РУ это расстояние не нормируется.

150—220 кВ. Перечень таких ячеек и камер должен быть определен указанием главного инженера предприятия.

При осмотре электроустановок запрещается приближаться к токоведущим частям на расстояния меньше указанных в табл. 12.1.

Во время осмотра выполнение какой-либо работы запрещается.

При обнаружении замыкания на землю какой-либо токоведущей части электроустановки выше 1000 В до ее отключения запрещается приближаться к месту замыкания на расстояние менее 4 м в закрытых и 8 м в открытых распределительных устройствах.

Приближаться на более близкое расстояние разрешается лишь для выполнения операций с коммутационной аппаратурой в целях ликвидации замыкания на землю и для освобождения людей, попавших под напряжение. В этих случаях необходимо пользоваться изолирующими электрозащитными средствами — диэлектрическими ботами, коврами и другими средствами для изоляции себя от земли и устранения тем самым опасности воздействия шагового напряжения. Операции с коммутационными аппаратами, а также освобождение пострадавшего от действия тока следует производить с применением электрозащитных средств — диэлектрических перчаток, изолирующих штанг и др.

При осмотрах ОРУ сверхвысокого напряжения (330 кВ и выше) необходимо принимать меры для защиты от вредного воздействия интенсивного электрического поля, возникающего в этих установках. С этой целью для каждого ОРУ должны быть разработаны маршруты обхода при осмотрах оборудования (и следования к рабочим местам), расположенные по возможности в зонах экранирования* или на участках территории ОРУ, на которых напряженность электрического поля не превышает 15 кВ/м. Участки маршрутов с напряженностью электрического поля выше 15 кВ/м необходимо экранировать с помощью стационарных экранов. Протяженность и располо-

* Определение термина «зона экранирования» дано на с. 337.

жение участков маршрута должны быть такими, чтобы был обеспечена возможность подхода для осмотра (и технического обслуживания) ко всем аппаратам и устройствам, установленным в ОРУ и чтобы длительность пребывания персонала в электрическом поле в течение суток не превышала гигиенических нормативов (см. табл. 9.2).

В зимнее время участки территории, по которым проходят маршруты обхода ОРУ сверхвысокого напряжения, должны очищаться от снега, чтобы высота снежного покрова на экранированных участках маршрута обхода не превышала 0,6 м.

Маршруты передвижения персонала по территории ОРУ при обходах в целях осмотров оборудования (и следовании к рабочим местам) обозначаются с помощью специальных указателей, устанавливаемых перед зонами с напряженностью выше 15 кВ/м, вдоль маршрутов передвижения по ОРУ и в конце каждого прямолинейного участка. Крепящиеся указатели на высоте 1,5 м над землей на стержнях, фундаментах оборудования, металлоконструкциях и т. п.

Осмотры воздушных линий электропередачи (ВЛ) может производить единолично лицо с квалификационной группой не ниже II из числа оперативно-ремонтного или ремонтного персонала. В труднопроходимой местности (горы, болота и т. п.) и в условиях неблагоприятной погоды (буря, сильный снегопад и т. п.) осмотр ВЛ должны выполнять два лица с квалификационной группой не ниже II.

Во всех случаях осматривающий должен иметь при себе диэлектрические перчатки, а если осмотр связан с отысканием возникших на ВЛ повреждений, то и предупреждающие плакаты.

Работа лиц, производящих осмотр ВЛ, таит в себе опасность поражения электрическим током, поскольку во время осмотра на линии могут быть оборваны провода или тросы, находящиеся под напряжением; металлические нетоковедущие части опор, подстанций и переключательных пунктов, а также заземляющие спуски могут оказаться под напряжением вследствие неисправности изоляции или касания проводов; на поверхности земли вблизи места стекания тока в землю (при возникновении замыкания на землю) могут иметь место высокие напряжения шага, опасные для человека, и т. п. Поэтому лица, осматривающие ВЛ, обязаны соблюдать ряд мер предосторожности.

Так, линии, столбовые подстанции и воздушные переключательные пункты необходимо осматривать с земли без подъема на опору или конструкцию, пользуясь при необходимости биноклем.

Осматривающий должен считать всегда, что линия находится под напряжением. Даже если ему известно, что в данный момент линия отключена, он обязан относиться к ней так, как если бы она была под напряжением, поскольку линия в любой момент может быть включена для испытания или в работу.

Рис. 12.3. Осмотр воздушной линии электропередачи при сильном ветре

В ночное время или при аварийных осмотрах осматривающему запрещается прикасаться к металлическим частям опор, подстанций и переключательных пунктов и к заземляющим спускам. При этом он должен идти по краю трассы, т. е. на расстоянии 5–10 м от крайнего провода линии. Эта предосторожность необходима для того, чтобы исключить возможность приближения на опасное расстояние к оборванному проводу, если таковой окажется на трассе линии.

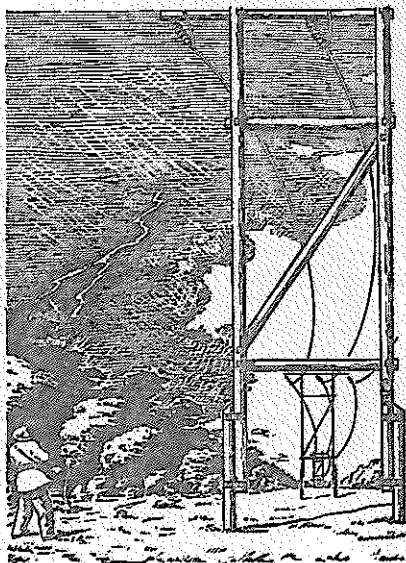
При сильном ветре поперек линии осматривающий должен идти, кроме того, с подветренной стороны, т. е. с той стороны, откуда дует ветер (рис. 12.3). При этом исключается опасность для него при поломке деталей опоры или обрыве провода в зоне обхода.

Во время грозы осматривающему также надлежит идти по краю трассы линии.

В случае обнаружения лежащего на земле оборванного провода ВЛ выше 1000 В запрещается приближаться к нему на расстояние менее 8 м вследствие опасности поражения током из-за высоких значений напряжений шага. Вблизи этого провода следует организовать охрану для предотвращения приближения к нему людей и животных, установить при возможности предостерегающие плакаты, сообщить о происшедшем на предприятие электросетей и дожидаться приезда ремонтной бригады.

При обнаружении признаков стекания тока в землю по железобетонной опоре, что возможно на ВЛ 3–35 кВ вследствие повреждения изоляторов, касания проводом тела опоры и т. п. (испарение влаги из почвы вблизи опоры, возникновение электрической дуги на стойках и в местах заделки опоры в грунт и др.), запрещается приближаться к опоре ближе чем на 8 м. В этом случае также должны быть приняты меры, предупреждающие приближение людей и животных к опоре, находящейся под напряжением, на опасное расстояние.

Приближение на расстояние менее 8 м к оборванному проводу, лежащему на земле, и опоре ВЛ, находящейся под напряжением выше 1000 В, допускается лишь для выполнения необходимых оперативных



переключений и освобождения людей, попавших под напряжение, от действия тока. При этом следует пользоваться соответствующими электрозащитными средствами (диэлектрическими ботами, перчатками, изолирующими штангами и т. п.) (см. рис. 2.5).

При обходах в целях осмотра ВЛ сверхвысокого напряжения (330 кВ и выше), когда лица, производящие осмотр, вынуждены находиться в зоне влияния электрического поля* дольше, чем предписано гигиеническими нормативами (см. табл. 9.2), они должны пользоваться экранирующими костюмами. Им запрещается прикасаться к заземленным металлическим предметам, в том числе к опорам линии**.

в) Оперативные переключения

Переключения в электроустановках производятся в следующих случаях: при изменении схемы электрических соединений в целях соблюдения определенного режима ее работы; при подготовке рабочего места для производства работ в действующей электроустановке — ремонтных, монтажных и т. п.; при ликвидации аварий, пожаров в электроустановке и иных подобных случаях.

Распоряжение на производство переключений выдает вышестоящий оперативный персонал, в управлении которого находится данная электроустановка.

В распределительных электросетях напряжением до 35 кВ включительно при отсутствии диспетчеризации переключения могут выполняться и по распоряжению административно-технического персонала (начальника, мастера района, участка электросетей).

В распоряжении о переключениях должна указываться их последовательность. Распоряжение считается выполненным только после получения сообщения об этом от лица, которому оно было отдано.

В случаях, не терпящих отлагательства (несчастный случай, пожар, стихийное бедствие), а также при ликвидации аварий допускается в соответствии с местными инструкциями выполнение переключений без распоряжения или без ведома вышестоящего оперативного персонала с последующим его уведомлением.

Лица, производящие переключения, должны быть из числа

* Определение понятия «зона влияния электрического поля» дано на с. 325.

** Назначение и защитная способность экранирующих костюмов подробно рассмотрены в § 9.5.

оперативного персонала, обслуживающего данную электроустановку.

Допускается в соответствии с местными инструкциями участие оперативного персонала электросетей в выполнении оперативных переключений в электроустановках потребителей энергии.

Количество лиц, принимающих участие в переключении, зависит от типа электроустановки, объема и сложности переключений и составляет обычно не более двух. При этом одно лицо производит непосредственно переключения, а второе контролирует правильность выполнения операций переключения.

На электростанциях и подстанциях переключения более чем на одном присоединении* выполняют:

два лица при наличии в смене или в составе оперативно-выездной бригады 2 чел. или более. Контролирующим лицом при этом является, как правило, старший по должности, а ответственность за правильность переключений возлагается на оба лица;

одно лицо при наличии в смене лишь 1 чел. Исключение в этом случае составляет перевод присоединений с одной системы шин на другую, который должны выполнять два лица, так как это весьма ответственная операция.

Переключения в комплектных распределительных устройствах (комплектных трансформаторных подстанциях), в том числе выкатывание или вкатывание тележек с оборудованием, а также переключения в РУ, на шитах и сборках напряжением до 1000 В, разрешается выполнять одному лицу из числа оперативного персонала, обслуживающего эти РУ.

Бланк переключений. Переключения в электроустановках выше 1000 В на участках схемы, где отсутствует или неисправна блокировка, исключающая неправильные операции с разъединителями и заземляющими ножами в процессе их переключений, а также при сложных операциях, в том числе при переводе одного присоединения с одной системы шин на другую независимо от наличия или состояния блокировки, должны производиться по бланку переключений.

При простых операциях и исправной блокировке переключения могут производиться без бланка переключений.

Бланк переключений — это официальный бланк, в который записываются заранее (до начала переключений) все операции переключения в порядке очередности их выполнения.

* Под присоединением следует понимать электрическую цепь одного назначения и наименования, одного напряжения, состоящую из совокупности оборудования, присоединенного к шинам или генератору, и находящуюся в пределах электростанции, подстанции, распределительного или переключательного пункта, трансформаторного помещения и т. п. Электрические цепи разных напряжений от двух- или трехобмоточных трансформаторов считаются одним присоединением.

Бланк заполняет лицо, получившее распоряжение о производстве переключений, и подписывают как лицо, проводящее операции, так и лицо контролирующее.

Если переключение выполняет одно лицо, контролирующим условно является лицо, отдавшее распоряжение, и в бланк вносится его фамилия.

Ниже в качестве примера приведен заполненный бланк переключения.

Заполняется чернилами

БЛАНК ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ № 89

Электростанция

подстанция

Подстанция 21

27 июня 1984 г. Начало 9 ч 15 мин

Конец ч — мин

Задание. Отключить и вывести в ремонт выключатель 110 кВ Л101, осуществив питание линии через обходной выключатель 110 кВ (ОВ) без вывода линии из работы.

Последовательность производства операций при переключении:

1. У обходного выключателя 110 кВ включить разъединители на первую с. ш. и на обходную с. ш.
2. Собрать схему релейной защиты на ОВ 110 кВ для опробования обходной с. ш. напряжением.
3. Включить ОВ 110 кВ.
4. Отключить ОВ 110 кВ.
5. Включить разъединитель Л101 на обходную с. ш. 110 кВ, т. е. подать на шины напряжение.
6. Собрать схему релейной защиты на ОВ 110 кВ для питания Л101 и отключить продольную защиту Л101.
7. Включить ОВ 110 кВ.
8. Отключить основной выключатель Л101.
9. Отключить линейные разъединители Л101.
10. Отключить шинные разъединители Л101 от первой с. ш. 110 кВ.
11. Заземлить основной выключатель 110 кВ Л101 со стороны шин заземляющими ножами.
12. Заземлить основной выключатель 110 кВ Л101 со стороны линии заземляющими ножами.

Лицо, производящее операцию (подпись)

Лицо контролирующее (подпись)

Назначение бланка переключений — не допустить ошибок при производстве операций по переключениям. Это обеспечивается тем, что персонал вынужден заранее продумать содержание задания и наметить правильный порядок его выполнения.

В процессе производства переключений каждая выполненная операция отмечается в бланке для исключения пропуска очередной операции.

Порядок производства переключений в электроустановках напряжением выше 1000 В следующий:

а) лицо, получившее задание на переключения, обязано повторить его, записать в оперативный журнал и установить по оперативной, мнемонической схеме или схеме-макету порядок предстоящих операций, включая операции в цепях релейной защиты и автоматики, и составить, если требуется, бланк переключений;

б) если переключения выполняют двое, лицо, получившее распоряжение, обязано разъяснить по схеме соединений второму лицу, участвующему в переключении, порядок операций;

в) при возникновении сомнений в правильности выполнения переключений их следует прекратить и повторно проверить требуемую последовательность по схеме соединений;

г) после окончания переключения об этом должна быть сделана запись в оперативном журнале.

Если ведется звукозапись переговоров, запись в оперативном журнале о полученном задании делается в сокращенном виде без указания отдельных операций.

Включение и отключение выключателей выше 1000 В, имеющих ручной механический привод, необходимо производить в диэлектрических перчатках (рис. 12.4).

Вручную выключатель следует включать быстро и решительно, доводя ход штурвала или рычага до упора, а отключать — легким поворотом штурвала или рычага до отказа либо воздействием на защелку привода, нажатием на специальную кнопку и т. п.

После отключения необходимо обязательно проверить положение выключателя на месте (т. е. убедиться визуально, что выключатель действительно отключился), если за этим отключением предстоят операции с разъединителями, имеющими ручной привод (рис. 12.5). Это требование обусловлено тем, что отключение разъединителей под нагрузкой (а это может иметь место, если выключатель почему-либо не отключился) сопровождается тяжелой аварией и может возникнуть опасность поражения оператора электрической дугой.

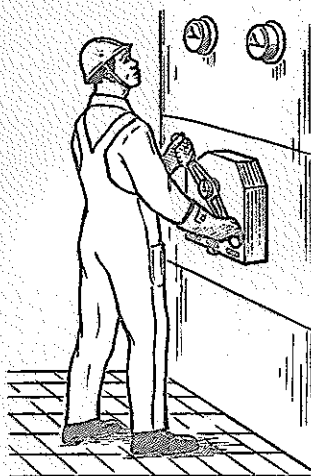


Рис. 12.4. Операция включения (отключения) выключателя выше 1000 В

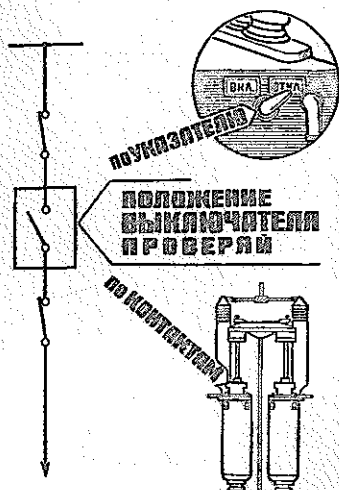


Рис. 12.5. Проверка положения выключателя (плакат)

Включение и отключение трехполюсных разъединителей выше 1000 В с ручным механическим приводом необходимо производить в диэлектрических перчатках.

Включать разъединители следует быстро и решительно, но без удара ножей в конце хода. Если при включении возникает дуга, операция включения должна быть закончена, так как прекращение включения или обратный ход ножа приведет лишь к развиту аварии.

Отключать разъединители следует медленно, особенно в начальный момент. В случае возникновения дуги в момент отхода ножей от губок (что свидетельствует о наличии тока в разрываемой цепи, что недопустимо) разъединитель должен быть немедленно снова включен.

Разъединители, как и отделители, не могут включать и отключать электрическую цепь под нагрузкой, поскольку они не имеют устройств для гашения возникающей при этом электрической дуги, которая, как правило, приводит к аварии и может вызвать поражение оператора током (рис. 12.6). Эти аппараты предназначены лишь для разрыва электрической цепи, не обтекаемой током, т. е. для снятия напряжения с того или иного участка цепи, а также для создания хорошо видимого воздушного изоляционного промежутка.

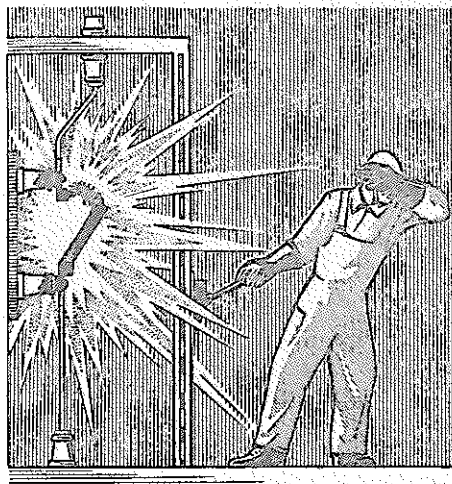


Рис. 12.6. Случай включения (отключения) разъединителя под нагрузкой в распределительном устройстве напряжением выше 1000 В

Однако в некоторых случаях допустимо включать и отключать разъединителями и отделителями небольшие токи.

Так, разъединителями разрешается выполнять следующие операции:

а) отключать и включать нейтрали трансформаторов и заземляющих дугогасящих реакторов при отсутствии в сети замыкания на землю;

б) отключать и включать зарядный ток шин и оборудования всех напряжений (кроме батарей конденсаторов).

Трехполюсными разъединителями наружной установки напряжением до 10 кВ допустимо отключать и включать нагрузочный ток до 15 А.

Отделителями и разъединителями внутренней и наружной установки разрешается проводить операции по отключению и включению намагничивающего тока силовых трансформаторов, зарядного тока и тока замыкания на землю воздушных и кабельных линий. Значения отключаемых и включаемых токов и порядок выполнения операций для различных электроустановок устанавливаются директивными указаниями.

Отключение и включение отделителями и разъединителями намагничивающего тока трансформатора, к нейтрали которого подключен заземляющий дугогасящий реактор, следует выполнять лишь после отключения последнего.

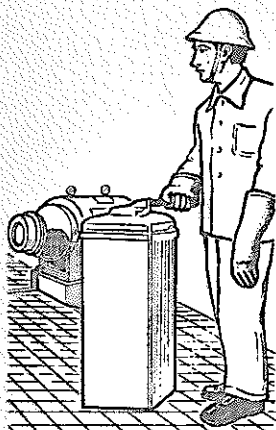


Рис. 12.7. Операция с пусковой аппаратурой электродвигателя

Отключение и включение отделителями и разъединителями намагничивающего тока трансформаторов 110–220 кВ необходимо проводить при заземленной нейтрالي.

Ручные и автоматические приводы разъединителей и отделителей, предназначенные для отключения и включения намагничивающего, зарядного и нагрузочного токов, должны обеспечивать быстрое проведение операции.

Установку и снятие предохранителей в цепях выше 1000 В следует производить при снятом напряжении. На присоединениях, в схеме которых отсутствуют коммутационные аппараты, позволяющие предварительно снять напряжение, установка и снятие предохранителей разрешаются под напряжением, но без нагрузки.

Предохранители трансформаторов напряжения разрешается заменять под напряжением и под нагрузкой.

Установку и снятие предохранителей под напряжением можно выполнять лишь с применением изолирующих клещей (штанги), диэлектрических перчаток и защитных очков (маски) (см. рис. 8.5).

В электроустановках до 1000 В смену перегоревших плавких вставок предохранителей при наличии рубильников рекомендуется производить при снятом напряжении. Если невозможно снять напряжение (например, на групповых щитках, сборках и т. п.), предохранители допускается менять под напряжением и под нагрузкой с помощью изолирующих клещей или диэлектрических перчаток, а при наличии открытых плавких вставок — с применением защитных очков (маски).

Включение и отключение электродвигателей пусковой аппаратурой с приводами ручного управления необходимо производить в диэлектрических перчатках (рис. 12.7).

12.3. ПРОИЗВОДСТВО РАБОТ В ДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

а) Категории работ

Ремонтные, монтажные, наладочные, строительные и другие работы, выполняемые в действующих электроустановках, в том числе на воздушных и кабельных линиях, в отношении мер безопасности делятся на три категории: работы со снятием напряжения; работы без снятия напряжения; работы под напряжением.

Работы со снятием напряжения выполняют при полном или частичном отключении электроустановки.

При работах с частичным отключением работающий не должен приближаться к токоведущим частям, находящимся под напряжением, на расстояния меньше указанных в табл. 12.1 (рис. 12.8).

Запрещается работать в согнутом положении, если при выпрямлении расстояние до токоведущих частей будет меньше указанного в табл. 12.1. В электроустановках электростанций и подстанций 6–110 кВ при работе около неогражденных то-

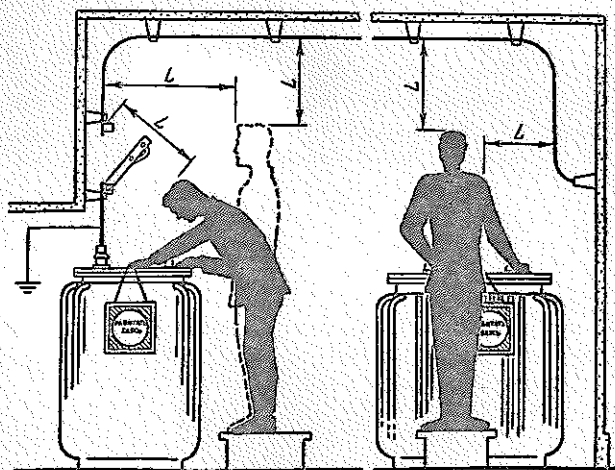


Рис. 12.8. Наименьшие допустимые расстояния от человека, выполняющего работы в действующей электроустановке, до токоведущих частей, находящихся под напряжением выше 1000 В (см. табл. 12.1)

токоведущих частей запрещается располагаться так, чтобы эти части находились сзади или с двух боковых сторон.

Работы без снятия напряжения выполняют без отключения электроустановки. При этом работать разрешается за постоянными и временными ограждениями токоведущих частей, на корпусах оборудования, на поверхности оболочек кабелей, а также на расстояниях от неогражденных токоведущих частей, находящихся под напряжением больше указанных в табл. 12.1.

Работы под напряжением выполняют непосредственно на токоведущих частях, находящихся под рабочим напряжением, с применением электрозащитных средств, а также на расстояниях от токоведущих частей меньше указанных в табл. 12.1.

Электрозащитные средства, применяемые при этих работах (изолирующие штанги и клещи, диэлектрические перчатки и т. п.), используют для изоляции человека от токоведущих частей, находящихся под напряжением, либо от земли (диэлектрические ковры, боты и галоши, изолирующие подставки, специальные изолирующие устройства* и т. п.). Работы под напряжением на ВЛ выше 1000 В рассмотрены в гл. 11.



6) Условия производства работ

В электроустановках все работы необходимо производить при обязательном соблюдении следующих условий:

1) работу можно выполнять только с разрешения уполномоченного на это официального лица в соответствии с заданием, оформленным в виде наряда или распоряжения;

2) работу должны вести, как правило, не меньше чем два лица;

3) должны быть выполнены организационные и технические мероприятия обеспечивающие персоналу безопасные условия работ.

Организационные мероприятия имеют целью обеспечить безупречную организацию выполнения работ в электроустановках для исключения несчастных случаев с людьми при высокой производительности труда и хорошем качестве работ. Такими мероприятиями являются:

а) выдача нарядов и распоряжений на производство работ;

б) допуск бригады к работе;

* Например, изолирующие лестницы и т. п. для работ под напряжением на воздушных линиях электропередачи высокого и сверхвысокого напряжений, описанные в гл. 11.

в) надзор за бригадой во время работы;

г) оформление перерывов в работе и окончания работ.

Технические мероприятия имеют целью обеспечить безопасность персонала при выполнении работ с полным или частичным снятием напряжения с электроустановки. Такими мероприятиями являются:

а) производство необходимых отключений и принятие мер для предотвращения ошибочного или самопроизвольного включения коммутационной аппаратуры (блокирование, механический запор приводов, снятие предохранителей и т. п.);

б) вывешивание переносных плакатов по технике безопасности и при необходимости установка временных ограждений;

в) проверка отсутствия напряжения на токоведущих частях установки, предназначенной для работы;

г) наложение временных заземлений.

в) Лица, ответственные за безопасность производства работ

Ответственным за организацию и выполнение высокопроизводительного и безопасного процесса работ в действующих электроустановках является:

1) лицо, выдающее наряд или отдающее распоряжение на производство работ в действующей электроустановке;

2) руководитель работ, выполняемых по наряду;

3) лицо, дающее разрешение на подготовку рабочего места и допуск бригады к работе;

4) лицо, подготавливающее рабочее место;

5) лицо, допускающее бригаду к работе;

6) производитель работ (наблюдающий).

Лицо, выдающее наряд или отдающее распоряжение на производство работ, назначается из числа административно-технического персонала предприятия и его структурных подразделений, имеющего квалификационную группу по электробезопасности не ниже V.

Руководителем работ, выполняемых по наряду, назначается инженерно-технический работник с группой не ниже V. Он обязан перед допуском бригады к работе проверить правильность подготовки рабочего места, проинструктировать бригаду при допуске и организовать безопасное производство работ.

Лицом, дающим разрешение на подготовку рабочего места и допуск бригады к работе, является дежурный с группой V, в оперативном управлении которого находится данная электроустановка.

Дежурный, выдавая разрешение на подготовку рабочего места и допуск бригады к работе, обязан сообщить лицам из числа оперативно-ремонтного персонала или дежурным, подготавливающим рабочее место, а также допускающим о предварительно выполненных операциях по отключению и наложению временных защитных заземлений. Он должен также вести учет допущенных к работе бригад.

Лицом, подготавливающим рабочее место, является дежурный или лицо из числа оперативно-ремонтного персонала. Он обязан выполнить относящиеся к нему указанные в наряде меры по подготовке рабочего места, а также принять дополнительные меры безопасности, требуемые Правилами техники безопасности (установка плакатов, ограждений и т. п.).

Допускающий к работе — лицо, имеющее электротехническую специальность, лично допускающее бригаду к работе. Его обязанность — убедиться в правильности подготовки рабочих мест и допустить бригаду к работе. Допускающими должны назначаться лица из числа дежурного и оперативно-ремонтного персонала с группой IV при работе в электроустановках выше 1000 В и с группой III в установках до 1000 В. На ВЛ допускающими могут быть производители работ ремонтных бригад.

Производитель работ является непосредственным руководителем бригады. При работах, выполняемых по наряду в электроустановках выше 1000 В, производитель работ должен иметь группу IV, а в электроустановках до 1000 В — группу III. При работах, выполняемых по распоряжению во всех электроустановках, производитель работ может иметь группу III.

Наблюдающий — лицо, имеющее электротехническую специальность, назначаемое для надзора за бригадами работников различных специальностей, не имеющих права самостоятельно работать в электроустановках по нарядам или распоряжениям (плотники, уборщики, монтажники и т. п.).

Наблюдающие должны иметь группу не ниже III. Их назначают при работах со снятием напряжения и работах на нетоковедущих частях без снятия напряжения.

Производитель работ (наблюдающий) обязан:

принять рабочее место от допускающего, выяснить у него, какие меры безопасности приняты при подготовке этих мест, а в пределах рабочих мест убедиться осмотром в их выполнении;

проинструктировать бригаду о мерах безопасности, которые необходимо соблюдать при выполнении работы;

обеспечить выполнение членами бригады необходимых мер безопасности;

контролировать исправность и пригодность инструмента, инвентарных средств защиты, такелажных приспособлений и т. п., а также сохранность установленных на рабочих местах заземлений, ограждений, плакатов, запирающих устройств приводов.

Наблюдающий обязан контролировать наличие установленных на рабочем месте заземлений, ограждений, плакатов, запирающих устройств приводов и обеспечить безопасность членов бригады от поражения электрическим током электроустановки.

На предприятии письменным указанием руководства должно быть оформлено предоставление работникам предприятия прав: выдающих наряд, распоряжение; допускающих из числа оперативно-ремонтного персонала; руководителей, производителей работ; наблюдающих, а также право единоличного осмотра электроустановок.

г) Выдача нарядов и распоряжений на производство работ

Наряд — это составленное на специальном бланке задание на безопасное производство работы, определяющее ее содержание, место, время начала и окончания, необходимые меры безопасности, состав бригады и лиц, ответственных за безопасность выполнения работы*.

Распоряжение — это задание на безопасное производство работы, определяющее ее содержание, место, время, меры безопасности (если они требуются) и лиц, которым поручено ее выполнение. Распоряжение может быть устным либо письменным произвольной формы.

Распоряжение имеет разовый характер; срок его действия определяется продолжительностью рабочего дня исполнителей.

По нарядам должны производиться следующие виды работ в электроустановках электростанций, подстанций, распределительных устройств, а также на кабельных линиях электропередачи:

при напряжении выше 1000 В — со снятием напряжения; под напряжением на токоведущих частях; без снятия напряжения на нетокведущих частях, когда требуется установка временных ограждений; с применением в РУ механизмов и грузоподъемных машин;

при напряжении до 1000 В — на сборных шинах распределительных устройств, распределительных щитов и сборок, а также на их присоединениях, по которым может быть подано напряжение.

На воздушных линиях электропередачи по нарядам должны производиться следующие работы: со снятием напряжения; под напряжением на токоведущих частях; без снятия напряжения, в том числе: с подъемом на опору выше 3 м от уровня земли, считая от ног человека; с разборкой конструктивных частей опоры; с откапыванием стоек опоры на глубину более 0,5 м; с применением механиз-

* Форму наряда и указания по его заполнению см. в [15], приложение 3.

мов и грузоподъемных машин в охранной зоне*; по расчистке трассы ВЛ, когда требуется принимать меры, предотвращающие падение на провода вырубаемых деревьев; по расчистке трассы ВЛ 0,4–10 кВ, когда обрубка веток и сучьев связана с опасным приближением людей к проводам или с возможностью падения веток и сучьев на провода.

По распоряжениям могут выполняться остальные работы, кроме перечисленных, в том числе работы на электродвигателях, от которых отсоединен кабель и концы его замкнуты накоротко и заземлены; работы в помещении КРУ на тележках с оборудованием, выкаченных из шкафов при условии, что двери или шторки шкафов закрыты.

Бригада при работе по наряду должна состоять не менее чем из 2 чел.: производителя работы и члена бригады с группой II или наблюдающего и члена бригады с группой I.

По распоряжению допускается работать единолично. Перечень работ, которые по распоряжению может выполнять одно лицо, должен быть утвержден руководством предприятия.

д) Отключение токоведущих частей

В электроустановках выше 1000 В при работах со снятием напряжения на месте производства работ должны быть отключены:

а) токоведущие части, на которых будут производиться работы;

б) неогражденные токоведущие части, к которым требуется приближаться людям на расстояния менее указанных в табл. 12.1 или механизмам и грузоподъемным машинам на расстояния менее приведенных в табл. 12.2.

Отключение должно производиться так, чтобы выделяемые для выполнения работы часть электроустановки или электрооборудование были отделены со всех сторон от токоведущих частей, находящихся под напряжением. При этом с каждой стороны, откуда коммутационным аппаратом может быть подано напряжение на рабочее место, должен быть видимый разрыв, образованный отключением разъединителей,

* Охранной зоной ВЛ является зона вдоль ВЛ переменного или постоянного тока в виде участка земли и воздушного пространства, ограниченная по обе стороны вертикальными плоскостями, отстоящими от крайних проводов в их неотклоненном положении на расстоянии 2 м для ВЛ до 1000 В, 10 м для ВЛ выше 1000 В до 20 кВ, 15 м для ВЛ 35 кВ, 20 м для ВЛ 110 кВ, 25 м для ВЛ 150–220 кВ, 30 м для ВЛ 330–500 кВ, 40 м для ВЛ 750 кВ и 30 м для ВЛ 800 кВ постоянного тока.

Таблица 12.2. Наименьшие допустимые расстояния от механизмов и грузоподъемных машин, а также от стропов, грузозахватных приспособлений и грузов до токоведущих частей электроустановки, находящихся под напряжением

Напряжение электроустановки, кВ	До 1,0	1,0—35	60—110	150	220	330	400—500	750	800 постоянного тока
Наименьшее допустимое расстояние, м	1,0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,5	4,5	6,0	4,5

Примечание. Соблюдение указанных расстояний обязательно для механизмов и грузоподъемных машин как в рабочем, так и в транспортном их состоянии.

снятием предохранителей, отсоединением либо снятием шин и проводов. Видимый разрыв может быть создан также отключением отделителей и выключателей нагрузки, кроме тех, у которых автоматическое включение осуществляется пружинами, установленными на самих аппаратах.

Для предотвращения самопроизвольного или ошибочного включения ручные приводы разъединителей, отделителей и выключателей нагрузки, которыми может быть подано напряжение к месту работы, должны быть заперты на замок в отключенном положении (рис. 12.9). Если эти аппараты имеют дистанционное управление, то у их приводов должны быть отключены цепи силовые и оперативного тока, а у пневматических приводов, кроме того, должен быть закрыт и заперт на замок вентиль на подводящем трубопроводе сжатого воздуха и выпущен сжатый воздух. У грузовых и пружинных приводов включающий груз или включающие пружины должны быть приведены в нерабочее положение, а устройства подъема этого груза или заводки пружин деблокированы.



Рис. 12.9. Ручной привод разъединителя, запертый на замок в отключенном положении

У разъединителей, управляемых оперативной штангой, стационарные ограждения должны быть заперты на механический замок.

В электроустановках 6–10 кВ с однополюсными разъединителями для предотвращения их ошибочного включения разрешается надевать на ножи резиновые колпаки (см. рис. 8.18).

Для исключения возможности появления напряжения на отключенном участке вследствие обратной трансформации трансформаторы напряжения и силовые трансформаторы, связанные с этим участком, необходимо отключить и со стороны напряжения до 1000 В, а также вывесить плакат «Не включать — работают люди» (на рубильнике, автомате, предохранителе и т. п.). При этом приводы отключающих аппаратов следует запереть механически или установить изолирующие накладки между их контактами.

В электроустановках до 1000 В с токоведущих частей, на которых будет производиться работа, напряжение со всех сторон должно быть снято отключением коммутационных аппаратов с ручным приводом, а при наличии в схеме предохранителей — снятием последних. При отсутствии в схеме предохранителей предотвращение ошибочного включения коммутационных аппаратов должно быть обеспечено такими мерами, как запирающие рукоятки или дверцы шкафа, закрытие кнопок, установка между контактами изолирующих накладок и др. Если коммутационный аппарат имеет дистанционное управление, то после его отключения должны быть отсоединены концы проводов от включающей катушки этого аппарата.

Если позволяют конструктивное исполнение аппаратуры и характер работы, перечисленные выше меры могут быть заменены расшивкой или отсоединением концов кабеля, проводов от коммутационного аппарата либо от оборудования, на котором должна производиться работа.

е) Вывешивание переносных плакатов по технике безопасности и ограждение места работ

Плакаты по технике безопасности вывешивает персонал, производящий отключение, сразу после отключения соответствующего аппарата, а также при подготовке рабочего места.

Плакаты необходимо вывешивать в соответствии со следующими указаниями:

а) на приводах разъединителей, отделителей и выключателей нагрузки, на ключах и кнопках дистанционного управления ими, на ком-



Рис. 12.10. Запрещающий плакат, вывешенный на ключе дистанционного управления выключателем при подготовке рабочего места на воздушной (или кабельной) линии электропередачи

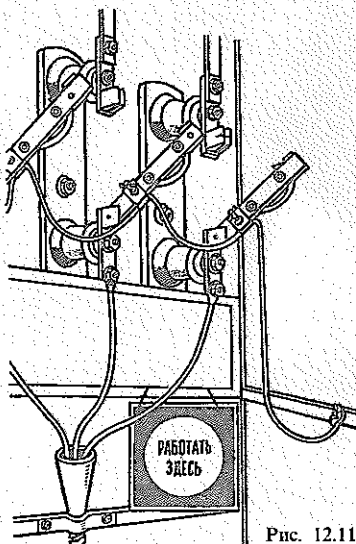


Рис. 12.11

Рис. 12.11. Рабочее место, подготовленное для производства ремонтных работ на кабельной воронке

мутационной аппаратуре до 1000 В (автоматы, рубильники, выключатели), отключенных при подготовке рабочего места в электроустановках электростанций, подстанций и РУ, вывешивают плакаты «Не включать — работают люди», а отключенных для производства работ на воздушных или кабельных линиях — плакаты «Не включать — работа на линии» (рис. 12.10);

б) у разъединителей, управляемых оперативной штангой, указанные плакаты размещают на ограждениях, а у разъединителей с полюсным приводом — на приводе каждого полюса;

в) на присоединениях до 1000 В, не имеющих автоматов, выключателей или рубильников, плакаты «Не включать — работают люди» или «Не включать — работа на линии» вывешивают у снятых предохранителей;

г) на вентилях, закрывающих доступ сжатого воздуха в пневматические приводы разъединителей, которыми произведено отключение, вывешивают плакаты «Не открывать — работают люди»;

д) в закрытых электроустановках на сетчатых или сплошных ограждениях (дверях) ячеек, соседних с местом работ и противоположных, вывешивают плакаты «Стоять — напряжение»;

е) в ОРУ на веревочных ограждениях вывешивают плакаты «Стоять — напряжение». При этом надписи должны быть обращены внутрь огражденного пространства;

ж) на подготовленных рабочих местах после наложения переносных заземлений вывешивают плакат «Работать здесь» (рис. 12.11).

Это требование не относится к воздушным линиям электропередачи, где плакат не вывешивают;

з) при работе на верху конструкции ОРУ, где возможен проход от места работы к соседним находящимся под напряжением ячейкам, устанавливают хорошо видимые плакаты «Стоять — напряжение». Внизу на конструкции или лестнице, по которой должен происходить подъем работающих наверх, вывешивают плакат «Влезать здесь», а на соседних конструкциях — плакаты «Не влезай — убьют!».

Временные ограждения устанавливают у соседних и противоположащих месту работ ячеек РУ, не имеющих ограждений, у проходов в соседние помещения электроустановки, куда персоналу не следует входить, а также у тех участков электроустановки, которые близко расположены к месту работ и к неотключенным частям которых возможно случайное приближение на опасное расстояние.

Для временного ограждения токоведущих частей, оставшихся под напряжением, можно применять щиты, ширмы, экраны и т. п., изготовленные из дерева или других изоляционных материалов.

При установке временных ограждений расстояние от них до токоведущих частей, находящихся под напряжением, должно быть не менее указанного в табл. 12.1. В электроустановках 6—15 кВ это расстояние при необходимости может быть уменьшено до 0,35 м.

В ОРУ при работах, проводимых с земли и на оборудовании, установленном на фундаментах и отдельных конструкциях, рабочее место должно быть ограждено (с оставлением прохода) канатом или шнуром из растительных либо синтетических волокон.

Плакаты и ограждения, установленные при подготовке рабочих мест, запрещается убирать или переставлять до полного окончания работы.

ж) Проверка отсутствия напряжения на отключенных токоведущих частях

Отсутствие напряжения проверяют указателем напряжения, исправность которого перед применением должна быть установлена с помощью предназначенных для этой цели специальных приборов или приближением к токоведущим частям, расположенным поблизости и заведомо находящимся под напряжением. Отсутствие напряжения следует проверять на всех зажимах отключенного оборудования: на шинных спусках — на трех фазах; у разъединителя — на трех ножах и трех

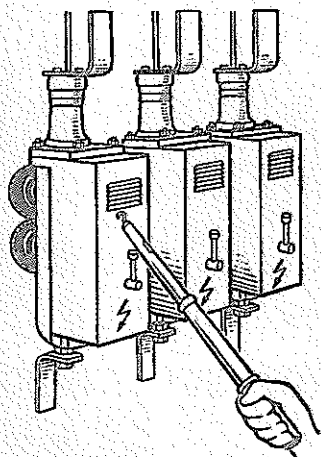


Рис. 12.12. Проверка отсутствия напряжения на выключателе горшкового типа, выведенном в ремонт, с помощью указателя напряжения

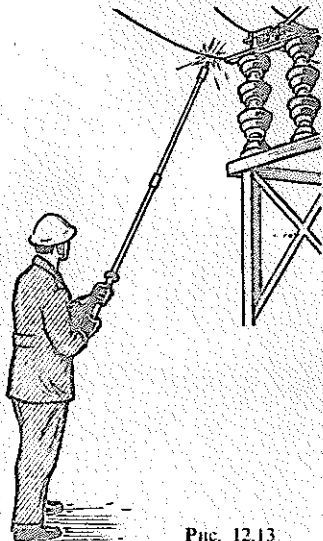


Рис. 12.13

Рис. 12.13. Проверка отсутствия напряжения на токоведущих частях открытого распределительного устройства напряжением 35 кВ и выше с помощью изолирующей оперативной штанги

губках; у выключателя — на всех шести вводах; у выключателя горшкового типа — на трех его баках и трех шинах выше проходных изоляторов и пр. (рис. 12.12).

В электроустановках 35 кВ и выше, в том числе на воздушных линиях электропередачи, для проверки отсутствия напряжения допустимо также пользоваться изолирующей штангой: приближая ее рабочую часть к проводу, можно по возникновению или отсутствию искрения либо потрескивания определить, есть или нет напряжение на проводе (рис. 12.13).

На одноцепных ВЛ 330 кВ и выше достаточным признаком отсутствия напряжения является отсутствие коронирования проводов*.

* Коронирование проводов — форма свободного разряда (т. е. разряда, поддерживающегося лишь за счет электрического поля без воздействия внешнего ионизатора). Коронный разряд возникает в сильно неравномерном поле, в том числе на проводах при определенном напряжении на них. Коронирование сопровождается небольшим фиолетовым свечением вокруг провода, вызванным явлением рекомбинации ионов в области разряда и слабым шипящим шумом.

Кроме того, отсутствие напряжения можно проверять путем прослеживания схемы электроустановки в натуре. Такой способ проверки разрешается применять в ОРУ и ВЛ напряжением 330 кВ и выше. Он допустим также в ОРУ и ВЛ более низких напряжений, КРУН и КТП наружной установки при тумане, дожде и снегопаде в случае отсутствия указателей напряжения, пригодных для работы в этих условиях.

На ВЛ прослеживание схемы в натуре заключается в проверке направления и внешних признаков данной линии, а также обозначений на опорах, которые должны соответствовать диспетчерским наименованиям линий.

На ВЛ 6–20 кВ на деревянных и железобетонных опорах при проверке отсутствия напряжения указателем, основанным на принципе протекания емкостного тока, может оказаться недостаточной емкость его относительно земли, поэтому указатель следует предварительно заземлить с помощью провода.

На ВЛ до 1000 В с нулевым проводом (сеть с заземленной нейтралью) при применении двухполюсного указателя напряжения проверять отсутствие напряжения нужно как между фазами, так и между каждой фазой и нулевым проводом. На этих линиях для контроля отсутствия напряжения на проводах допускается применять предварительно проверенный вольтметр. Пользоваться для этой цели контрольными лампами запрещается.

Устройства, сигнализирующие об отключенном положении аппаратов, блокирующие устройства, постоянно включенные вольтметры и т. п. являются только дополнительными средствами, на основании действия которых нельзя делать заключение об отсутствии напряжения.

з) Наложение временных заземлений

Отключенные для работы токоведущие части должны быть временно заземлены со всех сторон, откуда может быть подано напряжение, а провода воздушных линий электропередачи, кроме того, — на месте производства работ (рис. 12.14 и 12.15). Дополнительно заземлить отключенные токоведущие части, т. е. на рабочем месте, необходимо и в других электроустановках, если возможно возникновение на этих частях наведенного потенциала от влияния соседних частей, остающихся под напряжением.

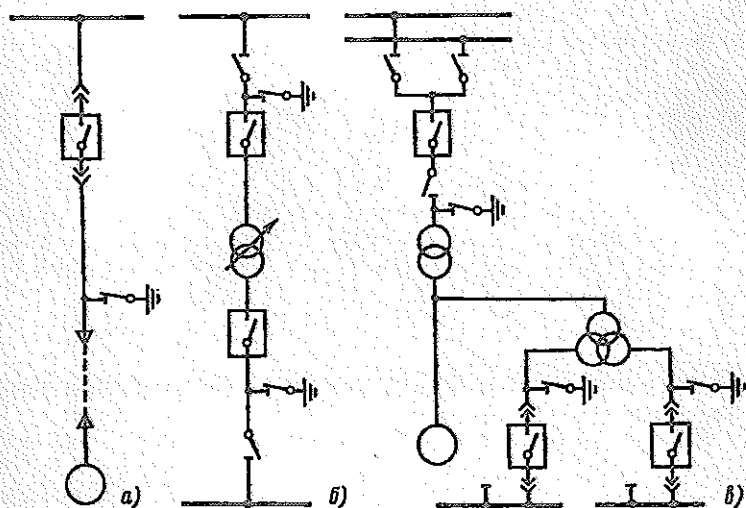


Рис. 12.14. Места наложения временных заземлений на отключенные для производства работ токоведущие части электроустановок:

а — при работе на электродвигателе; б — при работе на силовом двухмоточном трансформаторе; в — при работе на генераторе, блочном и отпаечном трансформаторах в схеме блока генератор-трансформатор

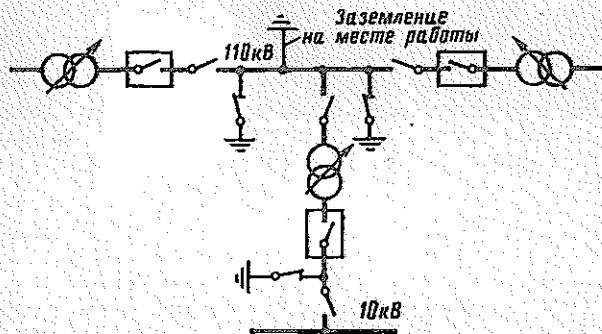


Рис. 12.15. Места наложения временных заземлений при производстве работ на воздушной линии электропередачи 110 кВ с отпайкой

При работах на отключенных сборных шинах РУ, РП, подстанций, щитов и т. п. разрешается ограничиваться заземлением шин в одном месте, как и на ВЛ до 1000 В, где допустимо заземлять отключенные провода только на месте работ.

Заземление токоведущих частей на месте их отключения осуществляется путем включения специальных заземляющих ножей, являющихся постоянным элементом схемы электроустановки, либо путем наложения временных переносных заземлений, описанных в § 8.2,з. Эти операции выполняют лица из числа дежурного или оперативно-ремонтного персонала, обслуживающего данную электроустановку.

Батареи статических конденсаторов должны быть заземлены включением секционных (кассетных) заземляющих ножей. Кроме того, выводы каждого конденсатора должны быть замкнуты накоротко и заземлены. Для этой цели допускается применение переносных заземлений сечением не менее 4 мм^2 .

Заземление проводов на ВЛ на месте работ осуществляется с помощью временных переносных заземлений, которые накладывают и снимают с проводов члены бригады, выполняющие работы на ВЛ, с участием производителя работ. Эти операции на ВЛ выше 1000 В производятся изолирующей штангой

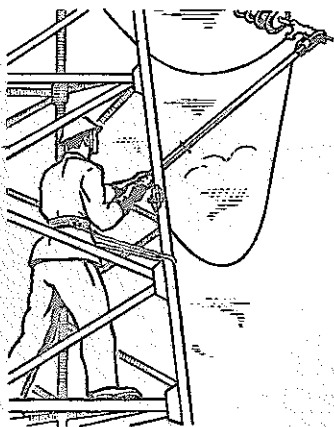


Рис. 12.16

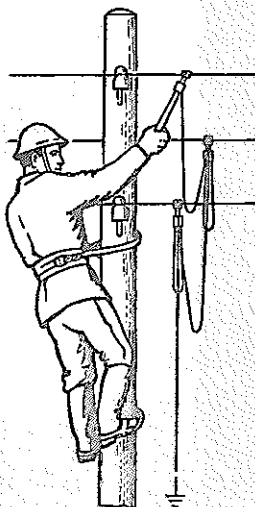


Рис. 12.17

Рис. 12.16. Наложение переносного заземления на отключенные провода воздушной линии электропередачи напряжением выше 1000 В с помощью изолирующей штанги

Рис. 12.17. Наложение переносного заземления на отключенные провода воздушной линии электропередачи напряжением до 1000 В с помощью изолирующей штанги

с применением диэлектрических перчаток (рис. 12.16), а на ВЛ до 1000 В — непосредственно руками в диэлектрических перчатках; в последнем случае для удобства используют также штанги небольшой длины (рис. 12.17), при этом надевать перчатки необязательно.

На ВЛ на месте производства работ должны быть заземлены все провода линии, а при необходимости и грозозащитные тросы, изолированные от опоры*. Однако на ВЛ 35 кВ и выше при производстве работ на проводе одной фазы или поочередно на проводах каждой фазы допускается заземлять на рабочем месте провод только той фазы, на которой выполняется работа. При этом запрещается приближаться к проводам остальных, незаземленных фаз на расстояния менее указанных в табл. 12.1.

Переносное заземление на ВЛ необходимо устанавливать возможно ближе к месту работы, т. е. непосредственно на той опоре, на которой будут производиться работы. Это требование вызвано тем, что при случайной подаче напряжения на линию самым безопасным местом для человека, касающегося провода, будет место вблизи заземления, ибо здесь напряжение между проводами, а также между проводом и землей (или опорой) практически окажется равным нулю, в то время как вдали от места заземления провод может иметь значительное напряжение. Правила техники безопасности разрешают устанавливать заземление на опоре, ближайшей к месту работ, а также с двух сторон участка ВЛ, на котором работает бригада, при условии, что расстояние между заземлениями не превышает 2 км.

и) Допуск бригады к работе

Бригада может приступить к работе лишь после допуска ее к работе специальным лицом — допускающим.

Перед допуском бригады к работе допускающий обязан получить на это разрешение дежурного, в оперативном управлении которого находится данная электроустановка. Затем он должен путем личного осмотра, а также по записям в оперативном журнале, по оперативной схеме, по сообщениям дежурных, оперативно-ремонтного персонала и персонала потребителей убедиться, что технические мероприятия по подготовке рабочего места выполнены. Производитель работ также проверяет подготовку рабочего места.

Допуск бригады к работе производится после проверки подготовки рабочего места. При этом допускающий обязан: проверить, соответствует ли состав бригады, прибывшей

* Заземление изолированного от опоры троса необходимо в случае работы на тросе или приближения к нему во время работы на опоре на расстояние менее 1 м.

для выполнения работы, составу, указанному в наряде или распоряжении; если допускающий не знает фамилий и групп электробезопасности членов бригады, проверка производится по именным удостоверениям;

ознакомить бригаду с содержанием наряда или распоряжения, указать границы рабочего места, показать ближайшее к рабочему месту оборудование и токоведущие части ремонтируемого и соседних присоединений, к которым запрещается приближаться независимо от того, находятся они под напряжением или нет;

доказать бригаде, что напряжение на отключенных для работы токоведущих частях отсутствует, показом наложенных на эти части заземлений, а там, где заземления не видны с рабочего места, — проверкой отсутствия напряжения с помощью указателя, а в электроустановках 35 кВ и ниже — последующим прикосновением рукой к токоведущим частям.

Оформление допуска к работе по наряду производится подписями наряда допускающего и производителя работ с указанием даты и времени допуска, а допуска по распоряжению — записью в оперативном или специальном журнале.

к) Надзор во время работы

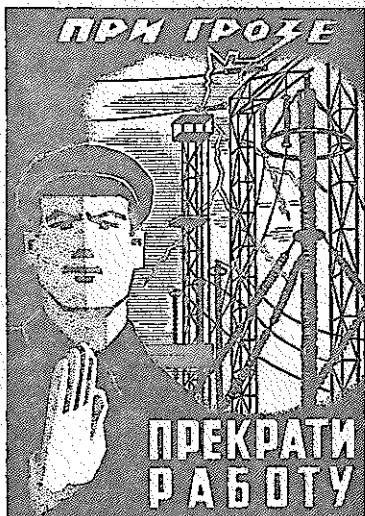
В целях предупреждения нарушений членами бригады правил техники безопасности надзор за бригадой с момента ее допуска к работе возлагается на производителя работ или наблюдающего. Для этого производитель работ (или наблюдающий) должен так организовать работу, чтобы вести контроль за членами бригады, находясь по возможности на том участке рабочего места, где выполняется наиболее ответственная работа.

Наблюдающему запрещается совмещать надзор с выполнением работы.

При необходимости кратковременного ухода с рабочего места производитель работ (наблюдающий), если его не могут заменить руководитель работ, допускающий или выдавший наряд, обязан удалить бригаду с места работы (с выводом ее из РУ и запираанием входных дверей, со снятием людей с опоры ВЛ и т. п.). При подмене производителя работ (наблюдающего) он должен на время своего отсутствия передать наряд лицу, его заменившему.

Допускается с разрешения производителя работ кратковременный уход с рабочего места одного или нескольких членов бригады. При этом количество членов бригады, оставшихся на

Рис. 12.18. Плакат, напоминающий требование правил техники безопасности о необходимости прекращения работ в ОРУ при возникновении грозы



рабочем месте, должно быть не менее двух, включая производителя работ.

На ВЛ при работах со снятием напряжения допускается рассредоточение бригады в пределах анкерного пролета линии.

При обнаружении нарушений правил техники безопасности или выявлении других обстоятельств, угрожающих безопасности работающих, бригада должна быть удалена с рабочего места и у производителя работ должен быть отобран наряд. По устранении обнаруженных нарушений бригада с разрешения выдавшего наряд может быть допущена к работе в общем порядке.

При наступлении грозы должны быть прекращены все работы на ВЛ, в ОРУ, а также в ЗРУ на выводах и линейных разъединителях воздушных линий (рис. 12.18). Это требование продиктовано возможностью поражения работающих током молнии при разряде ее в электроустановку, а также от волн атмосферного напряжения, набегающих по проводам ВЛ и возникающих при разряде молнии непосредственно в линию или вблизи нее на большом расстоянии от места работы людей.

л) Перерывы в работе и окончание работ

При перерывах в работе на протяжении рабочего дня (на обед, по условиям производства работ) бригада удаляется из помещения электроустановки и двери помещения запираются на замок. Наряд остается на руках у производителя работ (наблюдающего). Плакаты, ограждения и заземления остаются на месте. Ни один из членов бригады не имеет права после пере-

рыва войти в помещение или на территорию электроустановки в отсутствие производителя работ или наблюдающего. Допуск после такого перерыва выполняется производителем работ (наблюдающим) без оформления в наряде.

По окончании рабочего дня бригада убирает рабочее место. Предупредительные плакаты, заземления и ограждения остаются на местах. Наряд производитель работ оформляет подписью и передает допускающему, а при отсутствии последнего оставляет в отведенном для этого месте, например в папке действующих нарядов.

В электроустановках без местного дежурного персонала производителю работ разрешается по окончании рабочего дня оставлять наряд у себя.

Повторный допуск бригады к работе в последующие дни выполняет допускающий или с его разрешения руководитель работ.

После полного окончания работы бригада убирает рабочие места. Затем производитель работ удаляет бригаду из помещения или с территории электроустановки, снимает установленные бригадой временные ограждения, переносные плакаты и заземления, запирает двери помещения и сдает наряд допускающему.

Полное окончание работ оформляется в наряде подписью производителя работ, а по нарядам, выданным с назначением руководителя работ, и его подписью после приемки им рабочих мест.

Допускающий после получения им от производителя работ наряда, в котором оформлено полное окончание работ, должен осмотреть рабочие места и сообщить лицу, выдавшему ему разрешение на подготовку рабочих мест и допуск бригады к работе, о полном окончании работ и о возможности включения электроустановки.

Включать электроустановку в работу можно только после получения на это разрешения (распоряжения) лица, выдавшего разрешение на подготовку рабочих мест и допуск бригады к работе, или лица, его сменившего. Перед включением должны быть восстановлены постоянные ограждения и сняты установленные дежурным или оперативно-ремонтным персоналом при подготовке рабочих мест временные ограждения, переносные плакаты по технике безопасности и временные заземления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березнева В. И. Электротравма, электроожоги и их лечение. Л.: Медицина, 1964. 208 с.
2. Электробезопасность в горнодобывающей промышленности/Л. В. Гладилип, В. И. Шуцкий, Ю. Г. Бансжев, Н. И. Чеботарев. М.: Недра, 1977. 328 с.
3. ГОСТ 12.1.030—81. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
4. ГОСТ 12.1.038—82. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
5. ГОСТ 12.1.009—76. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Термины и определения.
6. Долин П. А. Работы под напряжением на воздушных линиях электропередачи. М.: Госэнергоиздат, 1962. 112 с.
7. Долин П. А. Справочник по технике безопасности. М.: Энергоиздат, 1982. 800 с.
8. Долин П. А. Электротехнические защитные средства и предохранительные приспособления. М.: Энергия, 1966. 376 с.
9. Иоссель Ю. Я., Кочанов Э. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости. Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1969. 240 с.
10. Каплан А. Д. Поражение электрическим током и молнией. М.: Медгиз, 1951. 102 с.
11. Орлов А. Н., Саркисов М. А., Бубенко М. В. Электротравма. М.: Медицина, 1977. 152 с.
12. Охрана труда/Б. А. Князевский, П. А. Долин, Т. П. Марусова и др.; Под ред. Б. А. Князевского. М.: Высшая школа, 1982. 310 с.
13. Охрана труда на железнодорожном транспорте/Под ред. Ю. Г. Сибарова. М.: Транспорт, 1981. 288 с.
14. Правила применения и испытания средств защиты, используемых в электроустановках. М.: Энергоатомиздат, 1983. 64 с.
15. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок. М.: Энергоиздат, 1982. 160 с.
16. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. М.: Энергия, 1977. 288 с.
17. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. М.: Энергия, 1969. 352 с.
18. Правила устройства электроустановок. Раздел I. Глава I-8. М.: Атомиздат, 1978. 56 с.
19. Правила устройства электроустановок. Раздел I. Главы I-1—I-7. М.: Энергоиздат, 1982. 89 с.
20. Шуцкий В. И., Ахлюстин В. К. Безопасность обслуживания электроустановок углеобогажительных фабрик. М.: Недра, 1979. 264 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Амплитуда блуждающей волны 389
 - — — на месте работы 391
 - — — первоначальная 389
- Аналогия электростатическая 89
- Аппарат коммутационный 395
- Аппараты искусственного дыхания 63, 64
- Асимметр 270
- Асфиксия 20
- Бентонит 191
- Биопотенциалы 7
- Биотоки 8
- Бланк переключений 413, 414
- Боты диэлектрические 296
 - — испытание 306
- Влажность воздуха относительная 402
 - грунта 145, 146
- Влияние электромагнитное 349
 - электростатическое 340
- Воздушный промежуток 386, 393
 - — длина 394
- Вода свободная 143, 145
 - связанная 143, 145
- Временные переносные заземления 298
 - — — наложение 430
- Время фиктивное 299
- Выравнивание потенциала 186, 187
- Галоши диэлектрические 296
 - — испытание 306
- Глина 148
- Гроза 391, 435
- Гром 390
 - дальность слышимости 391
- Грунт 76
 - уплотненность 149
- Дежурство в электроустановках 404
- Действие тока биологическое 6
 - — механическое 6
 - — термическое 6
 - — электролитическое 6
- Дерма 23
- Дефибриллятор 73
- Дефибрилляция сердца 72
- Дисперсность грунта 147
- Диэлектрические резиновые изделия 295
- Длина пробега волны 390
- Допуск бригады к работе 433
- Дублирование 399
- Емкости частичные 343, 344
- Емкостный ток через человека 376
 - — — — наибольший 377
 - — — — ограничение 378
 - — — — установившийся 377
- Емкость человек — земля 375, 376
 - фазы ВЛ 316
- Заземление защитное 182
 - — область применения 183
 - — принцип действия 183
 - — расчет 200
 - бака трансформатора 494
 - молниезащиты 183, 199
 - нейтрали 247
 - оболочки и брони кабеля 194
 - переносное 298
 - — наложение, снятие 299, 300, 368
 - — сечение проводов 299
 - повторное 251
 - — назначение 228
 - привода разъединителя 194
 - рабочее 183
 - экранирующих устройств 336
- Заземлитель 75, 184
 - в многослойной земле 130
 - глубинный 190
 - групповой 75, 96
 - — в двухслойной земле 138
 - естественный 187, 189
 - искусственный 187, 188
 - одиночный 75
 - — в двухслойной земле 132
 - рудный 191
 - сложный 75
 - таликовый 192
- Заземляющий электрод 75
- Замена изоляторов 385
- Замыкание на корпус 114
- Зануление 222
 - область применения 224
 - переносных электроприемников 252, 253
 - принцип действия 233
 - расчет 233
- Захват изолирующий 382
- Земля 76
 - двухслойная 131
 - многослойная 130
- Знак электрический 12

Зона безопасного прикосновения

- 361, 363, 365
- взрывоопасная 196
- влияния 336
- охранная 424
- экранирования 337

Измерение сопротивления заземлителя 220

- — земли 152
- — — методы 156
- — — многослойной 153
- — — однородной 152
- — петли фаза — нуль 255

Индуктивность проводов взаимная 351

Инструктаж персонала 397

- — вводный 398
- — первичный 398
- — периодический 398

Инструмент слесарно-монтажный 295

- — — испытание 306, 307

Искусственное дыхание 61, 62

- — аппаратные способы 63
- — выполнение 66
- — ручные способы 64

Испытание электрозащитных средств 302

Канаты 380

Кардиосикл 39

Квалификационные группы 400, 401

Квалификация 48

Клеши изолирующие 287

- — испытание 304, 305
- — электроизмерительные 288
- — испытание 304, 305

Климатические зоны 131

- — признаки 151

Ковры диэлектрические 297

- — испытание 307

Колпак изолирующий 301

- — испытание 306
- — установка 302

Коронирование проводов 429

Костюм экранирующий 326

- — заземление 330
- — защитный принцип 326
- — конструкция 327
- — область применения 329

Коэффициент использования заземлителя 104, 106, 107

- напряжения прикосновения 113, 119, 120, 123, 141
- — шага 125, 119, 128, 130
- сезонности 150, 151, 152
- Критерии электробезопасности 48

Лестница изолирующая 380

- — длина по изоляции 392

Линии эквипотенциальные 83, 87

Линия транспонированная 342

Лучи инфракрасные 15

- ультрафиолетовые 15

Магистраль заземления 192, 195

Массаж сердца 61, 68

- — выполнение 69
- — эффективность 71

Медосмотр персонала 396

Мерзлота вечная 146, 147

Меры первой помощи 58

Металлизация кожи 12

Метод амперметра — вольтметра 157

- зеркальных изображений 78, 93, 94

- послойного зондирования 153

- простого пробного электрода 152

- разового зондирования 152

- ремонта ВЛ под напряжением 372

- — — — — достоинства 373

- — — — — электрическая схема 373, 374

- ступенчатого погружения электрода 153

Механизм смерти от электрического тока 17

Механическое повреждение 14

Модель двухслойной земли 132

Молния 388, 391, 435

Наблюдающий 422

Накладка изолирующая 301

Напряжение для питания светильников 180

- относительно земли 75

- прикосновения 49, 113

- — допустимые значения 49, 50, 51, 52

- — измерение 220

- — при групповом заземлителе 118

- — при одиночном заземлителе 114
- — с учетом сопротивления основания 122
- шага 44, 124
- — при групповом заземлителе 127
- — при одиночном заземлителе 126
- — с учетом сопротивления основания 129
- Напряженность электрического поля вблизи ВЛ 311, 316
- — — измерение 325, 326
- Наряд 423
- Нейтраль 159
- глухозаземленная 160
- изолированная 161
- эффективно заземленная 18
- Неоновая лампа 291
- Нормы испытания электрозащитных средств 303
- Обработка почвы 191
- Обучение персонала 397
- — на рабочем месте 398
- Объем эксплуатации электроустановок 403
- Ограждения временные 300
- Ограждения-клетки 300
- Ожог электрический 9
- Организационные мероприятия 420
- Освобождение от действия тока 53
- Осмотр ВЛ 410
- электроустановки 407
- Паралич дыхания 38, 41
- Переключения оперативные 412
- Перенапряжение атмосферное 387, 388
- внутреннее 387, 388
- Перенос потенциала на человека 376, 383
- Персонал административно-технический 395
- неэлектрический 396
- оперативно-ремонтный 396
- оперативный 395
- ремонтный 396
- Перчатки диэлектрические 295
- — испытание 306
- — проверка исправности 296
- Песок 148
- Петля фаза-нуль 235, 255
- Плакаты по технике безопасности 426
- Подставка изолирующая 297
- Поле растекания тока 76
- Поле электрическое 309
- — напряженность 310
- — — гигиенические нормативы 323
- — электромагнитное 309
- Помещения без повышенной опасности 402
- особо опасные 413
- с повышенной опасностью 402
- Пластик древесностлоистый 379
- Поражающий фактор 33
- Потенциальная кривая заземлителя 76, 87
- — — группового 98, 99, 101
- — — дискового 85
- — — полушарового 81
- — — протяженного 86
- — — стержневого 84
- — — шарового 78, 80
- характеристика 345
- — заземленного провода 357, 364
- — незаземленного провода 345, 352, 356, 362
- Почва 76
- Прекращение дыхания 20
- сердечной деятельности 19, 41
- Прибор защитного отключения 257
- Прикосновение двухфазное 161
- однофазное 162
- к заземленному проводу 347, 363
- к незаземленному проводу 166, 346, 360
- Присоединение 413
- Причины поражения током 386
- Проверка отсутствия напряжения 428
- Проводник заземляющий 184, 192
- — естественный 193
- — крепление 193
- — сечение 192
- — нейтральный 160
- — нулевой 160, 222
- — защитный 222
- — — назначение 224

- - - обрыв 231
- Производитель работ 422
- Пути тока в теле человека 42
- Работы верхолазные 396
 - под напряжением 372
 - - возможные опасности 372
- Размещение электродов 188
- Разность потенциалов контактная 249
- Разрядное напряжение воздушного промежутка 392, 393
 - - гирлянды изоляторов 390, 393
 - - дерева 390
 - - по поверхности бруса 386, 392
- Распределение потенциала вокруг заземлителя 76
 - - - шарового 76, 78
- Режим нейтрали 179
- Ремонт пофазный 339
 - - меры безопасности 366
 - - провода ВЛ 382
- Рефлекторное действие тока 7
- Роговой слой кожи 22
- Род грунта 147
- Ростковый слой кожи 23
- Руководитель работ 421
- Сапоги диэлектрические 295
- Световой сигнал 290
- Сети однофазные 159
 - трехфазные 159, 161
- Слой сезонных изменений 131
- Смерть биологическая 18
 - клиническая 17
 - - длительность 18
- Соединения заземляющих проводников 195
- Сопротивление внутреннее индуктивное 229
 - заземления нейтрали 241
 - заземлителя 75, 87
 - - в двухслойной земле 134, 135, 137
 - - в многослойной земле 131
 - - группового 103
 - - одиночного 87, 90
 - - сложного 109, 111
 - земли 142
 - - удельное 143
 - - - зависимость от влажности 144
 - - - - от времени года 146
- - - - от рода грунта 147
- - - - от температуры 145
- - - - от уплотненности 149
- - - измерение 152
- - - эквивалентное 132, 139
- петли фаза-нуль 235
- повторного заземления 243, 246
 - тела человека 21, 23
 - - наименьшее значение 28, 29, 30
 - - - схема замещения 24, 25
 - тканей тела человека 22
- Средства защиты 280
 - - предохранительные 281
 - - электрозащитные изолирующие 280
 - - экранирующие 281
- Стекание тока в землю 75
- Стеклопластики 379
- Строение кожи человека 22, 23
- Структура грунта 143
- Текстолит 379
- Температура грунта 145, 146
- Технические мероприятия безопасности 421
- Ток безопасный 34
 - замыкания на землю 202
 - импульсный 41
 - индуцирующий 351
 - неотпускающий 35
 - номинальный предохранителя 233
 - осязательный 33, 378
 - постоянный 46
 - фибрилляционный 36
- Точка нейтральная 159
 - нулевая 160
 - нулевого потенциала 160, 358, 361
- Транспозиция 342
- Тяги изолирующие 382
- Удар электрический 8, 15, 158
 - - степени опасности 16
- Удельное сопротивление земли 142
 - - слоев земли 132
- Указатель напряжения 290
 - - двухполюсный 291
 - - испытание 307
 - - однополюсный 292
- Устройство заземляющее 184

- — выносное 184
- — испытание 219
- — контурное 185
- — эксплуатация 219
- защитного отключения 257
- — — область применения 259
- — — основные элементы 257
- — — типы 260
- — — требования, предъявляемые к нему 258
- изолирующее 379
- — длина по изоляции 392
- экранирующее 331
- Фаза Т кардиоцикла 39, 40
- Фибрилляция сердца 19, 36, 37, 40
- Фигура молнии 12
- Фильтры напряжения нулевой последовательности 267, 268
- тока нулевой последовательности 271
- Формула Фауста и Менжера 391
- Формулы сопротивлений заземлителей 90
- Части, подлежащие заземлению 195
- — зануление 346
- Чернозем 149
- Четырехпроводная трехфазная сеть 160
- Чувствительность устройств защитного отключения 258
- Шок электрический 20
- Штанга-гаситель 368, 369
- Штанги изолирующие 281
- — испытание 304, 305, 306
- ЭДС наведенная 349
- продольная 350
- Эквипотенциальные кривые 86
- Экранирование естественное 337
- Экранирующие устройства 331
- — защитный принцип 332
- — конструкция 333
- — условия применения 336
- Экранирующий костюм 326
- Электрическая прочность изолирующих устройств 386
- — изоляции проводов 386
- Электрод 75
- Электродозаглубитель 189
- Электрозащитные изолирующие средства 280
- — — дополнительные 280
- — — ограждающие 281
- — — основные 280
- экранирующие средства 281
- Электрокардиограмма 40
- Электромагнитное поле 309
- — биологическое действие 309
- Электроофтальмия 15
- Электротравма 8, 17
- местная 8
- общая 8
- Электроустановка 394
- бытовая 49
- действующая 395
- закрытая (внутренняя) 394
- открытая (наружная) 394
- Эпидермис 22
- Эффективное заземление нейтралей 203

Оглавление

Предисловие	3
Глава 1. Действие электрического тока на организм человека	6
1.1. Виды поражений электрическим током	6
а) Особенности действия тока на живую ткань	6
б) Местные электротравмы	8
в) Электрический удар	15
г) Механизм смерти от электрического тока	17
1.2. Электрическое сопротивление тела человека	21
а) Живая ткань как проводник электрического тока	21
б) Электрическое сопротивление тела человека	22
в) Зависимость сопротивления тела человека от состояния кожи	26
г) Зависимость сопротивления тела человека от параметров электрической цепи	28
д) Зависимость сопротивления тела человека от физиологических факторов и окружающей среды	32
1.3. Влияние значения тока на исход поражения	33
а) Поражающий фактор	33
б) Характер воздействия на человека токов разного значения	33
1.4. Влияние продолжительности прохождения тока на исход поражения	38
1.5. Влияние пути тока на исход поражения	41
1.6. Влияние частоты и рода тока на исход поражения	45
1.7. Влияние индивидуальных свойств человека на исход поражения	47
1.8. Критерии безопасности электрического тока	48
Глава 2. Первая помощь пострадавшим от электрического тока	52
2.1. Освобождение человека от действия тока	53
2.2. Меры первой доврачебной медицинской помощи	58
2.3. Искусственное дыхание	62
2.4. Массаж сердца	68
2.5. Электрическая дефибрилляция сердца	72
Глава 3. Явления при стекании тока в землю	75
3.1. Общие сведения	75
3.2. Стеkanie тока в землю через одиночный заземлитель	76
а) Распределение потенциала на поверхности земли	76
б) Сопротивление одиночного заземлителя растеканию тока	87
в) Определение сопротивления растеканию заземлителей методом электростатической аналогии	89
3.3. Стеkanie тока в землю через групповой заземлитель	96

а) Распределение потенциала на поверхности земли	96
б) Потенциал группового заземлителя	99
в) Сопротивление группового заземлителя растеканию тока	103
г) Коэффициент использования группового заземлителя	104
д) Сопротивление сложного заземлителя в однородной земле	109
3.4. Напряжение прикосновения	113
а) Напряжение прикосновения при одиночном заземлителе	114
б) Напряжение прикосновения при групповом заземлителе	117
в) Напряжение прикосновения с учетом падения напряжения в сопротивлении основания, на котором стоит человек	121
3.5. Напряжение шага	124
а) Напряжение шага при одиночном заземлителе	126
б) Напряжение шага при групповом заземлителе	127
в) Напряжение шага с учетом падения напряжения в сопротивлении основания, на котором стоит человек	129
3.6. Заземлитель в многослойной земле	130
а) Общие сведения	130
б) Одиночный заземлитель в двухслойной земле	132
в) Групповой заземлитель в двухслойной земле	138
3.7. Электрическое сопротивление земли	142
а) Общие сведения	142
б) Зависимость ρ грунта от влажности	144
в) Зависимость ρ грунта от температуры	145
г) Влияние рода грунта на его удельное сопротивление	147
д) Зависимость ρ грунта от его уплотненности	149
е) Зависимость ρ грунта от времени года	149
ж) Измерение удельного сопротивления грунта	152
Глава 4. Анализ опасности поражения током в различных электрических сетях	158
4.1. Общие положения	158
4.2. Однофазные сети	163
а) Сеть, изолированная от земли	163
б) Сеть с заземленным проводом	166
4.3. Трехфазные сети	168
а) Трехфазная четырехпроводная сеть с нейтралью, заземленной через активное и индуктивное сопротивление	168
б) Трехфазная четырехпроводная сеть с глухозаземленной нейтралью	170
в) Трехфазная трехпроводная сеть с изолированной нейтралью	175
4.4. Выбор схемы сети и режима нейтрали	179
Глава 5. Защитное заземление	182
5.1. Назначение, принцип действия и область применения	182
5.2. Типы заземляющих устройств	184
5.3. Выполнение заземляющих устройств	187

а) Заземлители	187
б) Заземляющие проводники	192
в) Оборудование, подлежащее защитному заземлению	195
г) Связь между заземляющими устройствами нескольких аналогичных установок и установок разных напряжений и назначений	197
5.4. Расчет защитного заземления	200
а) Исходные данные для расчета	202
б) Определение расчетного тока замыкания на землю	202
в) Определение требуемого сопротивления заземляющего устройства	205
г) Определение требуемого сопротивления искусственного заземлителя	207
д) Выбор типа заземлителя и составление предварительной схемы заземляющего устройства	208
е) Уточнение параметров заземлителя	211
ж) Примеры расчета заземлителей	214
5.5. Эксплуатация заземляющих устройств	219
а) Возможные повреждения заземляющих устройств	219
б) Виды и периодичность проверок состояния заземляющих устройств	219
в) Испытания заземляющих устройств	220
Глава 6. Зануление	222
6.1. Назначение, принцип действия и область применения	222
6.2. Назначение отдельных элементов схемы зануления	224
а) Назначение нулевого защитного проводника	224
б) Назначение заземления нейтрали обмоток источника тока	226
в) Назначение повторного заземления нулевого защитного проводника	228
6.3. Расчет зануления	233
а) Расчет на отключающую способность	233
б) Расчет сопротивления заземления нейтрали	241
в) Расчет сопротивления повторного заземления нулевого защитного проводника	243
6.4. Выполнение системы зануления	246
6.5. Контроль исправности зануления	254
а) Общие сведения	254
б) Измерение сопротивления петли фаза — нуль	255
Глава 7. Защитное отключение	256
7.1. Общие сведения	256
7.2. Устройства, реагирующие на потенциал корпуса	261
7.3. Устройства, реагирующие на ток замыкания на землю	264
7.4. Устройства, реагирующие на напряжение нулевой последовательности	267
7.5. Устройства, реагирующие на ток нулевой последовательности	271
7.6. Устройства, реагирующие на оперативный ток	276
Глава 8. Средства защиты, применяемые в электроустановках	280
8.1. Общие сведения	280

8.2. Назначение, конструкция и правила применения	281
а) Изолирующие штанги	281
б) Изолирующие клещи	287
в) Электроизмерительные клещи	288
г) Указатели напряжения	290
д) Инструмент слесарно-монтажный с изолирующими рукоятками	294
е) Диэлектрические перчатки, галоши, боты, сапоги и ковры	295
ж) Изолирующие подставки	297
з) Временные переносные защитные заземления	298
и) Временные переносные ограждения	300
8.3. Электрические испытания изолирующих электрозащитных средств	302
а) Условия, нормы и сроки испытаний	302
б) Производство испытаний	305
Глава 9. Защита от воздействия электрического поля промышленной частоты в электроустановках сверхвысокого напряжения	308
9.1. Биологическое действие электромагнитного поля	308
9.2. Напряженность электрического поля	310
9.3. Ток, проходящий через человека в землю	318
9.4. Гигиенические нормативы	323
9.5. Экранирующий костюм	326
а) Защитный принцип	326
б) Конструкция костюма	327
в) Область и условия применения	329
9.6. Экранирующие устройства	331
а) Защитный принцип	332
б) Конструкция и размещение	333
в) Условия применения	336
9.7. Некоторые особенности производства работ в зоне влияния	336
Глава 10. Безопасность при пофазном ремонте воздушных линий электропередачи	339
10.1. Особенности пофазного ремонта	339
10.2. Электростатическое влияние	340
а) Значение наведенного потенциала на отключенном проводе	340
б) Потенциальная характеристика незаземленного провода	345
в) Опасность прикосновения к проводу	346
10.3. Электромагнитное влияние	349
а) Значение наведенной ЭДС	349
б) Потенциальная характеристика незаземленного провода	352
в) Потенциальная характеристика заземленного провода	357
г) Опасность прикосновения к проводу	360
10.4. Меры безопасности при ремонте	366

а) Способы обеспечения безопасности прикосновения к проводу	366
б) Подготовка провода к ремонту и производство работ	368
Глава 11. Безопасность при работах под напряжением на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения . . .	372
11.1. Особенности и достоинства метода работ под напряжением	372
11.2. Принцип, положенный в основу метода работ под напряжением	373
а) Электрическая схема	373
б) Емкостный ток человек — земля и его ограничение	375
11.3. Приспособления для выполнения работ под напряжением и порядок производства работ	379
а) Изолирующие устройства и вспомогательные приспособления	379
б) Описание отдельных видов работ	382
11.4. Анализ возможных опасностей при работе под напряжением	385
а) Причины поражения током и способы их устранения	385
б) Условия возникновения и значения внутренних перенапряжений на месте работы людей	387
в) Условия возникновения и значения атмосферных перенапряжений на месте работы людей	388
г) Уровень изоляции по условиям безопасности	391
Глава 12. Организация безопасной эксплуатации электроустановок	394
12.1. Общие положения	394
а) Персонал, обслуживающий электроустановки	395
б) Медицинские освидетельствования персонала	396
в) Обучение персонала	397
г) Проверка знаний персоналом правил и инструкций	399
д) Квалификационные группы по электробезопасности	400
е) Классификация помещений по опасности поражения электрическим током	401
ж) Содержание (объем) эксплуатации электроустановок	403
12.2. Оперативное обслуживание действующих электроустановок	404
а) Дежурство в электроустановках	404
б) Осмотры электроустановок	407
в) Оперативные переключения	412
12.3. Производство работ в действующих электроустановках	419
а) Категории работ	419
б) Условия производства работ	420
в) Лица, ответственные за безопасность производства работ	421
г) Выдача нарядов и распоряжений на производство работ	423

д) Отключение токоведущих частей	424
е) Вывешивание переносных плакатов по технике безопасности и ограждение места работ	426
ж) Проверка отсутствия напряжения на отключенных токоведущих частях	428
з) Наложение временных заземлений	430
и) Допуск бригады к работе	433
к) Надзор во время работы	434
л) Перерывы в работе и окончание работ	435
Список литературы	437
Предметный указатель	438

Петр Алексеевич Долин

ОСНОВЫ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Редактор издательства *Р. М. Ваничкина*

Художественный редактор *Б. Н. Тумин*

Технический редактор *Н. П. Собакина*

Корректор *И. А. Володяева*

ИБ № 333

Сдано в набор 08.06.83. Подписано в печать 18.01.84. Т-01635. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага кн.-журн. Гарнитура Таймс. Печать высокая. Усл. печ. л. 23,52. Усл. кр.-отт. 23,84. Уч.-изд. л. 24,84. Тираж 150 000 экз. Заказ № 962. Цена 1 р.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Ордена Октябрьской Революции, ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 197136. Ленинград, П-136, Чкаловский пр., 15.