

Министерство образования Российской Федерации

Пензенский государственный университет

Рузняев Е.С., Складов Н.Е., Волков В.В.

Электробезопасность

Учебное пособие

Издательство Пензенского государственного университета

Пенза, 2004

УДК 621.315

Рецензенты:

Скляров Н.Е., Рузняев Е.С., Волков В.В

Электробезопасность: Учебное пособие для студентов по курсу “электробезопасность” – Пенза

Приведены основные данные по организации безопасной эксплуатации электроустановок, рассматривается действие электрического тока на организм человека, первая помощь пострадавшим от электрического тока. Также рассматриваются элементы защитного оборудования, защитное заземление электроустановок, защитное зануление, средства защиты персонала, вопросы защиты людей от воздействий электромагнитного поля.

Пособие подготовлено на кафедре “Автоматизированные электроэнергетические системы и сети” и предназначено для студентов, может быть также полезно для аспирантов и научно-технических сотрудников, интересующихся вопросами электробезопасности.

ВВЕДЕНИЕ

Под термином «электробезопасность» понимается система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

Теоретическое обоснование и разработка такой системы и отдельных ее узлов – важнейшая часть работ при проектировании объектов в любой отрасли народного хозяйства. Не случайно существует множество подразделов электробезопасности – на производстве, в сельском хозяйстве, в горной промышленности, в передвижных установках, в зданиях и сооружениях и т.д. Но все эти подразделы базируются на общих требованиях, основах электробезопасности.

Требования электробезопасности регламентированы различными Правилами. Первые в России Правила и нормы для электротехнических устройств сильного тока созданы в 1912 г. комиссией, сформированной третьим электротехническим съездом в 1903г. В настоящее время учет условий электробезопасности на стадии проектирования объектов регламентируют Правила устройства электроустановок ПУЭ, а в период эксплуатации - Правила эксплуатации электроустановок потребителей ПЭЭП.

Если на стадии проектирования объекта документация согласовывается с органами надзора, требующими строгого соблюдения Правил, то в период эксплуатации многое зависит непосредственно от конкретных лиц, организующих и выполняющих работу. И, по различным соображениям, они зачастую пренебрегают требованиями Правил безопасности.

Современного человека, окруженного техникой, устрашающими плакатами не остановишь. Эффективным может быть только один путь предупреждения электротравматизма – воспитание осознанного отношения к вопросам электробезопасности на основе понимания работниками сути физических процессов. Однако Правила содержат только требования без пояснений, а другие литературные источники изложены либо популистски, либо декларативно и не дают законченного представления об опасности того или иного нарушения Правил.

Вниманию читателей предлагается материал, составленных на основе имеющегося опыта преподавания вопросов электробезопасности на различных предприятиях. Будут изложены:

- виды действия электрического тока на организм человека;
- возможные схемы включения человека в электрическую цепь;
- особенности измерения сопротивления изоляции электроустановок;

- особенности выбора технических средств защиты от поражения электрическим током при прикосновении человека к корпусу электроприемника и к токоведущим частям.

ГЛАВА 1. ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА.

Виды поражений электрическим током.

В общей массе травм на производстве с временной утратой трудоспособности вес электротравм незначителен - не более 2%. Однако среди травм с летальным исходом электротравмы занимают ведущее место - более 12%, то есть каждая седьмая смертельная травма вызвана электрическим током.

Основные причины массовости смертельного электротравматизма можно сформулировать следующим образом:

- физиологическая несовместимость электрического тока и биологических процессов в организме;
- отсутствие внешних признаков опасности оголенных токоведущих частей или металлических конструкций, случайно оказавшихся под напряжением (отсутствуют дым, свечение и другие устрашающие признаки);
- непонимание большинством работающих конкретной опасности контакта с токоведущими частями.

Проходя через организм человека, электрический ток производит:

- термическое действие;
- электролитическое действие;
- механическое действие;
- биологическое действие.

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 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 биологических процессов.

Два вида электрических травм.

Указанное многообразие действий электрического тока на организм приводит к различным электротравмам, которые можно свести к двум видам:

- местные электротравмы, когда возникает местное повреждение организма;
- общие электротравмы (электрические удары), когда поражается весь организм.

Примерное распределение несчастных случаев от электрического тока:

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

Эти травмы часто сопутствуют друг другу, но они различны и должны рассматриваться отдельно.

Местные электротравмы.

Местная электротравма – ярко выраженное местное нарушение целостности тканей тела. Чаще это поверхностные повреждения (кожа, иногда связок и костей).

Опасность местных травм зависит от места и степени повреждения тканей. Как правило, местные травмы излечиваются, работоспособность восстанавливается.

Характерные местные электротравмы – электрические ожоги, электрические знаки, металлизация кожи, механические повреждения и электроофтальмия. 75% случаев поражений электрическим током сопровождается местными электротравмами. Из них:

- электрические ожоги – 40%;
- электрические знаки – 7%;
- металлизация кожи – 3%;
- механические повреждения – 0,5%;
- электроофтальмия – 1,5%;
- смешанные травмы – 23%.

Электрический ожог.

Электрический ожог это самая распространенная электротравма. В зависимости от условий возникновения различают два основных вида ожога:

- токовый (контактный), возникающий при прохождении тока непосредственно через тело человека в результате его контакта с токоведущей частью;
- дуговой, обусловленный воздействием на тело электрической дуги.

Токовый ожог возникает в электроустановках напряжением не выше 2 кВ. При более высоких напряжениях образуется электрическая дуга. Ожог тем опаснее, чем больше ток и время его прохождения. Сопротивление кожи больше чем сопротивление внутренних тканей, поэтому она и сгорает. (При токах высоких частот могут возникнуть ожоги внутренних тканей).

Дуговой ожог наблюдается в электроустановках различных напряжений. При этом в установках до 6 кВ ожоги являются следствием случайных КЗ. 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.

Электрические знаки.

Электрические знаки представляют собой резко очерченные пятна серого или бледно-желтого цвета на поверхности тела человека, подвергшегося действию тока. Размер пятен 1-5 мм. Обычные электрические знаки безболезненны, лечатся легко.

Металлизация кожи.

Металлизация кожи – проникновение в верхние слои кожи мельчайших частиц металла, расплавившегося под действием электрической дуги, возникающей при КЗ. Мельчайшие брызги расплавленного металла под влиянием возникших динамических сил и теплового потока разлетаются во все стороны с большой скоростью.

Поражение глаз наиболее опасно. Поэтому работы, при которых возможно возникновение электрической дуги должны выполняться в защитных очках, одежда должна быть застегнута, ворот закрыт, рукава опущены.

Механические повреждения.

Чаще всего это следствие резких непроизвольных судорожных сокращений мышц под действием электрического тока. В результате могут произойти разрывы сухожилий, кожи, кровеносных сосудов и нервной ткани; могут быть вывих суставов и даже переломы костей.

Механические повреждения происходят при работе в основном в электроустановках до 1000 В при относительно длительном воздействии тока.

Электроофтальмия.

Электроофтальмия – воспаление наружных оболочек глаз – роговицы и конъюнктивы (слизистой оболочки, покрывающей глазное яблоко), возникающие в результате воздействия мощного потока ультрафиолетовых лучей. Такое облучение возможно при наличии электрической дуги, которая является источником излучения ультрафиолетовых и инфракрасных лучей.

Предупреждение электроофтальмии обеспечивается применением защитных очков.

Электрический удар.

Электрический удар – это возбуждение живых тканей организма протекающим через него током, проявляющееся в непроизвольных судорожных сокращениях различных мышц тела. При этом нарушается работа всех органов – сердца, легких, центральной нервной системы.

Электрический удар можно разделить на пять степеней:

1. судорожное, едва ощутимое сокращение мышц;
2. судорожное сокращение мышц, сопровождающееся сильными болями, без потери сознания;
3. судорожное сокращение мышц с потерей сознания, но сохранившимися дыханием и работой сердца;
4. потеря сознания и нарушение сердечной деятельности или дыхания (и то и другое);
5. клиническая смерть.

Исход воздействия тока зависит от следующих факторов:

- значение и длительность протекания тока;
- род и частота тока;
- пути прохождения;
- индивидуальные свойства.

Фибрилляция.

Фибрилляция – хаотические одновременные сокращения волокон сердечной мышцы (фибрилл) при которых сердце не в состоянии гнать кровь по сосудам. 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 фибрилляции сердца у человека, как правило, не вызывают.

Электрический шок.

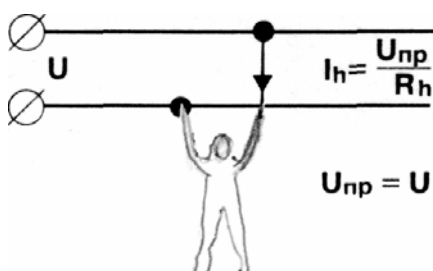
Электрический шок это своеобразная тяжелая нервно-рефлекторная реакция организма в ответ на чрезмерное раздражение электрическим током, сопровождающаяся глубокими расстройствами кровообращения, дыхания, обмена веществ и т. п.

Возможные схемы включения человека в цепь тока

Каждый случай поражения электрическим током имеет свои индивидуальные особенности. Однако с теоретической точки зрения (анализа физической природы источников электроэнергии и количественной оценки параметров контура тока) все множество причин протекания через тело человека тока подразделяется на следующие типовые схемы:

1. двухполюсное прикосновение;
2. однополюсное прикосновение;
3. остаточный заряд;
4. наведенный заряд;
5. заряд статического электричества;
6. напряжение шага;
7. электрический пробой воздушного промежутка.

Двухполюсное (двухфазное) прикосновение



В этом режиме человек двумя точками тела касается разнополярных токоведущих частей.

Рисунок 1.1 Схема включения человека в цепь

Условия формирования цепи

Случаи двухполюсного прикосновения происходят относительно редко - как правило, они являются следствием грубого нарушения правил техники безопасности. Обычно они возникают в электроустановках напряжением ниже 1000 В в процессе работы под напряжением с применением неисправных защитных средств, а также в результате небрежности при эксплуатации электрооборудования с неогражденными голыми токоведущими частями (открытые рубильники, незащищенные клеммные платы, экспериментальные работы и т.п.).

Возможные последствия двухполюсного прикосновения.

Здесь напряжение прикосновения равно рабочему, и поэтому в сетях переменного тока напряжением выше 100 В ток через тело человека превышает значения порогового неотпуска (16 мА) и фибрилляционного (100 мА). Поэтому обычно такой контакт с токоведущими частями завершается летальным исходом (если пострадавшему своевременно не оказана помощь).

Состав защитных мероприятий.

В этом режиме сопротивление тела человека включается параллельно сопротивлению нагрузки сети. Поэтому выявить факт наличия человека в цепи автоматическими средствами защиты невозможно. Вот почему необходимо выполнять в полном объеме организационные защитные мероприятия и использовать защитные средства, предусмотренные Правилами безопасности при работе без снятия напряжения вблизи и на токоведущих частях, находящихся под напряжением.

Пример: Электрик, стоя на площадке мачтовой трансформаторной подстанции, производил ремонт проводов линии, не находящейся под напряжением. Заодно решил проверить прочность крепления на изоляторах проводов, оставшихся под напряжением. Не имея ногтей, предохранительного пояса и диэлектрических перчаток, встал на металлическую перекладину опоры ЛЭП, потерял равновесие и ухватился правой рукой за изолятор нулевого провода, а левой - фазного.

Однополюсное (однофазное) прикосновение

Схема включения человека в цепь.

В режиме однофазного прикосновения человек касается токоведущей части только одной точкой тела.

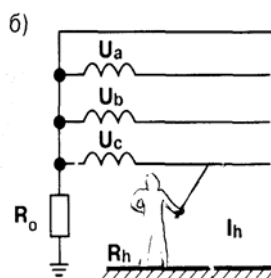
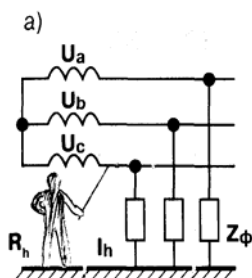


Рисунок 1.2

Однофазное прикосновение
человека к токоведущей части

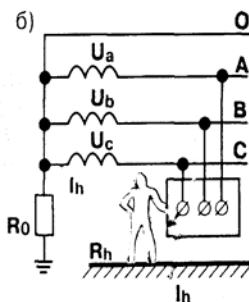
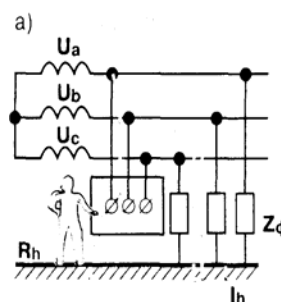


Рисунок 1.3

Однофазное прикосновение
человека к корпусу

Условия формирования цепи.

На рисунке 1.2 показано непосредственное прикосновение человека к токоведущей части, когда он тем или иным образом нарушает правила техники безопасности.

Однако режим однофазного прикосновения чаще возникает в условиях, когда человек этих правил не нарушает, прикасаясь не к токоведущей части, а лишь к корпусу электротехнического изделия (рисунок 1.3).

Если в изделии имеется неисправность типа замыкания фазы на корпус, параметры контура тока I_h , будут идентичными указанным на предыдущей схеме. Именно в этом режиме происходит наибольшая часть травм от электрического тока.

Возможные последствия однофазного прикосновения.

Здесь контур тока I_h замыкается либо через сопротивления утечки Z_ϕ (в сетях, изолированных от земли), либо через сопротивление заземления нейтрали источника электроэнергии R_0 .

В общем виде режим однофазного прикосновения менее опасен, чем режим двухфазного прикосновения, так как здесь значение напряжения прикосновения ограничивается сопротивлением утечки. Тем не менее в сетях с заземленной нейтралью, а также в сетях с изолированной нейтра-

лью, но имеющих большую емкость, опасность этого режима адекватна опасности режима двухфазного прикосновения.

Состав технических средств защиты.

В зависимости от вида электроустановки, условий эксплуатации и назначения электроприемников применяют защитное заземление, зануление, защитное отключение, защитное шунтирование, защитное разделение сетей и контроль изоляции.

Остаточный заряд

Схема включения человека в цепь

Под остаточным понимается заряд на конденсаторе, сохраняющийся некоторое время после отключения источника питания. Схема включения человека в электрическую цепь формируется при прикосновении его к одной из обмоток конденсатора.

Условия формирования цепи

Всякая сеть или устройство обладают емкостью относительно земли (корпуса) и между полюсами (фазами).

Если сопротивление изоляции велико, то после снятия рабочего напряжения либо после измерений мегомметром потенциал на токоведущих частях, обусловленный остаточным зарядом емкости, может сохраняться длительное время. В случае прикосновения человека к токоведущей части при этом возникает переходный процесс разряда емкостей через его тело.

Процессы, аналогичные указанным, происходят также при работе в цепях с индуктивностями. Так, согласно Правилам эксплуатации электроустановок, необходимо ежегодно отключать силовые трансформаторы и контролировать омическое сопротивление их обмоток.

В переносных омметрах обычно применяют источники постоянного напряжения 4-6 В. При отключении омметра, например, от обмотки низкого напряжения в процессе разряда ее индуктивности импульс тока трансформируется в обмотку высокого напряжения. Если в этот момент человек касается полюса последней, то вторичная травма неизбежна.

Возможные последствия действия остаточного заряда

Рассмотрим эту схему травмирования током на примере однофазной сети.

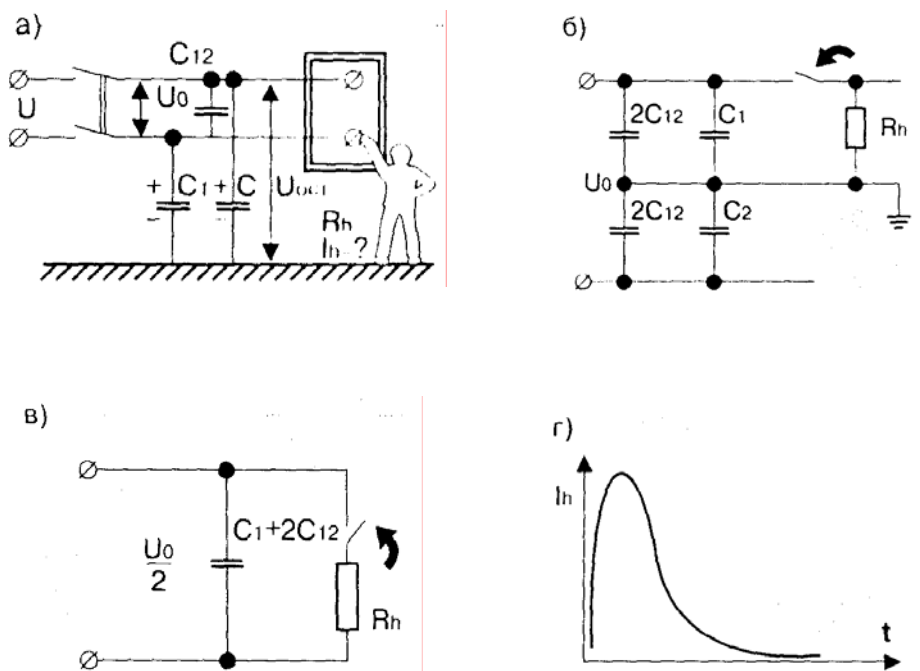


Рисунок 1.4. Схема травмирования током при действии остаточного заряда.

Обозначения на схеме: R_h - сопротивление тела человека, R_1 и R_2 , C_1 и C_2 - эквивалентные сопротивления изоляции и емкости полюсов относительно земли, C_{12} - эквивалентная емкость между полюсами (в том числе конденсаторов фильтров выпрямителей), U_0 - остаточное напряжение.

Принимаем $(R_1, R_2) \gg R_h$, что правомерно, так как при низких значениях сопротивления изоляции остаточный заряд быстро исчезает и сеть, с точки зрения возможности поражения человека током, становится безопасной.

Упрощаем расчетную схему путем деления емкости C_{12} на две последовательно включенные емкости значением $2 C_{12}$ каждая (рис.б). Окончательная расчетная схема (рис.в) позволяет определить ток разряда емкости $C_1 + 2 C_{12}$ через сопротивление R_h при начальном напряжении $U_0/2$ по известной формуле:

$$I_h = U_0 \cdot \exp(-t / R_h \cdot (C_1 + 2 \cdot C_{12})) / 2 \cdot R_h$$

Таким образом, максимальное значение тока I_h определяется величиной остаточного напряжения U_0 и сопротивлением тела человека, а

длительность переходного процесса зависит от величины емкостей относительно земли и между полюсами сети.

Обычный результат действия остаточного заряда - вторичные травмы.

Защитные мероприятия

Из формулы для I_h следует одно из основных правил техники безопасности: **после снятия рабочего напряжения не берись за токоведущие части, предварительно не разрядив емкости.**

Для разряда емкостей следует присоединить провод разрядника (щупа) к заземленной конструкции (детали) и затем коснуться щупом токоведущей части. Изменять указанную последовательность операций нельзя, так как в этом случае ток разряда пройдет через тело человека.

Наведенный заряд

Схема включения человека в цепь

В этом режиме человек прикасается к металлическому нетокковедущему предмету (конструкции), находящемуся в зоне внешнего электромагнитного поля.

Условия формирования цепи

Условия формирования наведенных зарядов разнообразны. Наведенные заряды формируются на объемных металлических предметах, находящихся в зоне действия электромагнитных полей. Под действием внешнего поля на поверхности проводящего предмета устанавливается такое распределение зарядов, при котором суммарное поле внутри проводника равно нулю. Время релаксации электрических зарядов в металлах – $10^{-18} - 10^{-16}$ с, поэтому равновесное распределение зарядов на металлических телах практически безынерционно воспроизводит изменения внешнего поля. Вектор индукции внешнего поля связывает заряд определенного знака. Равный по величине заряд противоположного знака становится свободным и обуславливает возникновение отличного от нуля потенциала в целом незаряженного тела. При исчезновении внешнего поля индуцированные заряды взаимно компенсируются.

В линейных металлических предметах, находящихся в зоне высокочастотного электромагнитного поля, по закону электромагнитной индукции возникает электродвижущая сила, значение которой может достигать 1000 В. Наведенный заряд формируется также под влиянием паразитных емкостных связей.

Возможные последствия воздействия наведенного заряда

Формы проявления наведенных зарядов достаточно разнообразны. Опасные последствия – вторичные травмы, ожог искровым (дуговым) разрядом, пожар при воспламенении топлива.

Пример1: Строительный кран находится вблизи передающей антенны мощной радиостанции. Гак крана, трос и поверхность земли (рельс) образуют виток, находящийся в высокочастотном электромагнитном поле.

В зависимости от частоты трансляции и угла между плоскостью этого витка и направлением на антенну потенциал гака относительно земли (в месте разрыва витка) изменился в диапазоне 10-1200 В. Результат - вторичные травмы током при прикосновении к тросу, крепящему груз (или к гаку), искрение при касании гаком заземленных металлических предметов.

Пример2: При монтаже электроустановок в электрических кабелях предусматриваются запасные жилы. Когда емкости рабочих жил (фаз) относительно земли не равны между собой, на отключенных запасных жилах возникает наведенный заряд, потенциал которого относительно земли может достигать 150 В при напряжении 380 В в основной сети.

Заряд статического электричества

Схема включения человека в цепь

В этом режиме человек прикасается к металлическому предмету, изолированному от земли, или к конструкции из изоляционного материала, несущим заряд статического электричества. Возможен также режим прикосновения к заземленной металлической конструкции, когда человек находится на полу из изоляционного материала и сам несет заряд статического электричества.

Условия формирования цепи

Заряды статического электричества образуются при перемещении (трении) твердых, жидких или газообразных диэлектриков относительно других проводящих или непроводящих ток материалов.

Возможные последствия действия статического электричества

Возможность формирования зарядов статического электричества существенно увеличилась с массовым применением пластических материалов (трубопроводы, покрытие полов и пр.), обладающих высоким сопротивлением.

Заряды статического электричества генерируют высокие потенциалы. Так, при перекачке топлива, например, при заливке бензина в бак автомобиля, заряд $Q_{ст}$ получает латунный наконечник резинового шланга. Потенциал его относительно земли (или бака) будет $U_{ст} = Q_{ст}/C = 1,5 - 14$ кВ зависимости от скорости прокачки (здесь C - емкость наконечника относительно земли или бака – величина бесконечно малая). При прикосновении человека к такому заряженному предмету возможны вторичные травмы или ожог искрой.

Тело человека относительно земли имеет емкость около 200 пФ. Если он находится на изолирующем полу (линолеум), то в результате трения одежды о кожу на нем может накопиться заряд с энергией до 0,43 мДж. Отсюда из известного выражения для энергии заряженного конденсатора получаем, что значение потенциала тела относительно земли превышает 500 В; в случае прикосновения к заземленному металлическому предмету (батарея отопления, шкафчик с рабочей одеждой и пр.) человек почувствует удар током (ток разряда собственной емкости).

Такие заряды наибольшую опасность представляют для элементов микросхемотехники при монтаже печатных плат. Обычно во избежание выхода их из строя жало паяльника заземляют либо на руку монтажницы надевают заземленный браслет; наиболее эффективная мера - обязательная замена одежды на хлопчатобумажную, исключающую возможность генерирования электростатического заряда.

Основные виды разрядов статического электричества:

а) разряды между проводящими телами - формируются в результате электризации и накопления заряда на изолированных проводящих телах (человек, металлическая тара для жидкостей и сыпучих материалов, транспортные средства на резиновых шинах, гребные валы на судах и пр.);

б) разряды с заряженного диэлектрика на проводящие конструкции (резиновые либо пластмассовые резервуары; бочки и канистры для хранения и транспортировки нефтепродуктов и сыпучих материалов; диэлектрические трубы, по которым перемещаются эти материалы, и т.п.);

в) коронирование диэлектриков – разряд, обусловленный разностью потенциалов между внутренней и наружной поверхностями конструкции

(трубы для транспортировки жидких и сыпучих материалов, пневмотранспортные трубопроводы);

г) разряды в следе скольжения – возникают в процессе электризации твердых поверхностей путем трения.

Защитные мероприятия

Защита обеспечивается путем формирования цепей для снятия зарядов статического электричества (заземление металлоконструкций, снижение омического сопротивления изоляционных материалов путем введения в них проводящих примесей, периодического обливания изоляционных конструкций проводящими жидкостями и т.п.).

Напряжение шага

Схема включения человека в цепь

Действию напряжения шага человек подвергается в зоне растекания тока, то есть на поверхности земли вблизи места замыкания на землю.

Условия формирования цепи

В зоне растекания тока, в соответствии с выражением $\varphi(x) = k/x$, различны потенциалы всех точек на поверхности земли.

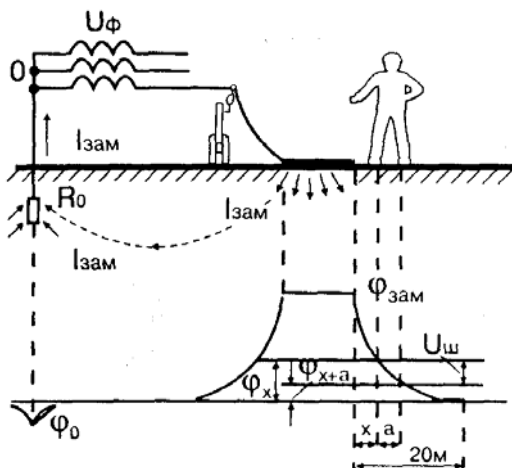


Рисунок 1.5. Напряжение шага человека (растекание тока).

Напряжением шага называется разность потенциалов двух точек поверхности земли, на которых находится человек, при этом в расчетах ширина шага принимается равной $a = 0,8$ м.

Возможные последствия действия напряжения шага

Напряжение шага зависит от двух основных факторов - максимального потенциала в зоне растекания тока $\varphi_{\text{зам}}$ и удаления человека от места замыкания (x).

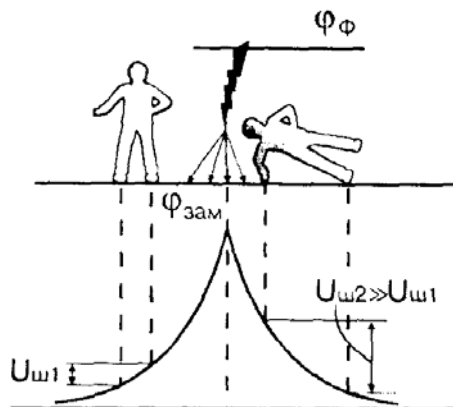


Рисунок 1.6. Напряжение шага человека (зависимость от основных факторов).

В наиболее удаленных точках зоны растекания тока напряжение шага невелико, а ток через тело человека $I_h = U_{\text{ш}}/R_h$ протекает по пути «нога-нога». По мере возрастания напряжения $U_{\text{ш}}$ при приближении человека к месту замыкания ток возрастает и может в итоге достичь значения порогового неотпускающего тока; в результате судорожной реакции человек падает, при этом размер «шага» увеличиваясь (расстояние стало «руки-ноги») с соответствующим возрастанием значения $U_{\text{ш}}$, а в путь тока включается область сердца. Так без видимых внешних причин может наступить летальный исход.

Электрический пробой воздушного промежутка

Схема включения человека в цепь

Эта схема поражения током характерна для высоковольтных цепей.

В равномерном электрическом поле (например, между обкладками плоского конденсатора) электрическая прочность воздушного промежутка равна 3-4 кВ/мм в зависимости от влажности воздуха, то есть электрический пробой воздушного промежутка размером 1 мм происходит при напряжении 3-4 кВ между обкладками конденсатора.

Когда человек той или иной частью тела приближается к высоковольтной токоведущей части, в воздушном зазоре также формируется эле-

ктрическое поле, но это поле неравномерное, типа игла-плоскость либо игла-линия. Электрическая прочность воздушного промежутка в неравномерном поле существенно ниже, она может уменьшаться до значения 4 кВ/см.

Условия формирования цепи

Пусть человек проник в трансформаторную будку 6/0,38 кВ и приблизил палец к токоведущей части, находящейся под потенциалом 6 кВ.

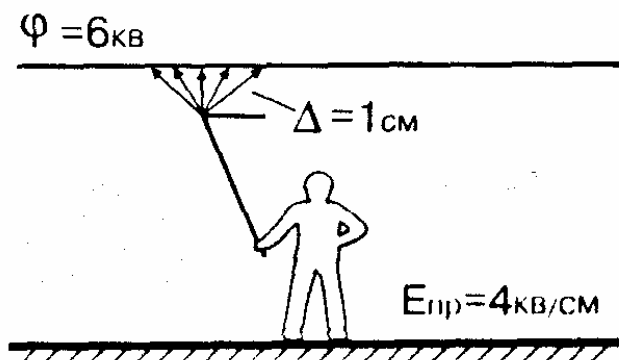


Рисунок 1.7. Электрический пробой воздушного промежутка.

Потенциал тела человека равен потенциалу земли (ноль), поэтому разность потенциалов в воздушном зазоре «палец - токоведущая часть» составляет 6 кВ. При таком напряжении происходит электрический пробой воздушного промежутка и формируется дуговой разряд. При неблагоприятных условиях, когда цепь тока не прерывается, термическую травму завершает биологическое поражение током.

Возможные последствия электрического пробоя воздушного промежутка

При дуговом разряде (ожоге дугой) разрушаются кожные покровы, мышечная и костная ткани.

Защитные мероприятия

Защита людей от опасности рассматриваемого режима достигается путем обеспечения недоступности токоведущих частей оборудования.

Электрическое сопротивление тела человека.

Тело человека является проводником электрического тока. Однако проводимость живой ткани в отличие от обычных проводников обусловлена не только её физическими свойствами, но и сложнейшими биохимиче-

скими и биофизическими процессами, присущими лишь живой материи. Сопротивление тела человека является переменной величиной, нелинейно зависящей от множества факторов (состояние кожи, параметров электрической цепи, физиологического состояния и состояния окружающей среды).

Большинство тканей тела человека содержит большое количество воды (до 65% массы). Поэтому живую ткань можно рассматривать как электролит т.е. раствор, разлагающийся химически при прохождении по нему тока.

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

Характер воздействия на человека токов разного значения.

Ощутимый ток. Электрический ток, вызывающий при прохождении через организм ощутимые раздражения называется ощутимым. 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 пощипыванием, а при постоянном токе – ощущением нагрева кожи на участке, касающемся токоведущей части.

Неотпускающий ток. Электрический ток, вызывающий при прохождении через человека непреодолимые судорожные сокращения мышц руки в которой зажат проводник называется неотпускающим. При постоянном токе неотпускающих токов нет, но в момент отрыва ощущается боль. Ток, при котором человек может самостоятельно оторвать руки от электродов (когда можно выдержать боль) принят за порог неотпускающих токов и составляет примерно 50-80 мА.

Фибрилляционный ток. Электрический ток, вызывающий при прохождении через организм фибрилляцию сердца, называется фибрилляционным, 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.

Влияние пути тока на исход поражения.

Путь прохождения тока в теле человека играет существенную роль в исходе поражения. Опасность поражения весьма велика, если на пути тока оказываются жизненно важные органы – сердце, легкие, головной мозг.

В практике обычно встречается 15 путей тока (петель) в теле человека. Наиболее распространено 6 петель:

- рука-рука;
- правая рука – ноги;
- левая рука – ноги;
- нога – нога;
- голова – ноги;
- голова – руки.

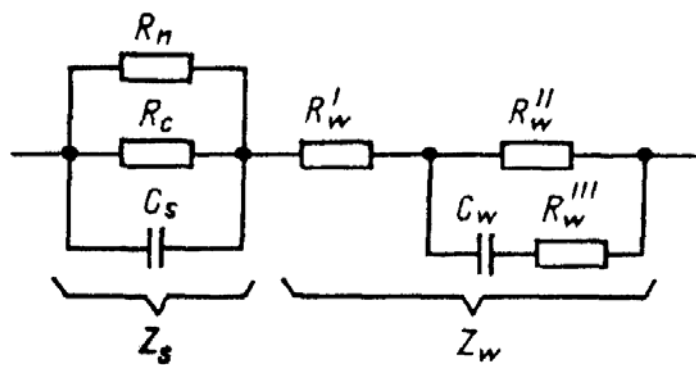


Рисунок 1.8. Схема замещения полного сопротивления тела человека.

Вероятностная модель полного сопротивления тела человека

Электрическое сопротивление тела человека влияет на эффективность действия электрозащиты, так как определяет значение тока, протекающего через него и обуславливающего вероятность возникновения электропоражения. Значение полного сопротивления тела человека имеет случайный характер и зависит от ряда факторов: напряжения прикосновения, рода, частоты, длительности протекания тока, температуры окружающей среды, площади соприкосновения электродов с телом, состояния кожи в месте приложения электродов, путей протекания тока. Однако в предлагаемых многими авторами, а также Международной электротехнической комиссией схемах замещения полного сопротивления эти факторы не учитываются, и до сих пор обычно применяются детерминистические модели этого сопротивления.

Схема замещения (рисунок 1.8) разработана на базе всестороннего анализа результатов исследований многих специалистов, в частности В.И.

Щуцкого, Г. Бигельмейера, З. Терссяка, Г. Фрейбергера, А.П. Киселева, Н.П. Коренева, А.М. Цыбизова, В.К. Бузовкина, П. Осипки и Р. Гудерского. В схеме замещения выделены полные сопротивления кожи Z_s и внутреннего участка тела Z_w человека.

На значение полного сопротивления тела человека в основном влияет сопротивление его кожи R_s , состоящей из разных слоев, главными из которых являются эпидермис и дерма. Удельное сопротивление рогового слоя эпидермиса (толщиной от 0,03 до 0,06 мм) составляет $10^4 - 10^6$ Ом. Эпидермис пронизан потовыми железами, характеризующимися хорошей электропроводностью. При напряжении выше напряжения прикосновения наблюдается изменение электрического сопротивления кожи. По мнению многих электрофизиологов, это происходит из-за выделения пота и увлажнения эпидермиса в результате раздражающего воздействия электрического тока на потовые железы.

Сопротивление кожи R_s представляет собой нелинейный элемент. Установлено, что его значение параметрически зависит от длительности воздействия тока и напряжения. Снижение значения этого сопротивления происходит в начальный период электропоражения и длится не более 0,5 с. Уровень, до которого снижается значение R_s , при длительном электропоражении, зависит от действующего значения напряжения прикосновения.

В схему замещения включены две составляющие сопротивления кожи: линейная R_c и нелинейная R_n . Значение сопротивления R_c зависит от температуры окружающей среды, степени влажности кожи и эквивалентной площади прикосновения электродов к телу человека, которая определяется из формулы

$$S = \frac{S_1 S_2}{S_1 + S_2} \quad (1.1)$$

где S_1, S_2 - площади прикосновения электродов к телу человека.

Значение сопротивления R_n зависит от напряжения прикосновения [2].

Емкость кожи C_s обусловлена роговым слоем эпидермиса толщиной около 0,01 мм, электрическая прочность которого находится в пределах 500 — 2000 В/мм. Значение емкости C_s прямо пропорционально зависит от эквивалентной площади прикосновения электродов к телу человека.

Схема замещения полного сопротивления внутреннего участка тела человека Z_w состоит из соответственно соединенных сопротивлений R'_w , R''_w , R'''_w и емкости C_w , включающей элементарные емкости внутренних органов, вплоть до клеточного уровня. Сопротивления внутреннего участка R'_w и R''_w зависят от пути протекания тока через тело человека.

Аналитическое описание модели полного сопротивления тела человека. Для описания вероятностной модели полного сопротивления ис-

пользовано логарифмическое нормальное распределение, которое достаточно хорошо описывает случайные значения параметров схемы замещения, а также активное, реактивное и полное сопротивления чела человека. Установлено, что можно достаточно точно отобразить влияние указанных факторов на случайное значение полного сопротивления, соответственно модифицируя медиальные значения параметров схемы. В табл. 1 и 2 приведены обобщенные (на основе результатов исследований многих специалистов) медиальные значения параметров и стандартные отклонения логарифмическою нормального распределения параметров полного сопротивления соответственно кожи (мужчины, $S_0 = 40 \text{ см}^2$, $T = 20 \text{ °C}$) и внутреннего участка тела в предлагаемой схеме замещения (см. рис. 1). Учтено влияние на эти медиальные значения таких факторов, как состояние кожи (см. табл. 1) и путь протекания тока через тело человека (см. табл. 2).

Таблица 1.1

Состояние кожи	Медиальные значения параметров		
	$R_{cm}(S_0)$, кОм	$r_n(S_0)$, кОм·В	$C_{sm}(S_0)$, мкФ
Сухая	4,70	190	0,52
Влажная	2,70	190	0,52
Мокрая (NaCl)	0,80	190	0,52
Стандартные отклонения: $\sigma_{ln Rc} = 0,45$; $\sigma_{ln Cs} = 0,45$			

Таблица 2.1

Параметры логарифмического нормального распределения	Путь протекания тока через тело человека	Медиальные значения параметров				
		R'_{wm} , кОм	R''_{wm} , кОм	R_{wm} , кОм	R'''_{wm} , кОм	C_w , нФ
Медианы	р – р,	0,40	0,40	0,80	0,13	4,30
	р – н,	0,30	0,30	0,60	0,13	4,30
	н – н рр – н рр – нн	0,20	0,20	0,40	0,13	4,30
Стандартные отклонения		0,10	0,10	0,10	0,10	0

Примечание: Буквы “р” и “н” обозначают соответственно рука и нога.

Влияние остальных факторов на медиальные значения параметров разработанной схемы замещения учитывается путем аппроксимации следующих зависимостей этих параметров:

- от площади электродов

$$\begin{aligned} R_{Cm}(S) &= R_{Cm}(S_0) \frac{S_0}{S} \\ C_{Cm}(S) &= C_{Cm}(S_0) \frac{S_0}{S} \end{aligned} \quad (1.2)$$

где $R_{Cm}(S)$ и $C_{Cm}(S)$ – медиальные значения линейной составляющей сопротивления R_c и емкости C_s кожи; S и S_0 – эквивалентные площади прикосновения электродов, определяемые по формуле (1), и тела человека; базовое значение $S_0 = 40 \text{ см}^2$;

б) от температуры окружающей среды

$$R_{Cm}(S, T) = R_{Cmm}(S) + [R_{Cam}(S) - R_{Cmm}(S)] \exp\left(\frac{20 - T}{T_0}\right) \quad (1.3)$$

где $R_{Cmm}(S)$ и $R_{Cam}(S)$ – медиальные значения линейной составляющей сопротивления кожи R_c для мокрого и реального (мокрого, влажного или сухого) состояния кожи при данной площади прикосновения электродов и температуре окружающей среды 20°C ; T и T_0 – температура окружающей среды и базовая температура (принята равной 12°C);

в) от напряжения прикосновения

$$R_{Sm}(S, T, U) = \frac{r_n(S) R_{Cm}(S, T)}{r_n(S) + U R_{Cm}(S, T)} \quad (1.4)$$

где коэффициент $r_n(S)$, определяющий зависимость значения нелинейной составляющей сопротивления кожи R_n от напряжения прикосновения U , вычисляется по формуле

$$r_n(S) = r_n(S_0) \left\{ 1 + \left(\frac{S_0}{S} - 1 \right) \exp\left[- \left(\frac{U}{100} \right)^2 \right] \right\} \quad (1.5)$$

$R_{Sm}(S, T, U)$ – медиальные значения сопротивления кожи при условиях длительного электропоражения, фиксированных площади электродов, температуре окружающей среды и напряжении прикосновения; $r_n(S_0)$ – постоянный коэффициент (см. табл. 1);

г) от длительности воздействия тока

$$R_{Sm}(S, T, U, t) = R_{Sm}(S, T, U) + [R_{Cm}(S, T) - R_{Sm}(S, T, U)] \exp\{-[R_{Cm}(S, T) - R_{Sm}(S, T, U)] k_t t\} \quad (1.6)$$

где $k_t = 30 \text{ кОм}^{-1}$ – постоянный коэффициент; t – длительность воздействия тока, с.

На основе медиан параметров схемы замещения (см. рис. 1.8) достаточно точно вычисляются медиальные значения всех составляющих, а также значения модуля и аргумента полного сопротивления благодаря малым значениям коэффициентов изменчивости рассматриваемых случайных величин.

Медиальное значение модуля полного сопротивления тела человека для напряжения прикосновения при частоте ниже 10 кГц достаточно точно вычисляется по упрощенной формуле

$$Z_m(S, T, U, \omega, t) = \sqrt{R_{wm}^2 + \frac{2R_{wm}R_{sm}(S, T, U, t) + R_{sm}^2(S, T, U, t)}{1 + R_{sm}^2(S, T, U, t)\omega^2 C_{sm}^2(S)}} \quad (1.7)$$

где $R_{wm} = R'_{wm} + R''_{wm}$ – медиальное значение активной составляющей полного сопротивления внутреннего участка тела человека при частоте ниже 10 кГц (см. табл. 2).

Стандартные отклонения логарифмического нормального распределения числовых значений составляющих и полного сопротивления тела человека определяются по формулам:

для активной $R_{zs}(S, T, U, \omega, t)$ и реактивной $X_{zv}(S, T, U, \omega, t)$ составляющих, а также полного сопротивления кожи $Z_z(S, T, U, \omega, t)$

$$\sigma_{\ln R_{zs}} = \sigma_{\ln X_{zs}} = \sigma_{\ln Z_z} \quad (1.8)$$

для активной $R_w(\omega)$ и реактивной $X_w(\omega)$ составляющих и полного сопротивления внутреннего участка тела человека $Z_w(\omega)$

$$\sigma_{\ln R_w} = \sigma_{\ln X_w} = \sigma_{\ln Z_w} \quad (1.9)$$

для активной составляющей полного сопротивления тела $R_z(S, T, U, \omega, t)$

$$\sigma_{\ln R_z} = \sqrt{\frac{[R_{zsm}(S, T, \omega, t)\sigma_{\ln R_{zs}}]^2 + [R_{zwm}(S, T, \omega, t)\sigma_{\ln R_w}]^2}{[R_{zm}(S, T, U, \omega, t)]^2}} \quad (1.10)$$

для реактивной составляющей полного сопротивления тела $X_z(S, T, U, \omega, t)$

$$\sigma_{\ln X_z} = \sqrt{\frac{[X_{zsm}(S, T, \omega, t)\sigma_{\ln R_{zs}}]^2 + [X_{zwm}(S, T, \omega, t)\sigma_{\ln R_w}]^2}{[X_{zm}(S, T, U, \omega, t)]^2}} \quad (1.11)$$

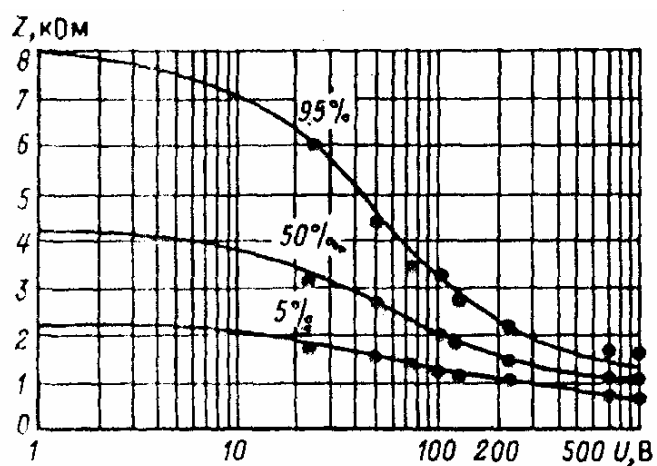
для полного сопротивления тела $Z_z(S, T, U, \omega, t)$

$$\sigma_{\ln Z_z} = \sqrt{\frac{[R_{zsm}(S, T, \omega, t)\sigma_{\ln R_{zs}}]^2 + [X_{zwm}(S, T, \omega, t)\sigma_{\ln X_z}]^2}{[Z_{zm}(S, T, U, \omega, t)]^2}} \quad (1.12)$$

Разработаны методы вычисления параметров логарифмического нормального распределения, которые основаны на возможности приблизительно описания рассматриваемых случайных величин логарифмическим нормальным или нормальным распределением.

Сравнение рассмотренных численных характеристик вероятностной модели полного сопротивления тела человека с результатами, полученными многими исследователями, подтверждает корректность предложенной схемы замещения и разработанной модели. На рисунке 1.9 показаны результаты аналитического моделирования (сплошные линии) и эксперимен-

тальных исследований Г. Бигсльмейера (точки), касающиеся квантилей



полного сопротивления тела человека.

Рисунок 1.9. Зависимости квантилей полного сопротивления тела человека Z от напряжения прикосновения U при различных уровнях доверительной вероятности ($p - p$ или $p - n$, 50/60 Гц, сухая кожа, $S_1 = S_2 = 80 \text{ см}^2$)

ГЛАВА 2. ПЕРВАЯ ПОМОЩЬ

Первая помощь пострадавшим от электрического тока.

Первая помощь состоит из двух этапов: освобождения пострадавшего от действия тока и оказания ему доврачебной медицинской помощи. Очень важно как можно быстрее освободить пострадавшего от действия тока и сразу же приступить к оказанию ему медицинской помощи так как исход поражения зависит от длительности прохождения тока через человека.

Освобождение человека от действия тока.

Часто оказывается, что пострадавший продолжает находиться в контакте с токоведущей частью и не может самостоятельно нарушить этот контакт, т. е. прервать проходящий через него ток. Причинами этого могут быть:

- непроизвольное судорожное сокращение мышц, которое пострадавший не может преодолеть;
- паралич конечностей и иных участков тела вследствие поражения нервной системы;
- тяжелая механическая травма;
- потеря сознания.

Выключение человека из цепи протекания тока можно осуществить разными способами, но первое действие для освобождения пострадавшего от тока - быстрое отключение той части электроустановки, которой он касается! Отключение электроустановки производится с помощью ближайшего рубильника, выключателя, а также путём снятия или вывёртывания предохранителей, разъёмов. Если пострадавший находится на высоте, то отключение напряжения может вызвать его падение. Надо принять меры, обеспечивающие его безопасность! Может одновременно погаснуть свет. В этом случае надо использовать другой источник света или аварийное освещение.

При невозможности быстрого отключения установки (из-за удалённости, недоступности выключателя) принимают иные меры освобождения от электрического тока:

- перерубить провода (сухая ручка у топора);
- вызвать автоматическое отключение электроустановки;
- отделить пострадавшего от токоведущих частей.

Многое зависит от находчивости. Но во всех случаях оказывающий помощь не должен сам попасть под напряжение.

При напряжении меньше 1000 В можно:

- рубить провода;
- перекусить их инструментом с изолированными рукоятками (если использовать обычный нож, надо надеть диэлектрические перчатки и галоши).

Перерубать провода надо каждый в отдельности; оттянуть пострадавшего от токоведущих частей, взявшись за его одежду. Нельзя касаться тела пострадавшего, сырой одежды и окружающих металлических предметов. Надо действовать одной рукой, другую в карман или за спину. Если касаться тела надо надеть диэлектрические перчатки или обмотать руки сухой тряпкой. Можно накинуть на пострадавшего сухо пиджак, коврик и др. Себя можно изолировать, встав на коврик, подставку, надев галоши. Можно отбросить провод сухой палкой.

Межотраслевая инструкция по оказанию первой помощи при несчастных случаях на производстве.

Инструкция разработана по техническому заданию Департамента условий и охраны труда Министерства труда и социального развития Российской Федерации.

Инструкция утверждена Департаментом научно-исследовательских и образовательных медицинских учреждений Министерства здравоохранения РФ и рекомендована для подготовки лиц, не имеющих медицинского образования, но обязанных уметь оказывать первую медицинскую помощь (письмо № 16-16/68 от 28.06.99).

Инструкция выдается работодателем подчиненным работникам под подпись.

Инструкция является именным личным нормативным документом для каждого работника и должна постоянно находиться у него.

Каждый работник, получивший настоящую инструкцию, обязан знать ее содержание и уметь применять при необходимости в любой обстановке. Знание инструкции и навыки ее применения ежегодно подтверждаются экзаменом.

Универсальная схема оказания первой помощи на месте происшествия

1. Если нет сознания и нет пульса на сонной артерии – ПРИСТУПИТЬ К РЕАНИМАЦИИ.

2. Если нет сознания, но есть пульс на сонной артерии – ПОВЕРНУТЬ НА ЖИВОТ И ОЧИСТИТЬ РОТОВУЮ ПОЛОСТЬ.
3. При артериальном кровотечении – НАЛОЖИТЬ ЖГУТ.
4. При наличии ран – НАЛОЖИТЬ ПОВЯЗКИ.
5. Если есть признаки переломов костей конечностей – НАЛОЖИТЬ ТРАНСПОРТНЫЕ ШИНЫ.

Внимание! Эта схема является универсальной для всех случаев оказания первой помощи на месте происшествия.

Какое бы несчастье не произошло – автодорожное происшествие, падение с высоты, поражение электрическим током или утопление – в любом случае оказание первой помощи следует начинать с восстановления сердечной деятельности дыхания, затем приступить к временной остановке кровотечения.

После этого можно приступить к наложению фиксирующих повязок и транспортных шин.

Именно такая схема действий поможет сохранить жизнь пострадавшего до прибытия медицинского персонала.

Внезапная смерть

Если нет сознания и нет пульса на сонной артерии

1. Убедиться в отсутствии пульса на сонной артерии.

Нельзя терять время на определение признаков дыхания.

2. Освободить грудную клетку от одежды и расстегнуть поясной ремень.

Нельзя наносить удар по груди и проводить непрямой массаж сердца, не освободив грудную клетку и не расстегнув поясной ремень.

3. Прикрыть двумя пальцами мечевидный отросток.

Нельзя наносить удар по мечевидному отростку или в область ключиц.

4. Нанести удар кулаком по груди. Проверить пульс. Если пульса нет – перейти к п.5.

Нельзя наносить удар при наличии пульса на сонной артерии.

5. Начать непрямой массаж сердца. Частота нажатия 50-80 ударов в минуту. Глубина продавливания грудной клетки должна быть не менее 3-4 см.

Нельзя располагать ладонь на груди так, чтобы большой палец был направлен на спасателя.

6. Сделать “вдох” искусственного дыхания. Зажать нос, захватить подбородок, запрокинуть голову пострадавшего и сделать максималь-

ный выдох ему в рот (желательно через марлю, салфетку или маску “рот в рот”).

Нельзя сделать “вдох” искусственного дыхания, не зажав предварительно нос пострадавшего.

7. Выполнять комплекс реанимации. При сужении зрачков, но отсутствии сердцебиения реанимацию нужно проводить до прибытия медперсонала.

Правила выполнения:

- Если оказывает помощь один спасатель, то 2 “вдоха” искусственного дыхания делают после 15 надавливаний на грудину.
- Если оказывает помощь группа спасателей, то 2 “вдоха” искусственного дыхания делают после 5 надавливаний на грудину.
- Для быстрого возврата крови к сердцу – приподнять ноги пострадавшего.
- Для сохранения жизни головного мозга – приложить холод к голове.
- Для удаления воздуха из желудка – повернуть пострадавшего на живот и надавить кулаками ниже пупка.

8. Организовать действия партнеров.

Первый спасатель проводит массаж сердца, отдает команду “Вдох!” и контролирует эффективность вдоха по подъему грудной клетки.

Второй спасатель проводит искусственное дыхание, контролирует реакцию зрачков, пульс на сонной артерии и информирует партнеров о состоянии пострадавшего: “Есть реакция зрачков! Нет пульса! Есть пульс!” и т.п.

Третий приподнимает ноги пострадавшего для лучшего притока крови к сердцу и готовится к смене партнера, выполняющего непрямой массаж сердца.

Нельзя располагать спасателей друг напротив друга.

Особенности реанимации в ограниченном пространстве

1. Нанести удар кулаком по грудине. Удар можно наносить в положении пострадавшего “сидя” и “лежа”.
2. Уложить пострадавшего на спину. Комплекс реанимации можно проводить только в положении пострадавшего “лежа на спине” на ровной жесткой поверхности.

Состояние комы

Если нет сознания, но есть пульс на сонной артерии

1. Повернуть пострадавшего на живот. Только в положении “лежа на животе” пострадавший должен ожидать прибытия врачей.
Нельзя оставлять человека в состоянии комы лежать на спине.
2. Удалить слизь и содержимое желудка. Периодически удалять из ротовой полости слизь и содержимое желудка с помощью салфетки или резинового баллончика.
3. Приложить холод к голове. Можно использовать пузырь со льдом или бутылки и пакеты с холодной водой или снегом, либо гипотермический пакет.

Артериальное кровотечение

При артериальном кровотечении

1. Прижать пальцами или кулаком артерию в указанных точках. До наложения жгута поврежденную конечность следует оставить в приподнятом положении. На конечностях точка прижатия артерии должна быть выше места кровотечения. На шее и голове – ниже раны или в ране.

Нельзя терять время на освобождение конечностей от одежды.

2. Наложить кровоостанавливающий жгут.
 - Завести жгут за конечность и растянуть с максимальным усилием.
 - Прижать первый виток жгута и убедиться в отсутствии пульса.
 - Наложить следующие витки жгута с меньшим усилием.
 - Обернуть петлю-застежку вокруг жгута.
 - Оттянуть петлю и завести под свободный конец жгута.
 - Вложить записку о времени наложения жгута под резинку петли.

Жгут на шею накладывают без контроля пульса и оставляют до прибытия врача. Для герметизации раны используют чистую салфетку или многослойную ткань (упаковку бинта).

В случаях посинения и отека конечности (при неправильном наложении жгута) следует немедленно заново наложить жгут.

Жгут на бедро накладывают через гладкий твердый предмет (бинт) с контролем пульса на подколенной ямке.

Ранение конечностей

Как накладывать повязки на раны

1. Накрыть рану любой чистой салфеткой, полностью прикрыв края раны.

Запрещается промывать рану водой.

2. Прибинтовать салфетку или прикрепить ее лейкопластырем.

Запрещается вливать в рану спиртовые или любые другие растворы.

Проникающие ранения груди

Как накладывать повязки на раны

1. Прижать ладонь к ране и закрыть в нее доступ воздуха.

Недопустимо извлекать из раны инородные предметы на месте происшествия.

2. Наложить герметичную повязку или лейкопластырь. Транспортировка только в положении “сидя”.

Проникающие ранения живота

Как накладывать повязки на раны

1. Прикрыть содержимое раны чистой салфеткой.

2. Прикрепить салфетку, полностью прикрывающую края раны, пластырем.

3. Приподнять ноги и расстегнуть поясной ремень. При возможности положить холод на живот. Ожидание помощи и транспортировка – только в положении “лежа на спине” с приподнятыми и согнутыми в коленях ногами.

Запрещается вправлять выпавшие органы; давать пить.

Термические ожоги

Правила обработки ожога без нарушения целостности ожоговых пузырей

Подставить под струю холодной воды на 10-15 минут и (или) приложить холод на 20-30 минут.

Нельзя смазывать обожженную поверхность маслами и жирами.

Правила обработки ожога с нарушением целостности ожоговых пузырей

1. Накрыть сухой чистой тканью.

2. Поверх сухой ткани приложить холод.

Запрещается бинтовать обожженную поверхность и промывать водой.

Травмы глаз

Раны глаз или век

1. Накрыть глаз чистой салфеткой (носовым платком). Все операции проводить в положении пострадавшего “лежа”.
2. Зафиксировать салфетку повязкой и обязательно прикрыть этой же повязкой второй глаз для прекращения движений глазных яблок.

Нельзя промывать водой колотые или резаные раны глаз и век.

Ожоги глаз или век в случаях попадания едких химических веществ

1. Раздвинуть осторожно веки пальцами и подставить под струю холодной воды.
2. Промыть глаз под струей воды так, чтобы она стекала от носа кнаружи.

Недопустимо применять нейтрализующую жидкость при попадании в глаза едких химических веществ (кислота – щелочь).

Переломы костей конечностей

Правила переноски пострадавшего методом “нидерландский мост”

Первый спасатель придерживает голову и плечи пострадавшего

Второй спасатель приподнимает таз, захватывает руки пострадавшего, контролирует действия всех спасателей и подает общую команду “Раз-два! Взяли!”

Третий спасатель захватывает стопы и голени пострадавшего.

Подобным образом можно перекладывать пострадавшего и в положении “лежа на животе”.

Общая задача – удержать тело и конечности пострадавшего в горизонтальной плоскости.

Переноска пострадавшего на носилках

Вверх по лестнице, в салон санитарного транспорта – головой вперед.

Вниз по лестнице, из салона санитарного транспорта – ногами вперед.

Идущие впереди внимательно смотрят и сообщают идущему сзади о всех препятствиях.

Идущий сзади следит за состоянием пострадавшего и при необходимости отдает команду “Стоп! Началась рвота!” или “Стоп! Потеря сознания!”

Первая помощь в случаях поражения электрическим током

Правила освобождения от действия электрического тока

При напряжении свыше 1000 В следует:

- надеть диэлектрические перчатки, резиновые боты или галоши;
- взять изолирующую штангу или изолирующие клещи;
- замкнуть провода ВЛ 6-20 кВ накоротко методом наброса, согласно специальной инструкции;
- сбросить изолирующей штангой провод с пострадавшего;
- оттащить пострадавшего за одежду не менее чем на 8 метров от места касания проводом земли или от оборудования, находящегося под напряжением.

Нельзя приступать к оказанию помощи, не освободив пострадавшего от действия электрического тока.

Главная задача – как можно быстрее спустить пострадавшего с высоты, чтобы приступить к оказанию помощи в более удобных и безопасных условиях (на земле, на площадке).

Нельзя тратить время на оказание помощи на высоте.

Правила перемещения в зоне “шагового” напряжения

Нельзя отрывать подошвы от поверхности земли и делать широкие шаги.

В радиусе 8 метров от места касания земли электрическим проводом можно попасть под “шаговое” напряжение.

Передвигаться в зоне “шагового” напряжения следует в диэлектрических ботах или галошах либо “гусиным шагом” – пятка шагающей ноги, не отрываясь от земли, приставляется к носку другой ноги.

Нельзя приближаться бегом к лежащему проводу.

Схема действий в случаях поражения электрическим током.

Если нет сознания и нет пульса на сонной артерии

1. Обесточить пострадавшего.
2. Убедиться в отсутствии реакции зрачка на свет.
3. Убедиться в отсутствии пульса на сонной артерии.
4. Нанести удар кулаком по груди.
5. Начать непрямой массаж сердца.
6. Сделать "вдох" искусственного дыхания.
7. Приподнять ноги.
8. Приложить холод к голове.
9. Продолжать реанимацию.

10. Вызвать "Скорую помощь".

Если нет сознания, но есть пульс на сонной артерии

1. Убедиться в наличии пульса.
2. Повернуть на живот и очистить рот.
3. Приложить холод к голове.
4. На раны наложить повязки.
5. Наложить шины
6. Вызвать "Скорую помощь".

Недопустимо: прикасаться к пострадавшему без предварительного обес-точивания.

прекращать реанимационные мероприятия до появления признаков биологической смерти.

Падение с высоты

Что делать в случаях падения с высоты при сохранении сознания

1. Оценить состояние пострадавшего
Вынужденная поза "лягушки" – это верный признак крайне опасных повреждений.

Поза "лягушки" (т.е. пострадавший не может изменить положение ног при этом его стопы развернуты кнаружи, а колени приподняты и разведены).

К крайне опасным повреждениям относятся:

- переломы костей таза и повреждения тазобедренных суставов;
- переломы бедренных костей;
- повреждения позвоночника;
- разрывы внутренних органов и внутренние кровотечения.

Нельзя перемещать пострадавшего, снимать с него одежду или позволять ему шевелиться.

2. Переложить пострадавшего на ковшовые носилки
Сначала следует разъединить и раздвинуть ковши носилок.
Осторожно соединить ковши носилок под пострадавшим.
3. Переложить пострадавшего на вакуумный матрас
Показания к использованию:
 - переломы бедренных костей и голени;
 - повреждение позвоночника;
 - повреждение костей таза и тазобедренных суставов.

Нельзя оставлять лежать пострадавшего на металлических носилках более 10 – 15 минут.

4. Зафиксировать пострадавшего на вакуумном матрасе в позе "лягушки"

Необходимо контролировать состояние пострадавшего.

Нельзя допускать резкие и грубые движения.

Первый спасатель фиксирует шейный отдел позвоночника.

Второй спасатель осторожно приподнимает матрас у колен пострадавшего.

Третий спасатель свободной ногой формирует валик для опоры стоп пострадавшего и откачивает из матраса воздух откачивающим насосом для вакуумных матрасов.

Схема действий при автодорожном происшествии

Если пострадавший находится без сознания:

1. Убедиться в наличии пульса на сонной артерии.
2. Быстро повернуть пострадавшего на живот.
3. Очистить ротовую полость.
4. При кровотечении – наложить кровоостанавливающие жгуты.
5. На раны наложить повязки.
6. При подозрении на переломы костей конечностей – наложить шины.
7. Вызвать "Скорую помощь".

Недопустимо:

- Оставлять пострадавшего в состоянии комы лежать на спине.
- Подкладывать под голову подушку, сумку или свернутую одежду.
- Переносить или перетаскивать пострадавшего без крайней необходимости (угроза взрыва и т.п.)

Утопление

Схема действий в случаях истинного утопления

1. Сразу после извлечения утонувшего из воды – перевернуть его лицом вниз и опустить голову ниже таза.
2. Очистить рот от инородного содержимого и слизи. Резко надавить на корень языка.
3. При появлении рвотного и кашлевого рефлексов – добиться полного удаления воды из дыхательных путей и желудка.
4. Если нет рвотных движений и пульса – положить на спину и приступить к реанимации. При появлении признаков жизни – перевернуть лицом вниз и удалить воду из легких и желудка.
5. Вызвать "Скорую помощь".

Недопустимо:

- Оставлять пострадавшего без внимания;
- Самостоятельно перевозить пострадавшего, если есть возможность вызвать спасательные службы.

Схема действий в случаях бледного утопления в холодной воде, проруби

1. Перенести тело на безопасное расстояние.
2. Проверить реакцию зрачков на свет и наличие пульса на сонной артерии.
3. При отсутствии пульса на сонной артерии – приступить к реанимации.
4. Если появились признаки жизни – перенести спасенного в теплое помещение, переодеть в сухую одежду, дать теплое питье.
5. Вызвать "Скорую помощь".

Недопустимо:

- Терять время на удаление воды из легких и желудка при отсутствии пульса.

Помоги себе сам – если ты оказался в полынье

1. Не суетись!
2. Выбирайся на лед только с той стороны, с которой тебя угораздило свалиться.
3. Старайся наваливаться и опираться на край полыньи не ладонями, а всей верхней половиной туловища, захватывая наибольшую площадь крепкого льда.
4. Проползи по – пластунски первые 3 – 4 метра и обязательно по собственным следам.

Переохлаждение и обморожение

Схема действий при переохлаждении

1. При появлении озноба и мышечной дрожи необходимо дополнительно укрыть, предложить теплое сладкое питье или пищу с большим содержанием сахара.
2. При возможности дать 50 мл алкоголя и доставить в течение 1 часа в теплое помещение или укрытие.
3. В теплом помещении – немедленно снять одежду и поместить в ванну с температурой воды 35 – 40 градусов (терпит локоть) или обложить большим количеством грелок.

4. После согревающей ванны обязательно укрыть теплым одеялом или надеть теплую сухую одежду.
5. Продолжать давать теплое сладкое питье до прибытия врачей.

Недопустимо:

- Давать повторные дозы алкоголя или предлагать его в тех случаях, когда пострадавший находится в алкогольном опьянении.
- Использовать для согревающей ванны воду с температурой ниже 30 градусов.

Схема действий при обморожении

1. Как можно скорее доставить пострадавшего в помещение.
2. Снять с обмороженных конечностей одежду и обувь.
3. Немедленно укрыть поврежденные конечности от внешнего тепла теплоизолирующей повязкой с большим количеством ваты или одеялами и теплой одеждой.
4. Дать обильное теплое питье.
5. Обязательно дать 1 – 2 таблетки Анальгина.
6. Предложить малые дозы алкоголя.
7. Обязательно вызвать "Скорую помощь".

Недопустимо:

- Растирать обмороженную кожу.
- Помещать обмороженные конечности в теплую воду или обкладывать грелками.
- Смазывать кожу маслами или вазелином.

Обморок

Схема действий в случаях обморока

1. Если нет пульса на сонной артерии – приступить к комплексу реанимации.
2. Если есть пульс на – приподнять ноги, расстегнуть ворот сорочки, ослабить галстук и поясной ремень.
3. Надавить на болевую точку.
4. Если в течение 3 минут сознание не появилось – повернуть пострадавшего на живот и приложить холод к голове.
5. При появлении боли в животе или повторных обмороков – положить холод на живот.
6. При тепловом ударе – перенести в прохладное место, приложить холод к голове и груди.
7. В случаях голодного обморока – напоить сладким чаем.

8. Во всех случаях обморока необходимо вызвать врача.

Недопустимо:

- Прикладывать грелку к животу или пояснице при болях в животе или повторных обмороках.
- Кормить в случаях голодного обморока.

Сдавливание конечностей; укусы змей и насекомых

Схема действий в случаях длительного сдавления конечностей

1. Обложить придавленные конечности пакетами со льдом, снегом или холодной водой.
2. Дать 2 – 3 таблетки анальгина. Предложить обильное теплое питье.
3. Наложить защитные жгуты на сдавленные конечности до их освобождения.
4. Сразу после освобождения туго забинтовать поврежденные конечности.
5. Наложить шины.
6. Повторно приложить холод к поврежденным поверхностям.
7. Продолжать давать обильное теплое питье до прибытия врача.

Недопустимо:

- Устранять препятствие кровотоку до наложения защитных жгутов и приема пострадавшим большого количества жидкости.
- Согревать придавленные конечности.

Схема действий в случаях укусов ядовитых змей и насекомых

1. Удалить жало из ранки.
2. Приложить холод к месту укуса. Наложить стерильную повязку.
3. Закапать 5 – 6 капель галазолина или санорина в нос и ранку от укуса.
4. При укусах в руку или ногу – обязательно наложить шину.
5. Давать обильное и желательно сладкое питье.
6. Тщательно следить за состоянием больного до прибытия врача.
7. При потере сознания – повернуть на живот. При остановке сердца и дыхания – приступить к реанимации.

Недопустимо:

- При потере сознания оставлять больного лежать на спине.
- Использовать грелку или согревающие компрессы.

Химические ожоги и отравления газами

Схема действий в случаях химических ожогов кожи

При поражениях любой агрессивной жидкостью (кислотой, щелочью, растворителем, спецтопливом и т.д.) – промывать под струей холодной воды до прибытия "Скорой помощи".

Недопустимо:

- Использовать сильнодействующие и концентрированные растворы кислот и щелочей для реакции нейтрализации на коже пострадавшего.

Схема действий в случаях отравления ядовитыми газами

1. Вынести на свежий воздух.
2. В случае отсутствия сознания и пульса на сонной артерии – приступить к комплексу реанимации.
3. В случаях потери сознания более 4 минут – повернуть на живот и приложить холод к голове.
4. Во всех случаях вызвать "Скорую помощь".

Недопустимо:

- Проводить искусственное дыхание изо рта в рот без использования специальных масок, защищающих спасателя от выдоха пострадавшего.

Показания к проведению основных манипуляций

Когда требуется немедленно нанести удар кулаком по груди и приступить к сердечно – легочной реанимации

1. Нет сознания.
2. Нет реакции зрачков на свет.
3. Нет пульса на сонной артерии.

Недопустимо:

- Терять время на выяснение обстоятельств случившегося.
- Поддаваться панике.
- Терять время на определение признаков дыхания.

Когда следует накладывать давящие повязки

1. При кровотечениях, если кровь пассивно стекает из раны.
2. Сразу после освобождения конечностей при синдроме сдавления.

Когда следует немедленно наложить кровоостанавливающий жгут

1. Алая кровь из раны бьет фонтанирующей струей.
2. Над раной образуется валик из вытекающей крови.

3. Большое кровавое пятно на одежде или лужа крови возле пострадавшего.

Когда необходимо накладывать защитные жгуты
В случаях синдрома сдавления до освобождения конечностей.

Когда необходимо накладывать шины на конечности

1. Видны костные отломки.
2. При жалобах на боль.
3. При деформации и отеках конечностей.
4. После освобождения придавленных конечностей.
5. При укусах ядовитых змей.

Когда необходимо переносить пострадавших на щите
с подложенным под колени валиком или на вакуум – носилках в позе "лягушки"

1. При подозрении на перелом таза.
2. При подозрении на перелом верхней трети бедренной кости и повреждение тазобедренного сустава.
3. При подозрении на повреждение позвоночника и спинного мозга.

Когда пострадавших переносят только на животе

1. В состоянии комы.
2. При частой рвоте.
3. В случаях ожогов спины и ягодиц.
4. При подозрении на повреждение спинного мозга, когда в наличии есть только брезентовые носилки.

Когда пострадавших можно переносить только сидя ли полусидя

1. При проникающих ранениях грудной клетки.
2. При ранениях шеи.

Когда пострадавшего можно переносить только на спине
с приподнятыми или согнутыми в коленях ногами

1. При проникающих ранениях брюшной полости.
2. При большой кровопотере или при подозрении на внутреннее кровотечение.

Признаки опасных повреждений и состояний

Признаки внезапной смерти

1. Отсутствие сознания.
2. Нет реакции зрачков на свет.
3. Нет пульса на сонной артерии.

Признаки биологической смерти

1. Высыхание роговицы глаза (появление "селедочного блеска").
2. Деформация зрачка при осторожном сжатии глазного яблока пальцами.
3. Появление трупных пятен.

Признаки комы

1. Потеря сознания более чем на 4 минуты.
2. Обязательно есть пульс на сонной артерии.

Признаки артериального кровотечения

1. Алая кровь из раны бьет фонтанирующей струей.
2. Над раной образуется валик из вытекающей крови.
3. Большое кровавое пятно на одежде или лужа крови возле пострадавшего.

Признаки венозного кровотечения

1. Кровь пассивно стекает из раны.
2. Очень темный цвет крови.

Признаки истинного утопления

1. Кожа лица и шеи с синюшным оттенком.
2. Набухание сосудов шеи.
3. Обильные пенистые выделения изо рта и носа.

Признаки бледного утопления

1. Бледно – серый цвет кожи.
2. Широкий нереагирующий на свет зрачок.
3. Отсутствие пульса на сонной артерии.
4. Часто сухая, легко удаляемая платком пена в углах рта.

Признаки обморока

1. Кратковременная потеря сознания (не более 3 – 4 минут).
2. Потере сознания предшествуют: резкая слабость, головокружение, звон в ушах и потемнение в глазах.

Признаки синдрома сдавления нижних конечностей

Появляются спустя 15 минут.

1. После освобождения сдавленной конечности – резкое ухудшение состояния пострадавшего.
2. Появление отека конечности с исчезновением рельефа мышц.
3. Отсутствие пульса у лодыжек.
4. Появление розовой или красной мочи.

Признаки переохлаждения

1. Озноб и дрожь.
2. Нарушение сознания:
 - заторможенность и апатия;
 - бред и галлюцинации;
 - неадекватное поведение.
3. Посинение или побледнение губ.
4. Снижение температуры тела.

Признаки открытого перелома костей конечностей

1. Видны костные отломки.
2. Деформация и отек конечности.
3. Наличие раны, часто с кровотечением.

Признаки обморожения нижних конечностей

1. Потеря чувствительности.
2. Кожа бледная, твердая и холодная на ощупь.
3. Нет пульса у лодыжек.
4. При постукивании пальцем – "деревянный" звук.

Признаки закрытого перелома костей конечности

1. Сильная боль при движении или нагрузке на конечность.
2. Деформация и отек конечности.
3. Синюшный цвет кожи.

Аптечка для оказания первой помощи

Средства для остановки кровотечений, обработки ран и наложения повязок, а также дезинфекции рук спасателя и медицинского оборудования

1. **Средство для дезинфекции рук** спасателя, кожи вокруг ран, а также медицинского оборудования.
2. **Кровоостанавливающий жгут** для остановки артериальных кровотечений и в качестве защитных жгутов при синдроме длительного сдавления.
3. **Специальная пленка** для прикрытия ожоговой поверхности.
4. **Бинты и лейкопластырь** для наложения повязок на раны.
5. **Стерильные салфетки**.

Средства для искусственного дыхания

1. **Аппарат "Рот – маска"** для проведения искусственного дыхания.
2. **Резиновый баллончик** для удаления жидкости и слизи верхних дыхательных путей и промывания глаз водой.

Средства для оказания помощи при переломах и сильных ушибах

1. **Пузырь для льда (грелка):**
 - Холод – при ушибах, ожогах, внутренних кровотечениях, укусах змей и насекомых, аллергической реакции.
 - Тепло – при переохлаждении и утоплении.
2. **Гипотермический пакет** при ушибах, ожогах, внутренних кровотечениях, укусах змей и насекомых, аллергической реакции.
3. **Складная шина** для фиксации костей предплечья, стопы, голени, при повреждениях голеностопного сустава.

Лекарственные препараты

1. Валидол;
2. Санорин или галазолин;
3. Анальгин;
4. Сода питьевая.

ГЛАВА 3. ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Термины и определения

Под электроустановкой понимается «совокупность машин, аппаратов, линий и вспомогательного оборудования (вместе с сооружениями и помещениями, в которых они установлены), предназначенных для производства, преобразования, трансформации, передачи, распределения электрической энергии и преобразования ее в другой вид энергии». Электрическая сеть — это совокупность электроустановок для передачи и распределения электрической энергии, состоящая из подстанций, распределительных устройств, токопроводов, воздушных и кабельных линий электропередачи, работающих на определенной территории. С целью большего акцентирования внимания под этим термином будем подразумевать более узкое понятие — устройство, состоящее из источника и приемников электроэнергии и линий связи между ними.

Приемником электрической энергии (электроприемником) называется аппарат, агрегат, механизм, предназначенный для преобразования электрической энергии в другой вид энергии. Потребителем электрической энергии называется электроприемник или группа электроприемников, объединенных технологическим процессом и размещающихся на определенной территории.

Виды электрических сетей переменного тока

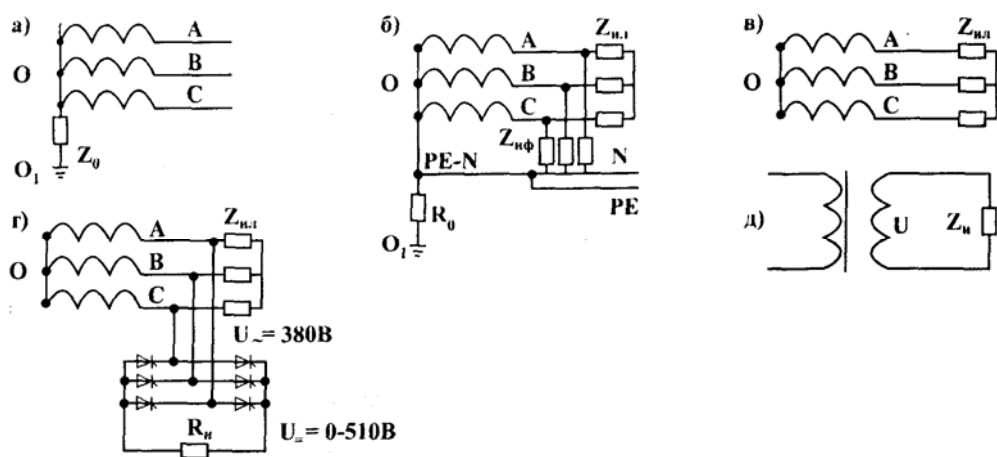


Рисунок 3.1. Виды электрических сетей переменного тока: трехфазная сеть с заземленной нейтралью (а), трехфазная четырехпроводная сеть с глухим заземлением нейтрали (б), трехфазная сеть с изолированной нейтралью (в), сеть двойного рода тока (г), двухпроводная сеть, изолированная от земли (д).

В зависимости от требуемых технико-экономических показателей и ограничений, обусловленных необходимостью обеспечения условий электробезопасности, применяют различные виды электрических сетей.

Трехфазная сеть с заземленной нейтралью (рисунок 3.1, а). Применяется в основном в высоковольтных линиях передачи электроэнергии. Здесь источником является вторичная обмотка трансформатора подстанции (электростанции), а приемником — первичная обмотка понижающего трансформатора, питающего данный производственный объект. Напряжение в сети — выше 1000 В. Различают сети с эффективно заземленной нейтралью и с компенсированной нейтралью. В первом случае сопротивление заземления нейтрали Z_0 не должно превышать 0,5 Ом. Во втором случае между нейтралью обмотки трансформатора 0 и землей включается индуктивный реактор. В последние годы стали находить применение сети с резистированной нейтралью — с заземлением через высокоомный резистор (2 — 4 кОм).

Трехфазная четырехпроводная сеть с глухим заземлением нейтрали (рисунок 3.1, б). Глухозаземленной называется нейтраль обмотки трансформатора или генератора, присоединенная к заземляющему устройству непосредственно или через малое сопротивление (например, через трансформатор тока).

Сеть имеет три фазных провода и выведенный из нейтрали обмотки трансформатора нулевой провод N. Благодаря наличию последнего в этой сети обеспечивается возможность подключения электроприемников $Z_{НЛ}$ и $Z_{НФ}$ не только к линейному напряжению $U_{л}$, но и к фазному $U_{ф}$. То есть здесь, не применяя трансформаторов, потребитель получает для своих нужд два напряжения (127/220, 220/380, 380/660 В), при этом нулевой провод N называют рабочим, если он используется для питания электроприемников. Благодаря экономии на трансформаторах эти сети получили наиболее широкое применение.

Стандартом ГОСТ Р 50571.2-94 «Электроустановки зданий» регламентировано применение как четырехпроводных, так и пятипроводных сетей с глухим заземлением нейтрали. В первых нулевой рабочий проводник N используется также в качестве нулевого защитного РЕ (система заземления типа TN-C, где C — combine, то есть объединенный), Пятипроводные сети содержат два нулевых проводника - рабочий и защитный (система заземления типа TN-S, где «S» - separate, то есть отдельный).

Трехфазная сеть с изолированной нейтралью (рисунок 3.1, в). В этой сети нейтраль источника электроэнергии (генератора или трансформатора) изолирована от земли. Нагрузка - трехфазная или однофазная - подключается к линейным проводам. Применяется в тех случаях, когда предъявляются повышенные требования к безопасности, надежности питания

приемников электроэнергии при эксплуатационных повреждениях электрической изоляции или к их помехозащищенности. Диапазон напряжений: 36 В – 35 кВ.

Если в сети есть приемники электроэнергии постоянного тока, получающие питание через управляемые или неуправляемые полупроводниковые выпрямительные мосты (рисунок 3.1, г), то такую сеть называют сетью двойного рода тока. В такой сети цепи переменного и постоянного тока имеют между собой гальваническую связь. Здесь характеристики, влияющие на условия безопасности, существенно отличаются от характеристик обычных сетей переменного тока. Мощность полупроводникового выпрямителя практически не имеет значения для перевода сети переменного тока в качество сети двойного рода тока, так как в вопросах обеспечения условий электробезопасности оперируют значениями токов в диапазоне 10-100 мА (если в сети имеется хотя бы один маломощный выпрямитель, например, в магнитном пускателе для питания катушки контактора, то ее следует классифицировать как сеть двойного рода тока). Отметим, что понятие сеть двойного рода тока фигурирует только в технической литературе.

Двухпроводная сеть, изолированная от земли (рисунок 3.1, д). Такие сети, так же как и предыдущие, применяются для обеспечения условий электробезопасности. Источниками электроэнергии в них обычно являются обмотки понижающих трансформаторов напряжением от 6 до 220 В.

Параметры цепей связи токоведущих частей с землей, влияющие на безопасность электрических сетей

При расчете и эксплуатации электрических сетей обычно рассматривается цепь «источник электроэнергии И-линия связи ЛС-приемник электроэнергии П» (рисунок 3.2, а). В ней обеспечивается необходимое качество электроэнергии и защита от аварийных пожароопасных ситуаций типа коротких замыканий и перегрузки, ведется учет потребления электроэнергии. Между тем подавляющее большинство электротравм происходит в так называемом режиме однофазного (однополюсного) прикосновения, то есть они формируются в других цепях, а именно в цепях, имеющих связь с землей: источник электроэнергии И – токоведущая часть – тело человека – земля – цепь связи сети с землей Z_y – токоведущая часть (рисунок 3.2. б).

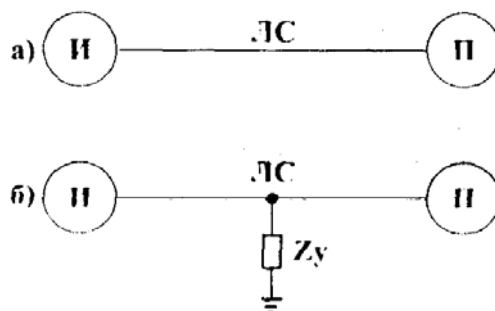


Рисунок 3.2. Связь источников и приемников электроэнергии без учета (а) и с учетом (б) цепей связи с землей.

Наибольшее количество пожароопасных ситуаций формируется также в режимах однофазного замыкания на землю. Очевидно, в обоих вариантах опасность режима зависит от параметров цепи Z -сопротивления изоляции, емкости, заземлений.

Сопротивление изоляции электротехнических изделий

Изоляционные материалы, применяемые в технике, не являются идеальными диэлектриками. Им всем присуща активная проводимость, характеризующаяся удельным объемным ρ_v и удельным поверхностным ρ_s сопротивлениями. Соответственно любая изоляционная конструкция (изоляция жил кабелей, изоляция обмоток электрических машин и т. п.) имеет конечное значение объемного R_v и поверхностного R_s сопротивлений. Значения последних зависят от значения удельных сопротивлений материалов и геометрических размеров конструкции.

Обычно оперируют понятием **сопротивление изоляции электротехнического изделия** R , как эквивалентным параллельному соединению R_v и R_s . Такой прием упрощает нормирование и контроль состояния изоляции. Так сопротивление изоляции отдельного коммутационного аппарата обычно не менее 100 МОм, обмоток электрических машин в нагретом состоянии не менее 10 МОм; значение сопротивления изоляции кабеля (сопротивление между токоведущей жилой и металлической оплеткой или между токоведущими жилами) зависит от длины отрезка кабеля и обычно при испытаниях на заводе-поставщике бывает не менее 100 МОм/км.

Численное значение сопротивления изоляции $R_{и}$, (то есть его составляющих R_v и R_s) изменяется под влиянием внешних эксплуатационных факторов. Поверхностное сопротивление R_s может в тысячи раз уменьшиться при увлажнении или загрязнении. Объемное сопротивление R_v уменьшается при увлажнении изоляции или при повышении температуры ее нагрева.

Сопротивление изоляции изделий - величина, нормируемая ПУЭ и ПЭЭП при приемке новых изделий и при техническом обслуживании электрооборудования. При снижении его ниже установленных норм возможно формирование пожароопасных ситуаций из-за теплового пробоя изоляции.

При снижении сопротивления изоляции в месте повреждения (загрязнение, увлажнение и т. п.) увеличивается ток, протекающий под действием рабочего напряжения сети; соответственно повышается температура нагрева этого места. Повышение температуры нагрева изоляционного материала снижает его сопротивление, что приводит к соответствующему увеличению тока. Последнее вызывает новое повышение температуры и соответствующее дополнительное снижение сопротивления изоляции. Процесс нарастания электрического тока продолжается до тех пор, пока не установится равновесие между тепловыделением и теплоотводом (при какой-то установившейся температуре перегрева). В случае, когда условия охлаждения не соответствуют интенсивности тепловыделения в месте повреждения, наступает лавинообразное нарастание тока, приводящее к тепловому разрушению материала и дуговому замыканию. Поэтому при снижении сопротивления изоляции необходимо принимать меры к устранению неисправности.

Сопротивление изоляции сети

Сеть состоит из комплекса гальванически связанных электротехнических изделий - источника электроэнергии, распределительных щитов, приемников электроэнергии, линий связи и пр. Каждое изделие имеет определенное значение сопротивления изоляции.

Если все токоведущие части данной фазы находятся под электрическим потенциалом φ_f , а земля имеет электрический потенциал φ_0 , то сопротивления изоляции R_f этой фазы у всех элементов сети оказываются под одной и той же разностью потенциалов. Отсюда следует, что сопротивления R_f всех элементов сети включены между собой параллельно. Обычно измеряют эквивалентное сопротивление изоляции не отдельных фаз, а сети в целом (или ее отдельных участков). Тогда

$$R = (\sum 1/R_{ni})^{-1}$$

где R_{ni} - сопротивление изоляции отдельного электротехнического изделия, n - количество изделий в сети.

То есть эквивалентное сопротивление изоляции сети относительно земли зависит от количества входящих в эту сеть электротехнических изделий и значений их сопротивления изоляции. Чем разветвленнее сеть, чем больше в ней элементов, тем ниже уровень ее сопротивления изоляции. При этом даже и случаи исправной изоляции у всех элементов значение эквивалентного сопротивления изоляции сети может быть весьма низким. В разветвленной сети на фоне низкого значения эквивалентного сопротивления изоляции незаметно аварийное снижение сопротивления изоляции

одного из элементов. Тем самым возрастает пожарная опасность разветвленных сетей.

Емкость относительно земли

Токоведущие части и корпус электротехнического изделия (либо земля) образуют своеобразный конденсатор, обладающий определенной емкостью. Действительно, здесь мы имеем две токопроводящие среды, изолированные друг от друга и находящиеся под разными потенциалами φ_Φ и φ_0 .

Так, на рисунке 3.3, а видно, что каждый элементарный участок провода длиной ΔL обладает емкостью ΔC относительно земли. Эквивалентная емкость провода равна сумме этих частичных емкостей. Емкость жилы кабеля длиной 1 км относительно внешней металлической оплетки колеблется в диапазоне 0,1-1,0 мкФ в зависимости от ее сечения и конструкции кабеля. Каждый токоведущий элемент - обмотки электрических машин, трансформаторов и реле, печатный монтаж и пр. - имеет определенную емкость.

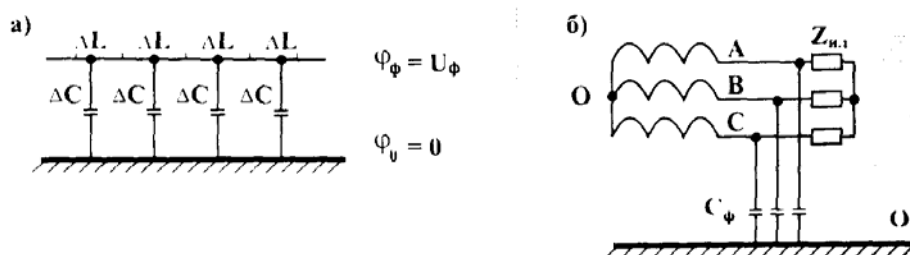


Рисунок 3.3. Емкость токоведущих частей относительно земли: распределенная (а) и эквивалентная (б).

Емкость относительно земли – элемент, распределенный по длине линии. Однако при анализе условий электробезопасности распределенную емкость заменяют сосредоточенной эквивалентной и применяют аппарат теории цепей с сосредоточенными параметрами. Это справедливо, так как длина электромагнитной волны промышленной частоты 50 Гц равна 6000 км ($\lambda = c/f$), то есть она существенно больше геометрических размеров электрической сети любого промышленного объекта. Емкость как распределенный элемент учитывается при анализе нестационарных высокочастотных процессов типа импульсных перенапряжений в сети при внезапных замыканиях на землю и при расчете процессов в протяженных линиях передачи электроэнергии.

Другим источником емкости (основным по количественному значению) являются фильтры защиты аппаратуры автоматики и радиоэлектронной аппаратуры от помех. Эти фильтры устанавливают у источника помехи и в цепях питания радиоэлектронной аппаратуры.

В любой сети постоянную токи или промышленной частоты при каждом разрыве электрической цепи возникают высокочастотные электромагнитные колебания (электромагнитные помехи), которые как излучаются во внешнее пространство, так и проходят по сети. Генераторами подобных помех являются коммутационные аппараты (контакторы, реле), коллекторные электрические машины и тому подобные элементы. Другим источником помех являются нелинейные элементы сети, искажающие форму кривой напряжения и генерирующие высокочастотные составляющие (например, полупроводниковые выпрямители).

Обычно уровень электромагнитных помех снижают путем применения емкостных помехоподавляющих фильтров.

Например, конденсаторы C_1 , включаются между каждой щеткой коллекторной электрической машины и корпусом. При этом для высокочастотной электромагнитной помехи внутри корпуса машины создается контур «щетка Щ1 – конденсатор C_1 – корпус – конденсатор C_1 – щетка Щ2», имеющий бесконечно низкое сопротивление

$$X_c = 1/2\pi n f C_1 \rightarrow 0$$

где n - кратность частоты помехи по отношению к основной гармонике 50 Гц. В результате помеха не выходит за пределы корпуса машины. Емкость каждого фильтра в зависимости от конкретных обстоятельств лежит в диапазоне 0,049-10 мкФ и более.

Емкость ухудшает изоляционные параметры сети, снижая эквивалентное сопротивление токоведущих частей относительно земли при исправной электрической изоляции. Например, если имеем эксплуатационный уровень эквивалентного сопротивления изоляции сети 600 кОм, то при значении емкости 1 мкФ он снижается в 200 раз - до 3 кОм; если емкость составляет 100 мкФ, то он падает в 20000 раз - до 30 Ом.

Емкость оказывает на сеть и другие виды негативного воздействия. Так, при каждом подключении приемников электроэнергии (отдельных участков сети) она в процессе своего заряда генерирует импульсные перенапряжения; при определенных обстоятельствах последние могут сформировать электрические пробой воздушных зазоров и дуговые замыкания. Паразитные емкостные связи способствуют выносу переменного напряжения сети питания в цепи систем автоматического управления и контроля; в результате нарушения работы систем автоматики могут сформироваться разнообразные аварийные ситуации на объектах.

Таким образом, анализ условий электробезопасности как на стадии разработки проекта электроустановки, так и при ее эксплуатации должен выполняться с учетом параметров цепей связи токоведущих элементов с землей. В качестве примера на рис. 3, б приведена эквивалентная схема трехфазной сети с изолированной нейтралью.

Как правильно измерить сопротивление изоляции электроустановок

Сопротивления изоляции распределены по сети. Обычно оперируют значениями эквивалентных величин. Вследствие этого линии связи между токоведущими частями и корпусом, показанные в упомянутой статье на схемах замещения (рис. 2), и соответствующие им подключения элементов к фазам (полюсам) сети и земле в природе отсутствуют. Поэтому измерить значение сопротивления изоляции непосредственным подключением какого-либо прибора к схемным линиям связи не представляется возможным. По этой причине обычно используют косвенные методы измерений - активные (с применением вспомогательного источника напряжения) или пассивные (с использованием рабочего напряжения сети в качестве оперативного напряжения).

В сетях с заземленной нейтралью выполняют периодический контроль при снятом рабочем напряжении, а в сетях, изолированных от земли, согласно п. 1.6.12 Правил устройства электроустановок - автоматический контроль под рабочим напряжением.

Представление о значении сопротивления изоляции дает лишь сила тока в измерительной цепи в установившемся режиме, так как в первые моменты после приложения измерительного напряжения, а также при каждом изменении структуры и состава сети (например, при подключении новых электроприемников) в измерительной цепи протекают токи переходных режимов, обусловленные перезарядом емкости полюсов сети относительно корпуса или зарядом емкости подключаемого участка сети. Кроме того, на результат измерений оказывает влияние рабочее напряжение электроустановки.

Правильный результат может быть получен лишь при соответствии принятого метода измерений параметрам контролируемой сети. Без соблюдения этого условия в одной и той же сети при измерении различными средствами могут быть получены данные, противоречащие одни другим.

Измерения при снятом рабочем напряжении

При снятом рабочем напряжении применяют метод наложения постоянного напряжения. Измерительный прибор - переносной либо щитовой мегаомметр И- содержит источник постоянного напряжения E и миллиамперметр A (рисунок 3.4).

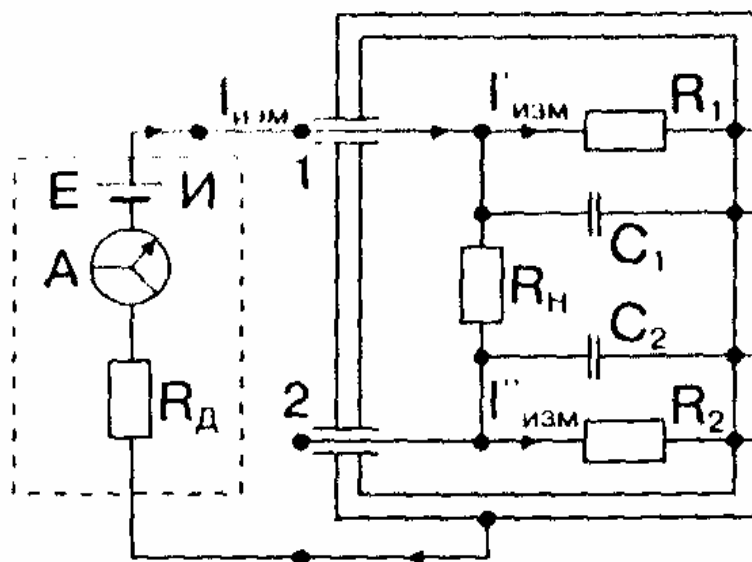


Рисунок 3.4. Измерение при снятом рабочем напряжении.

Один полюс прибора (обычно положительный) подключается к токоведущей части (например, к клемме 1), а второй полюс - к корпусу проверяемого электротехнического изделия.

В установившемся режиме после заряда емкостей C_1 и C_2 относительно корпуса ток $I_{изм}$, протекающий под действием источника E , на полюсе 1 разветвляется: его часть $I'_{изм}$ протекает через эквивалентное сопротивление изоляции R_1 полюса 1, а другая часть $I''_{изм}$ - через сопротивление нагрузки R_H и эквивалентное сопротивление изоляции R_2 полюса 2. Далее ток протекает по корпусу и суммируется в цепи миллиамперметра A .

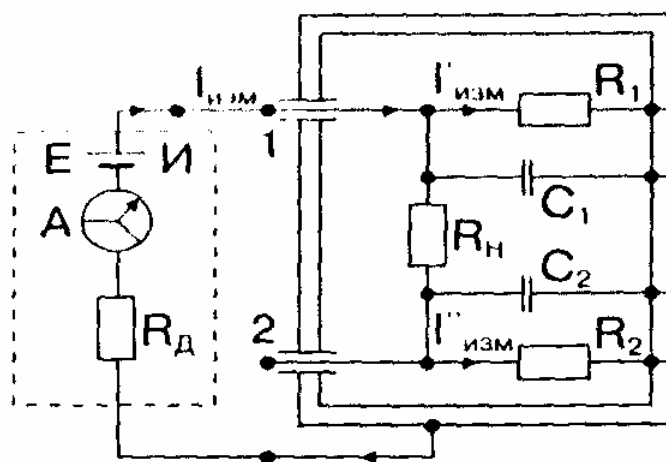


Рисунок 3.5. Измерение сопротивления изоляции сети постоянного тока методом уравновешенного моста.

Силу тока $I_{\text{изм}}$ определяет выражение:

$$I_{\text{изм}} = E / (R_{\text{вн}} + R) \quad (3.1)$$

где $R_{\text{вн}}$ - внутреннее сопротивление мегаомметра (миллиамперметра, источника измерительного напряжения и добавочного сопротивления $R_{\text{д}}$), R - эквивалентное сопротивление изоляции. Строго говоря, в последнем следовало бы учесть сопротивление $R_{\text{н}}$, но обычно $R_{\text{н}} \ll R_2$ поэтому его влиянием допустимо пренебрегать (в тех случаях, когда внутреннее сопротивление контролируемого изделия соизмеримо с величиной сопротивления изоляции, такое допущение может приводить к ошибочным результатам, завышенным против фактических).

При $R_{\text{вн}} = \text{const}$ и $E = \text{const}$ сила тока в измерительной цепи зависит только от величины R , поэтому миллиамперметр градуируют непосредственно в единицах сопротивления.

На практике обычно применяют переносные мегаомметры с питанием от сети переменного тока (типа М127) или с автономным источником (типа М4100). В качестве последнего используют индукторный генератор с ручным приводом (скорость вращения рукоятки около 2 об/с). Чтобы уменьшить погрешность измерений из-за непостоянства скорости вращения рукоятки, в таких мегаомметрах в качестве измерительного прибора используют не миллиамперметр, а логометр, одна рамка которого подключена непосредственно к источнику напряжения, а вторая, жестко связанная с ней, включена в измерительную цепь.

Для повышения достоверности измерений измерительное напряжение выбирают близким к рабочему напряжению контролируемой цепи. Для электрооборудования напряжением от 100 В до 400 В применяют мегаомметры напряжением 500 В. Безопасность измерений при этом достигается за счет ограничения силы тока в измерительной цепи до величины 1 мА добавочным сопротивлением $R = 0,5 \text{ МОм}$.

Измерения в сетях постоянного тока

Норвежская фирма Autronica создала автоматизированную систему контроля сопротивления изоляции System AJ-1 с генератором оперативного напряжения частотой 5 Гц. Фирма Merlin Gerin (Франция) выпускает приборы Vigilohm System XM-200 с оперативным источником частотой 2,5 Гц.

В ряде случаев вместо источника напряжения не промышленной частоты используют вспомогательный источник постоянного напряжения переменной полярности. Так, фирма Bender (Германия), выпускает прибор IRDH 265-4.

Метод уравнивающего моста.

На этом методе, как правило, основана работа отечественных щитовых мегаомметров в сетях постоянного тока. Схема измерений этим методом приведена на рисунке 3.5, где использованы следующие обозначения: А - миллиамперметр; R_d - добавочное сопротивление; П - переключатель; Е - источник измерительного напряжения (до 150 В); R_n - потенциометр.

Плечами моста являются сопротивления изоляции R_1 и R_2 и сопротивления r_1 и r_2 плеч потенциометра R_n . Измерительный прибор и ограничительное сопротивление R_d включены в диагональ моста.

Сила тока $I_{изм}$ в диагонали моста определяется выражением:

$$I_{изм} = \frac{E + U \frac{R_2 r_1 - R_1 r_2}{R_n (R_1 + R_2)}}{R + R_d + \frac{r_1 r_2}{R_n}} \quad (3.2)$$

где R - эквивалентное сопротивление изоляции сети.

Измерение производится в два этапа. На первом этапе переключатель П устанавливают в положение 1 и перемещением движка потенциометра балансируют мост - добиваются отсутствия тока в диагонали моста. На втором этапе переключатель устанавливают в положение 2, подключая в диагональ моста источник измерительного напряжения Е. После окончания процессов перезаряда емкостей снимают показание миллиамперметра.

В сбалансированном мосте составляющая тока, определяемая вторым слагаемым, отсутствует. Поэтому при $E = \text{const}$, $R_d = \text{const}$ и при условии $r_1 r_2 / R_n \ll R$ сила тока $I_{изм}$ однозначно определяется сопротивлением изоляции R (приборы типа МІ54, М1508, М1608, М1428, М1628).

Обычно при работе с сетями постоянного тока применяют методы измерений, основанные на использовании рабочего напряжения сети в качестве оперативного напряжения. Рассмотрим один из них.

Метод трех отсчетов вольтметра

Этот метод заключается в последовательном измерении вольтметром с известным сопротивлением r трех напряжений: U - рабочего; U_1 - между

положительным полюсом сети и землей; U_2 - между отрицательным полюсом и землей. Расчет искомой величины сопротивления изоляции сети производится по формуле:

$$R = r \frac{U - (U_1 + U_2)}{U_1 + U_2} \quad (3.3)$$

Рассмотрим физические основания этого метода.

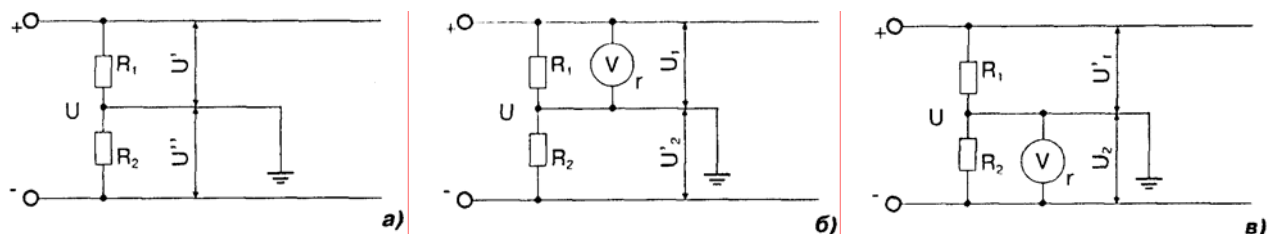


Рисунок 3.6. Измерение сопротивления изоляции сети постоянного тока вольтметрами.

а) – по методу двух вольтметров

б) и в) – по методу трех отсчетов вольтметра

На рисунке 3.6,а показана эквивалентная схема сети постоянного тока с сопротивлениями изоляции полюсов R_1 , R_2 и рабочим напряжением U .

Напряжения между полюсами сети и корпусом U' и U'' пропорциональны соответствующим сопротивлениям изоляции, то есть всегда выполняются следующие соотношения:

$$\frac{U'}{U''} = \frac{R_1}{R_2} \quad U' + U'' = U$$

Если для измерения этих напряжений между полюсами сети и корпусом включить вольтметры V_1 и V_2 с равными внутренними сопротивлениями r , то получим:

$$\frac{U'}{U''} = \frac{R_1(R_2 + r)}{R_2(R_1 + r)} \quad (3.4)$$

При $r \gg R$ выражение (3.4) будет совпадать с предыдущим.

Такой способ контроля (с использованием двух вольтметров) ранее применялся для индикации однополюсных снижений сопротивления изоляции и однополюсных замыканий на землю. Вольтметр, соответствующий полюсу с меньшим сопротивлением изоляции, имеет меньшее показание (зачастую вместо вольтметров включали две лампы накаливания).

Пользуясь результатами измерения напряжений U' и U'' , определить величины сопротивлений R_1 и R_2 , соответственно и значение эквивалентного сопротивления изоляции сети R , не представляется возможным, так как система уравнений (3.4) неполная: эквивалентная схема сос-

тоит из трех контуров, в то время как сама система содержит только два уравнения. Чтобы ее все-таки можно было разрешить, в сеть вносят нормированные искажения.

При включении вольтметра V по схеме рисунка 3.6,б меняется эквивалентное сопротивление между положительным полюсом сети и землей (за счет шунтирования сопротивления изоляции R_1 внутренним сопротивлением вольтметра r). Оно становится равным:

$$R_1 = \frac{rR_1}{r + R_1} < R_1$$

Так как при этом сопротивление между отрицательным полюсом сети и корпусом не изменится, то уменьшается напряжение между положительным полюсом и землей: $U_1 < U'$ (соответственно $U_2 > U''$). При измерении по схеме рис. 3,в аналогично получаем: $U_2 < U''$. С условием того, что $U' + U'' = U$, при измерении методом трех отсчетов всегда справедливо неравенство

$$U_1 + U_2 < U$$

Следует еще раз подчеркнуть, что оно образуется за счет намеренного поочередного уменьшения сопротивлений между полюсами сети и землей путем шунтирования сопротивлений изоляции R_1 и R_2 известным сопротивлением r .

Теперь система уравнений, составленных для напряжений U_1 и U_2 , оказывается разрешимой, так как она содержит известные величины U , U_1 , U_2 , r и две неизвестные величины: R_1 и R_2 . Решая систему относительно последних, получаем выражение (3.3) для эквивалентного сопротивления изоляции сети.

Соотношение величин напряжений U и $U_1 + U_2$, определяющее точность измерений при данном сопротивлении изоляции сети, зависит от величины сопротивления вольтметра r . Если $r \gg R$ (например, при измерении ламповым, цифровым или электростатическим вольтметром), то при подключении вольтметра в сеть вносятся несущественные искажения, так как сопротивления между полюсами сети и землей практически не изменяются. Как следствие этого получаем $U_1 + U_2 = U$. Соответственно нулевыми будут результаты при расчетах по формуле (3.3).

Наибольшая точность измерений достигается при выполнении следующего соотношения: $r = 0,8R$, при котором $U_1 + U_2 = 0,44U$. Обычно рекомендуется выбирать вольтметр с внутренним сопротивлением, приблизительно равным измеряемому сопротивлению изоляции.

Изложенное справедливо не только для силовых сетей, но и для низковольтных систем автоматики. В последних опасно выполнять контроль сопротивления изоляции с использованием щитовых мега-омметров, содержащих источник измерительного напряжения 100-150 В. Под действием

этого источника при определенных условиях могут выйти из строя комплектующие систему полупроводниковые приборы и микросхемы.

Этот метод прост в выполнении и доступен, так как не требует применения специальной аппаратуры. Однако он имеет и ряд недостатков, связанных с необходимостью выполнения вычислений.

Опыт показывает, что целесообразна подмена расчетов по формуле (3.3) работой с соответствующими номограммами. В качестве примера на рисунке 3.7 приведена номограмма, предназначенная для определения значения сопротивления изоляции сетей постоянного тока напряжением от 150 до 600 В.

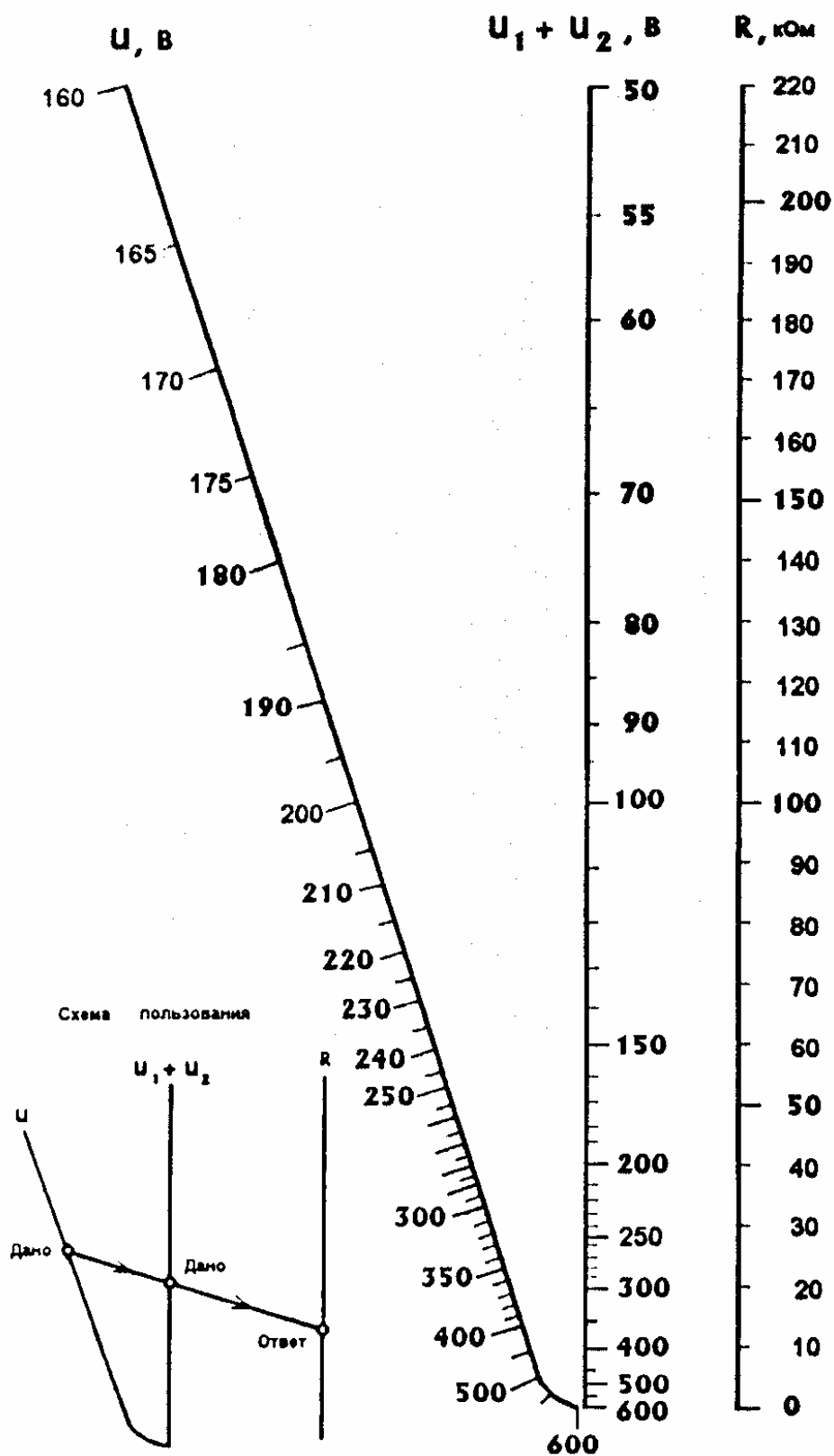


Рисунок 3.7. Номограмма для определения сопротивления изоляции сетей постоянного тока напряжением от 150 В до 600 В при измерении вольтметром с внутреннем сопротивлением 100 кОм.

Номограмма имеет три шкалы – рабочего напряжения U , суммы напряжений полюсов сети относительно корпуса U_1+U_2 , и искомого значения сопротивления изоляции R . Порядок работы с номограммой таков: к точкам шкал U и U_1+U_2 , соответствующим полученным результатам измерений, прикладывается линейка; искомое значение считывается по шкале R .

В практической деятельности не всегда имеется в наличии вольтметр с предусмотренным номограммой значением внутреннего сопротивления. Поэтому на рисунке 3.8 приведена номограмма, пригодная для работы с различными типами вольтметров. Она состоит из двух параллельных шкал ($U_1 + U_2$ и R) и бинарного поля с координатами «напряжение сети - внутреннее сопротивление вольтметра». Работа с такой номограммой также не составляет труда.

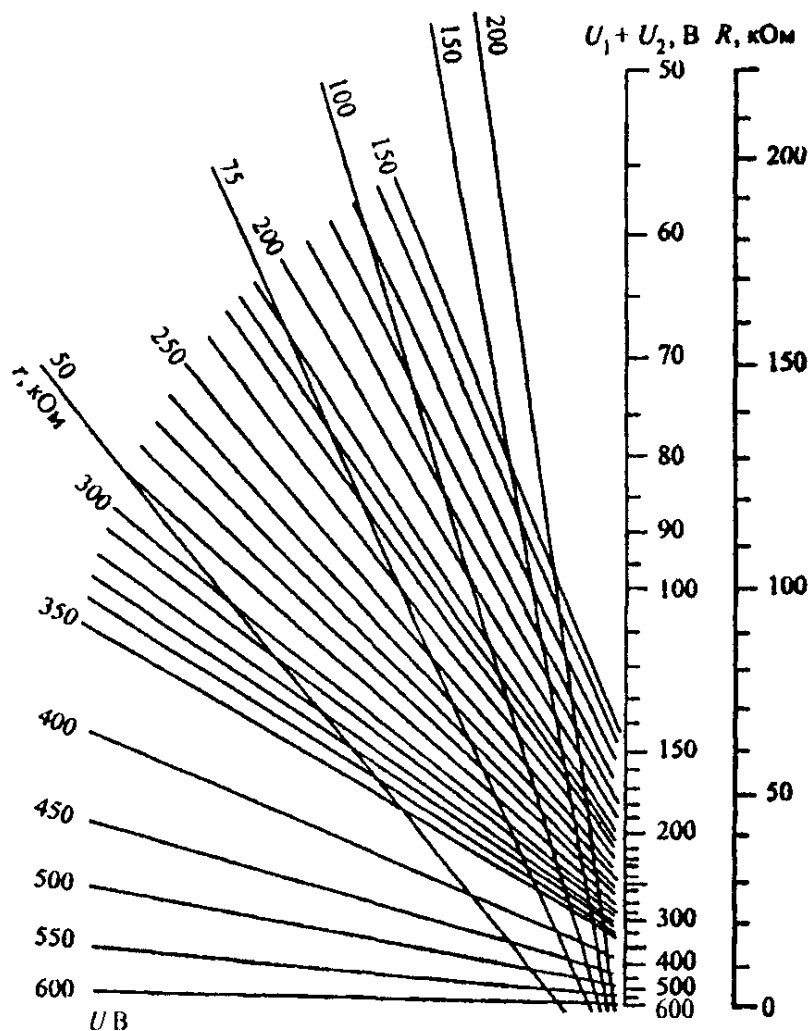
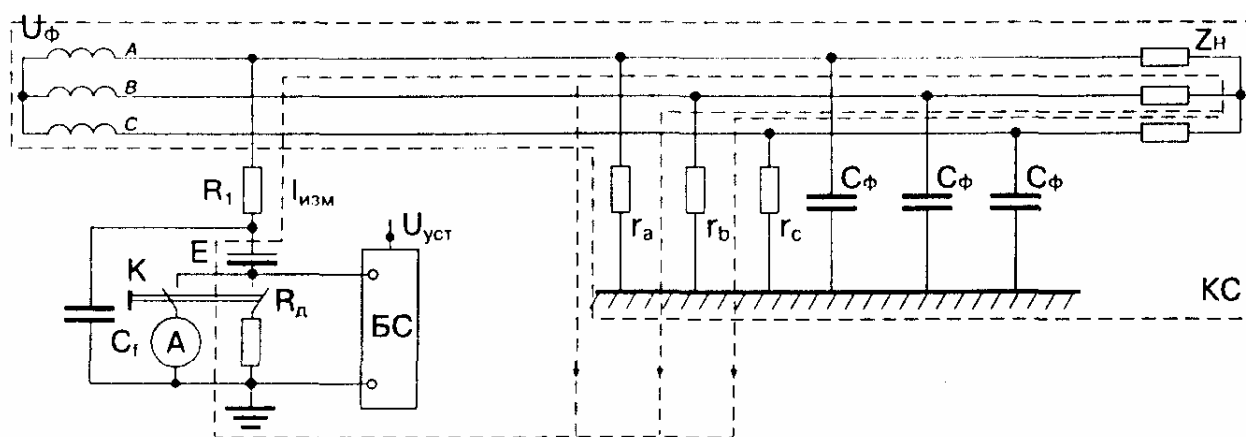


Рисунок 3.8. Номограмма для определения сопротивления изоляции сетей постоянного тока напряжением от 150 В до 600 В при измерении вольтметром с внутренним сопротивлением от 50 до 200 кОм.

Измерения в сетях переменного тока

Принцип действия большинства приборов, предназначенных для работы в сетях переменного тока, находящихся под рабочим напряжением, основан на использовании метода наложения постоянного измерительного напряжения (рисунок 3.9), аналогичного методу измерений при снятом напряжении. Так как под действием рабочего напряжения U_{ϕ} в измерительной цепи может протекать, переменный ток, то для ее защиты применяют индуктивный или, как показано на схеме, емкостный фильтр (цепь R_1 — C_1). Конденсатор C_1 также защищает измерительную цепь от



бросков тока $I_{изм}$ в переходных режимах работы сети (при подключении электроприемников) (рисунок 3.9).

Рисунок 3.9. Контроль изоляции сетей переменного тока методом наложения постоянного напряжения.

Измерение сопротивления изоляции производят при нажатой кнопке K , когда измерительная цепь замыкается через миллиамперметр A , градуированный в единицах сопротивления. При «свободном» состоянии кнопки (в режиме автоматического контроля) цепь замыкается через резистор R_d , являющийся входным элементом блока сигнализации $БС$. Падение напряжения на этом резисторе, так же как и сила тока в измерительной цепи, однозначно определяется значением эквивалентного сопротивления изоляции сети. При уменьшении сопротивления изоляции это напряжение возрастает; в случае снижения сопротивления доопределенного значения (установленной для данной сети уставки срабатывания сигнализации $U_{уст}$) на выходе $БС$ появляется соответствующий сигнал (световой или звуковой).

На таком принципе работают устройства «Электрон-1» (автоматический контроль и измерение), ПКИ (автоматический контроль) и щитовые мегаомметры М1423, М1503, М1527, М1623, М1603.

В процессе настройки или эксплуатации электроустановки нередко возникает необходимость измерять сопротивление изоляции «прикладным» методом, не обращаясь к штатным средствам контроля. Л.П. Подольским в 1946 г. предложен достаточно простой способ двух отсчетов вольтметра применительно к трехфазным сетям (рисунок 3.10).

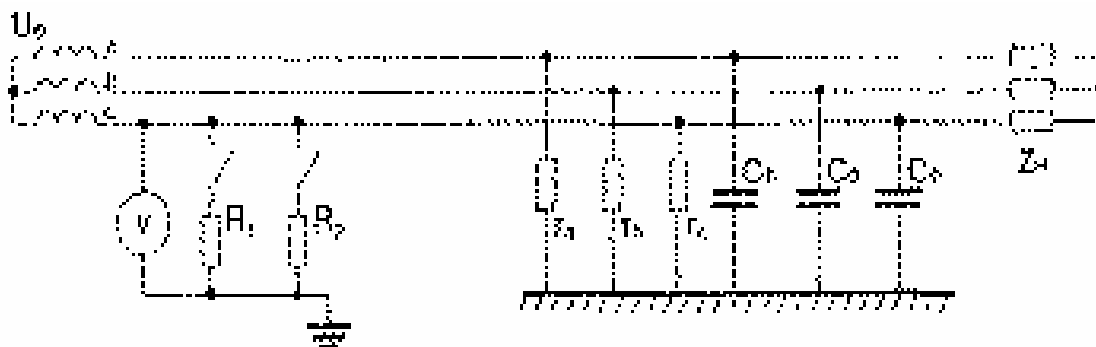


Рисунок 3.10. Измерение сопротивления изоляции сети переменного тока методом двух отсчетов вольтметра.

Согласно этому способу измеряют напряжение U_1 между одной из фаз сети и землей. Затем между этой фазой и землей включают дополнительное сопротивление известной величины R_1 и измеряют напряжение U_2 ; вместо сопротивления R_1 подключают сопротивление R_2 и вновь измеряют напряжение между фазой и землей U_3 .

Величина эквивалентного сопротивления изоляции сети определяется по формуле:

$$R = 2 \frac{\frac{q_2}{R_1} - \frac{q_1}{R_2}}{\frac{q_1}{R_2^2} - \frac{q_2}{R_1^2}} \quad (3.5)$$

где $q_1 = (U_1/U_2)^2 - 1$; $q_2 = (U_1/U_3)^2 - 1$.

Для уменьшения погрешности измерений рекомендуется принимать $R_1 = 2R_2$, а величину $2R_2$ – такой, чтобы после его подключения напряжение фазы относительно земли уменьшилось на 75 % ($U_3 = 0.25U_1$).

Измерения в сетях двойного рода тока

В современных сетях переменного тока обычно присутствуют полупроводниковые выпрямители, подключенные непосредственно к фазам сети (без применения трансформаторов). Это могут быть как маломощные элементы (например, для питания катушек контакторов в магнитных пускателях), так и силовые агрегаты (питание электроприводов постоянного тока). В подобных сетях величина эквивалентного сопротивления изоляции определяется пятью составляющими: сопротивлениями изоляции r_a , r_b , r_c фаз цепей переменного тока и сопротивлениями изоляции R_1 и R_2 полюсов цепи постоянного тока.

Рассмотренные выше методы измерений в сетях переменного тока называются непригодными для сетей двойного рода тока. Это объясняется тем, что в сети двойного рода тока полюса цепи постоянного тока имеют определенные; постоянные напряжения относительно земли - в зависимости от значения сопротивления их изоляции.

Через полупроводниковый выпрямитель эти напряжения в определенной закономерности переносятся на цепи переменного тока и влияют на работу приборов контроля изоляции. Так, в простейшем случае, при использовании трехфазного неуправляемого выпрямителя, собранного по схеме Ларионова, среднее значение напряжения между фазами сети переменного тока и землей определяется выражением:

$$U_{cp} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} U_{m\phi} \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} \left(1 - \frac{R_{\sim}}{R_{\sim}} \right)^{-1} \quad (3.6)$$

где $U_{m\phi}$ – амплитуда фазного напряжения на входе выпрямительного моста; R_1 , R_2 — сопротивления изоляции полюсов цепи постоянного тока; $R_{\sim}$, $R_{\sim}$ - эквивалентные сопротивления изоляции цепей постоянного и переменного тока соответственно.

Из этого выражения следует, что при равенстве величин R_1 и R_2 имеет место $U = 0$ и никаких искажений в работу приборов контроля не вносится.

Однако в общем виде $R_1 \neq R_2$, соответственно $U_{cp} \neq 0$. В предельных случаях при однополюсном замыкании на корпус ($R_1 \ll R_2$ или $R_2 \ll R_1$) постоянная составляющая напряжения между фазами и землей $U_{cp.max} = \pm 0,5U$ (U – среднее значение напряжения на выходе выпрямительного моста). То есть постоянная составляющая напряжения между фазой и землей может произвольно изменять как величину, так и знак, по абсолютному значению достигая половины рабочего напряжения цепи постоянного тока.

В трехфазных сетях напряжением 380 В напряжение на выходе выпрямительного моста $U=510$ В. В приборах контроля изоляции измерительное напряжение E существенно меньше (обычно оно равно 150 В), поэтому напряжение U оказывает существенное влияние на силу тока и напряжение в измерительной цепи, вносит дополнительную погрешность. Стрелка мега-

омметра может занимать любое положение на рабочем участке шкалы, независимо от измеряемого значения сопротивления изоляции. Она может даже зашкаливать за отметки «О» и « ∞ », показывая лишние физическое смысла величины $R < 0$ и $R > \infty$. В качестве примера на рисунке 3.11 приведены показания щитового мегаомметра типа М1503 в зависимости от значения сопротивления изоляции отрицательного полюса цепи постоянного тока при постоянном значении сопротивления изоляции положительного полюса (50 кОм) и эквивалентном сопротивлении изоляции цепей переменного тока 100 кОм (кривая 1). Кривая 2 соответствует фактическим значениям эквивалентного сопротивления изоляции сети.

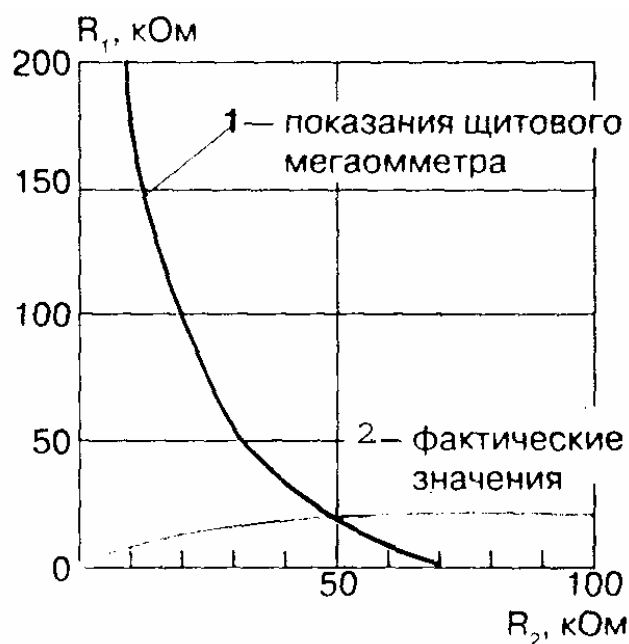


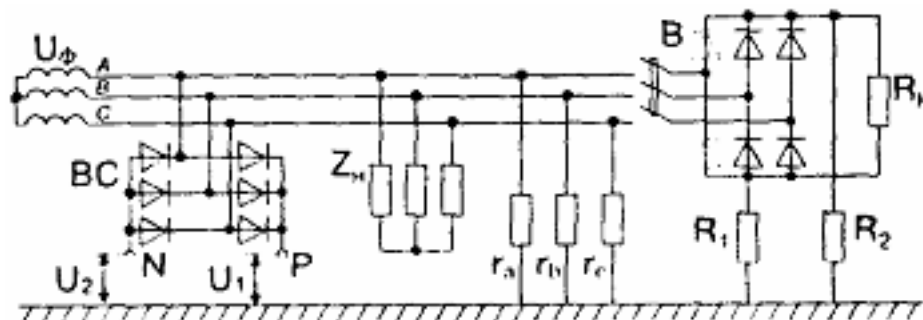
Рисунок 3.11. Эквивалентное сопротивление изоляции сети двойного рода тока.

Из графиков видно, что кривые 1 и 2 совпадают только в одной точке, когда $R_1 = R_2 = 50$ кОм. При низких значениях эквивалентного сопротивления изоляции (менее 10 кОм) стрелка прибора находится вблизи отметки

«∞», и наоборот, при достаточно высоких сопротивлениях (более 25 кОм) прибор показывает $R < 0$.

ЛПО «Вибратор» выпускает мегаомметры типа М1428 и М1628, пригодные для работы в сетях двойного рода тока.

В сетях переменного и двойного рода тока можно применять метод, разработанный на кафедре безопасности жизнедеятельности СПб ТЭТУ «ЛЭТИ». Сущность метода заключается в следующем. К фазам сети переменного тока подключается трехфазный выпрямительный мост, собранный на полупроводниковых диодах по схеме Ларионова (рисунок



3.12).

Рисунок 3.12. Измерение сопротивления изоляции сети двойного рода тока по способу ЛЭТИ.

Вольтметром магнитоэлектрической системы поочередно измеряют три напряжения; U_{cp} — на выходе моста, U_1 — между положительным полюсом моста и землей, U_2 — между отрицательным полюсом моста и землей. Расчет сопротивления изоляции сети выполняют по формуле:

$$R = r \left(\frac{U_{cp}}{U_1 + U_2} - 1 \right) \quad (3.7),$$

аналогичной формуле (3.3) для метода трех отсчетов вольтметра в сетях постоянного тока. Существенно, что в подобных случаях измерения должны производиться *вольтметром именно магнитоэлектрической системы*, так как носителями информации о величине сопротивления изоляции являются только средние значения напряжений. Предел измерений вольтметра должен соответствовать величине U_{cp} , то есть для трехфазных сетей 380 В пригодны вольтметры со шкалой 0-600 В. Внутреннее сопротивление вольтметра выбирается в соответствии с рекомендациями, приведенными выше применительно к сетям постоянного тока.

Этот метод пригоден для применения в однофазных и трехфазных сетях переменного тока, в сетях с управляемыми и неуправляемыми выпрямителями. Во избежание ошибок в расчетах здесь также рекомендуется

применять номограммы. Поскольку напряжение источников переменного тока стабильно, номограммы оказываются существенно более простыми.

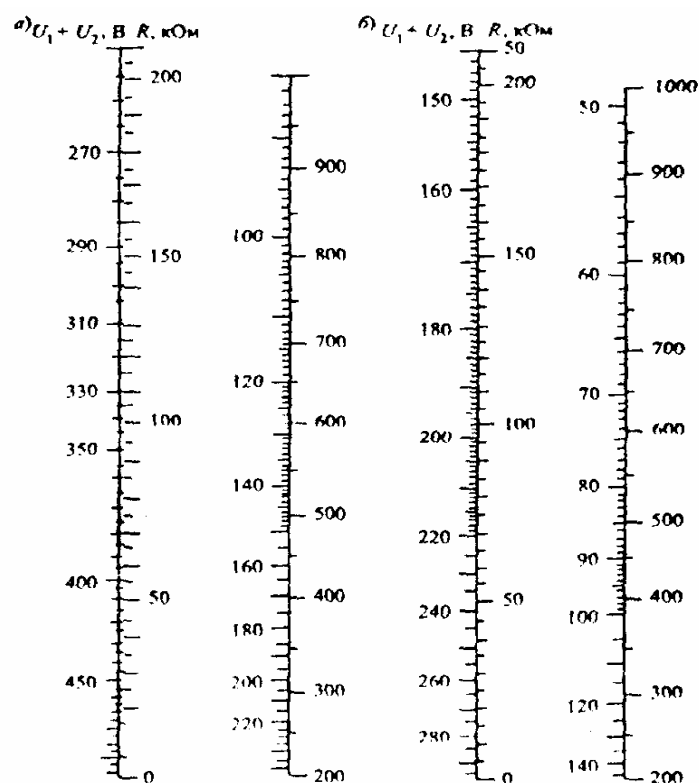


Рисунок 3.13. Номограмма

Электрооборудование как источник пожара

В одном из своих аналитических обзоров государственный инспектор по пожарному надзору А. Шелудько отмечал: «Наша страна занимает первое место в мире по количеству пожаров и числу погибших в них. По тяжести пожаров — число погибших на 100 тысяч жителей и число погибших на 1000 пожаров — мы превосходим ФРГ в 22 раза, США — в 33 раза, Англию — в 38 раз». Профессор из ВПНП противопожарной обороны полковник Г. Смелков уточняет: «Каждый четвертый пожар возникает из-за неисправности в электроустановке». Поэтому следует подробнее остановиться на процессах горения электротехнических изделий.

Принципы горения вещества

Процессы горения обычно формируются под действием химических реакций окисления, то есть соединения вещества с кислородом воздуха.

Горение - это быстрое окисление, при котором выделяется энергия в виде тепла и света. Таким образом, для формирования классического процесса самостоятельного горения при снятом рабочем напряжении необходимы два условия: наличие горючего вещества и наличие окислителя (например, кислорода воздуха).

Но этого недостаточно. Необходимо наличие так называемого треугольника горения, две стороны которого образованы указанными двумя условиями, а третья сторона (третье условие формирования процесса горения) - нагрев вещества до температуры самовоспламенения (рисунок 3.14).

Рисунок 3.14. Треугольник самостоятельного горения.



Дело в том, что любое вещество может гореть только в газообразном состоянии, когда его молекулы окружены молекулами кислорода воздуха. В твердых веществах только отдельные молекулы свободны (за счет испарения), основная часть молекул связана. Поэтому до того, как твердое вещество начнет гореть, оно должно перейти в газообразное состояние. Этот процесс называется пиролизом и представляет собой химическое разложение вещества под воздействием тепла. Процесс самостоятельного горения формируется только в том случае, когда пары вещества смешиваются с воздухом в достаточном количестве и при этом подогреваются до температуры самовоспламенения (таблица 3.1).

Таблица 3.1

Температура самовоспламенения электротехнических материалов.

Материал	Температура самовоспламенения, °С
Полиэтилен	390 - 422
Полистирол	371 - 496
Поливинилхлорид	454 - 495
Фторопласт	600
Бумага	230
Гетинакс	480
Текстолит	500

Каучук натуральный	375
Резина	350
Трансформаторное масло	270

Теплота, необходимая для нагрева до температуры самовоспламенения, сообщается веществу от источника зажигания (пламя от постороннего источника, электрический разряд, тепло от нагретых токоведущих частей, искры удара или трения, тепло механической работы или химической реакции и пр.).

Дуговые замыкания, происходящие в электрооборудовании под рабочим напряжением, не требуют присутствия окислителя.

Электрооборудование – пожароопасный фактор

Электрооборудование как инициатор воспламенения должно рассматриваться с двух точек зрения. Во-первых, горение может происходить внутри электротехнических изделий, замыкаться в них, не распространяясь в окружающее пространство. Во-вторых, горение может распространяться на окружающие предметы, оборудование и конструктивные элементы объекта. В первом случае материальный ущерб ограничивается стоимостью ремонта или замены вышедшего из строя изделия либо его вообще может не быть (например, в случае выгорания угольной пыли, скопившейся в корпусе электрической машины). Во втором случае электрооборудование играет роль источника воспламенения. Здесь материальный ущерб может быть большим, вплоть до гибели людей и разрушения объекта.

К основным факторам, приводящим к возгоранию электротехнических изделий (или окружающего оборудования) при отсутствии взрывоопасной среды, относятся появление открытого огня, то есть неуправляемой электрической дуги (обозначим этот фактор индексом А), или чрезмерный нагрев электрическим током отдельных деталей (обозначим его индексом Б). Дуга чаще всего является следствием различного рода замыканий вследствие повреждения электрической изоляции, а перегрев током возникает при механических повреждениях или при неудовлетворительном состоянии контактов.

Дуга воспламеняет горючие изоляционные материалы; она может разрушить металлический корпус электротехнического изделия, и после этого создается возможность распространения огня на окружающие предметы. Перегрев током нагрузки обычно приводит к тепловому пробоем электрической изоляции и последующему формированию электрической дуги с соответствующими последствиями.

Поскольку электрооборудование проходит комплекс испытаний на заводах-поставщиках, то есть оно в нормальных условиях эксплуатации гарантированно не может быть источником воспламенения, возможность возникновения указанных выше возбудителей пожара следует связывать с конкретными неисправностями, которые могут возникнуть в процессе монтажа и эксплуатации.

Основные виды неисправностей, вызывающих перегрев токоведущих частей или приводящих к дуговому замыканию:

1. Ухудшение качественного состояния электрической изоляции (способствует появлению фактора А) из-за поверхностного увлажнения, поверхностного загрязнения или объемного увлажнения.

2. Механическое ослабление контактных соединений (способствует появлению фактора Б) из-за дефектов монтажа, вибрации, коррозии, различной температурной деформации деталей соединения. Причиной ослабления контактных связей также могут быть динамические усилия, возникающие в соединении при коротких замыканиях, циклическое изменение размеров деталей вследствие периодического их нагрева и охлаждения при включении и отключении нагрузки, изменение (уменьшение) толщины изоляционной панели в процессе теплового старения и т.д.

3. Механические повреждения в электроприводе и аппаратуре защиты (способствуют появлению фактора Б): выход из строя подшипников, неисправности и перегрузки приводного механизма, работа асинхронных двигателей на двух фазах и пр.

Около 70% пожароопасных ситуаций при повреждениях электрооборудования возникают в режимах однофазного замыкания на землю. Защита от пожароопасных ситуаций — контроль изоляции, грамотное техническое обслуживание электрооборудования и приводных механизмов.

Опасность пожаров в трассах кабелей

Изоляция токоведущих жил и наружная шланговая оболочка кабелей обычно изготавливаются из горючих материалов, поэтому пучки кабелей, проложенные на объектах, по существу являются своеобразными складами горючего материала, причем складами неохраняемыми и обычно не оборудованными средствами пожарной сигнализации и пожаротушения. Пожары в кабельных хозяйствах приводят к повреждению не только самих кабельных линий, но и подключенного к ним электрооборудования, приле-

гающего оборудования и строительных конструкций; они могут послужить причиной выхода из строя всего объекта.

Наиболее важной теплотехнической характеристикой горючих веществ является теплота сгорания (теплотворная способность, то есть количество тепла, выделяющегося при сгорании единицы массы (кг) или единицы объема (м^3) вещества (таблица 3.2). Применительно к пожарам в кабельных сооружениях этот параметр, в частности, определяет суммарное количество выделяющегося тепла и температуру горения (пожара).

Таблица 3.2

Теплотворная способность электротехнических материалов

Наиритовая резина ШН-40	4573
Изоляционная резина	4027
Полиэтилен изоляционный	1149 1
Поливинилхлорид изоляционный	5949
Поливинилхлорид шланговый	6158
Прорезиненный миткаль	3004
Кабельная бумага	3799
Стеклопряжа	2165
Алюминий	7860

Из приведенных в таблице данных видно, что в пожарном отношении наиболее опасны пластмассы; так, при сгорании 1 кг резиновой изоляции выделяется тепла в 1,6 раза больше, чем при сгорании дубовых дров (2500 ккал/кг), а для полиэтиленовой изоляции этот показатель равен 4,6. Заметим, что полиэтиленовая изоляция в 1,6 раза эффективнее такого горючего материала, как антрацит (7500 ккал/кг).

Другими нормированными характеристиками горючести кабелей являются: нераспространение самостоятельного горения, огнестойкость, коррозионная активность продуктов газовой выделения, также оптическая плотность дымобразования при горении и токсичность продуктов газовой выделения (публикация 754-1 МЭК).

Нераспространение самостоятельного горения пучков кабелей

На этой характеристике следует остановиться подробнее, так как на практике зачастую путают два различных понятия – негорючесть кабеля и нераспространение самостоятельного горения. Негорючие кабели только

отдельных марок – с магнезиальной изоляцией, для атомных электростанций (обозначены индексом «нг») и др. Изоляция большинства марок кабелей изготовлена из горючих материалов (см. табл. 3.2). Под действием внешнего источника зажигания эти материалы могут воспламениться. Однако после удаления источника горение кабеля должно прекратиться из-за неподготовленности прилегающих изоляционных покровов к самостоятельному горению температура их нагрева не превышает значения температуры самовоспламенения из-за охлаждения окружающим воздухом. Это свойство нераспространения самостоятельного горения обеспечивается конструкцией кабеля при его разработке.

При испытании кабеля на определение этого свойства (ГОСТ 12176-76) берут отрезок кабеля длиной 600 мм и на середину его под углом 45° направляют пламя газовой горелки (длина факела пламени 125 мм). Длительность воздействия пламени $T = 60 + 0,04m$ сек, где m — масса испытываемого образца в граммах. После удаления горелки самостоятельное горение изоляции может распространяться по кабелю на расстояние не более 100 мм от места поджога.

На объектах одиночные кабели встречаются обычно только в местах ввода их в аппаратуру. Как правило, при монтаже применяют групповую прокладку кабелей (пучками или потоками) на панелях, на стеллажах, на скоб-мостах или в кабельных подвесках. В таких условиях существенно изменяются температурные режимы нагрева изоляции и охлаждения ее окружающим воздухом, то есть при определенной конструкции пучка кабелей становится возможным распространение самостоятельного горения по всей длине трассы. Так, в предпусковой период на Запорожской АЭС выгорела трасса с суммарной длиной кабелей 800 км. Нормы и методы испытаний на нераспространение горения кабелей при групповой прокладке определены указанными выше рекомендациями МЭК.

В качестве примера можно привести пожар на английском эсминце «Шеффилд» после попадания в него аргентинской ракеты («изоляция кабелей горела как порох; огонь по кабелям распространился во все помещения корабля»).

Защита трасс кабелей от пожаров

Обычно трассы кабелей располагают в недоступных местах или защищают кожухами и стальными трубами от возможных механических повреждений. Поэтому теоретически оболочки кабелей не должны подвергаться каким-либо вредным внешним воздействиям. Тем не менее при регулярном техническом обслуживании необходимо проверять исправность наружных оболочек кабелей, защитных ограждений и кожухов, отсутствие

посторонних предметов и следов агрессивной жидкости, вытекающей из расположенной над трассой кабелей арматуры трубопроводов.

Действенным средством обеспечения пожаробезопасности пучков кабелей являются огнезащитное покрытие типа ОПК, наносимое на наружные поверхности пучка, и огнестойкие кабельные проходы, препятствующие распространению огня в смежные помещения. Эти средства разработаны и поставляются ВНИИ противопожарной обороны МВД РФ, г Балашиха-6 Московской области.

ГЛАВА 4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Общие требования к низковольтным аппаратам

Как было отмечено выше, даже в традиционных видах электрических аппаратов существует очень большое их многообразие по принципу действия, функциональным характеристикам, назначению, конструктивному исполнению и т. д. Конечно, все они не могут быть охвачены единой системой конкретных требований, а, следовательно, и единой методикой их испытаний. Как правило, эти требования и методики оговариваются для каждого вида- и типа аппарата соответствующими регламентирующими документами.

Главным требованием к любому виду электрического аппарата является нормальное функционирование в соответствии с конкретным назначением. Нормальное функционирование предполагает удовлетворение в процессе эксплуатации аппарата заранее установленных и совершенно определенных критериальных требований. Это – общее положение, определяющее функциональную пригодность аппарата. Оно складывается из ряда частных требований, обуславливающих работоспособность отдельных узлов и элементов аппарата, причем по содержанию и жесткости требования могут сильно различаться в зависимости от типа аппарата, режимов и условий его эксплуатации. Например, требования по одним и тем же параметрам для автоматического выключателя и я электромагнитного контактора будут различными, поскольку существенно различны и их функциональные назначения. Действительно, автоматические выключатели предназначены для нечастого оперирования, поэтому число выдерживаемых ими коммутационных циклов в режиме коммутирования номинальных токов может быть относительно невелико— $(1-2) \cdot 10^4$ циклов. А для контакторов, предназначенных для частого оперативного управления режимами работы электродвигателей (включение — отключение), требования по этому же параметру значительно более жестки (обычно 10^6 и выше для категории применения АС-3 и 10^5 и выше для категории применения АС-4). Поскольку автоматические выключатели предназначены и для отключения больших токов КЗ (что связано с возникновением мощного дугового разряда в аппарате), их контактно-дугогасительные системы должны быть способны выдерживать высокоинтенсивное термическое воздействие дуги. Для контакторов же это требование относительно слабое, поскольку отключаемые ими токи, как правило, не более десятикратного значения номинального тока $I_{НОМ}$. (Для некоторых специальных условий применения, например в угольной промышленности, эти токи могут достигать 20—25

$I_{НОМ.}$) Кроме того, характерной особенностью автоматических выключателей является возможность длительного нахождения их контактов в замкнутом состоянии (причем и в условиях действия агрессивных сред, влаги, повышенной температуры и т. д.). А это предъявляет жесткие требования к стабильности и уровню переходного сопротивления, что и заставляет применять в качестве контактных материалов благородные металлы и сплавы на их основе. Для контакторов же это требование может быть ослаблено, поскольку при частом оперативном коммутировании тока контактные поверхности могут периодически обновляться (это во многих случаях делает возможным применение в качестве контактных материалов меди или сплавов на ее основе), и т. д.

Следовательно, требования по однотипным параметрам (в данном случае коммутационная и механическая износостойкость контактных узлов) сильно различаются для аппаратов различного назначения. Поэтому всегда выбор принципа действия, устройства и конструкции тех или иных однотипных узлов аппаратов имеет свои специфические особенности. В иных случаях требования, вытекающие из функционального назначения аппаратов различного типа, могут быть вообще не сопоставимы. Достаточно сравнить указанные выше требования, например, с требованиями к параметрам плавких предохранителей как аппаратов одноразового действия или командоаппаратов, контроллеров и др. Вместе с тем для таких различных видов аппаратов, несмотря на существенные их особенности по назначению и конструктивному исполнению, могут быть и однотипные требования. В числе таковых можно указать требования по характеристикам электрической изоляции, допустимым превышениям температуры токоведущих частей и мест их присоединений и других элементов конструкции, по влаго- и пылезащищенности и т. п.

Требования, вытекающие из функционального назначения аппаратов, принципиально отличаются от требований по их конструктивному исполнению. Последние предусматривают простоту и технологичность конструкции, малую материалоемкость и небольшие массогабаритные размеры, удобство монтажа, обслуживания, эксплуатации и др. Обеспечение этих требований достигается, как правило, в процессе разработки аппарата на основе накопленного опыта, расчетов и путем организации испытаний элементов, узлов, макетов и опытных образцов аппаратов по заранее разрабатываемым программам.

Поскольку соответствие аппарата своему функциональному назначению является главным требованием, все остальные требования выступают как дополнительные, но предусматривающие при обязательном удовлетворении главного требования также и обеспечение технико-экономических, эстетических и других показателей, которые в совокупно-

сти выдвигают данное изделие в разряд лучших по сравнению с функционально-однотипными изделиями-аналогами. Эти показатели достигаются непосредственно в процессе разработки и последующей доводки аппаратов.

Независимо от назначения аппаратов и других их особенностей существует ряд общих требований к ним, основными из которых являются следующие.

1. Аппарат в соответствии с его назначением должен выполнять предписанные ему функции четко при номинальных условиях, а также и при некоторых реально возможных отклонениях от этих условий (колебаниях температуры, давления, влажности, состава среды, наличии сторонних магнитных и электрических полей и т. д.).

2. Не должно быть недопустимого перегрева аппарата в целом и его отдельных узлов и элементов, а также мест присоединения к шинпроводам и другим частям электроустановок, причем это требование должно быть удовлетворено в течение заданного срока (полного срока службы или срока межпрофилактического осмотра и ремонта).

3. Потребляемая собственно аппаратом при его функционировании мощность (например, мощность, потребляемая приводом) и рассеиваемая в аппарате мощность должны быть минимальными.

4. При возможных отклонениях параметров цепи и других ненормальных, но допустимых режимах (превышении тока, напряжения) аппарат не должен терять своих функциональных свойств и, если это предусмотрено, должен быть пригодным к выполнению своих функций и после устранения этих отклонений (что может быть возложено на сам аппарат или на другое устройство).

5. Аппарат не должен быть причиной аварийных ситуаций, в результате, например, внутреннего КЗ, перегрева, возникновения дуги и т. д.

6. Аппарат должен быть безопасным в эксплуатации (пожаробезопасным, взрывобезопасным, безопасным от поражения током и т. д.), должен иметь при необходимости блокирующие устройства и сигнализацию при нарушениях нормального состояния.

7. Аппарат должен быть прост в обслуживании, не должен требовать высокой квалификации обслуживающего персонала, должен допускать при необходимости легкий доступ к тем или другим его частям (требующим контроля, наблюдения, профилактики и замены). Аппарат не должен требовать больших усилий для ручного управления.

8. Аппарат должен быть прост и удобен для монтажа и демонтажа, не должен требовать для этого специальных устройств и приспособлений, приложения больших усилий.

9. Надежность работы аппарата должна быть обеспечена на заданном уровне, т. е. аппарат должен функционировать исправно в течение определенного времени с заданной вероятностью при тех или иных известных условиях эксплуатации.

10. Стоимость, материалоемкость, масса и габаритные размеры аппаратов должны быть по возможности минимальными.

11. Должны быть обеспечены равнопрочность и одинаковая износостойкость элементов конструкции аппарата, не подлежащих замене в процессе эксплуатации.

12. Аппарат не должен создавать недопустимых помех (электромагнитных, вибрационных, ударных и т. д.) для других элементов и приборов системы, в которую он встроен.

13. При функционировании аппарат не должен оказывать недопустимо вредного влияния на окружающую среду (образование вредных химических газов, аэрозолей и т. д.) и в этой связи не должен затруднять работу обслуживающего и другого персонала.

14. Аппарат своим присутствием в системе электроснабжения не должен влиять на качество электроэнергии (форму тока, $\cos\varphi$ и т. д.).

15. Аппарат, предназначенный для открытой установки, должен быть эстетичным и должен гармонизировать с общим интерьером комплекса электрооборудования, но не в ущерб функциональным свойствам и другим показателям качества.

Помимо этих общих требований существует и ряд других специальных, вытекающих из специфических условий эксплуатации аппаратов, с которыми может быть связано появление дополнительных дестабилизирующих факторов.

Они обусловлены внешними воздействиями (климатическими, температурными, механическими), а также внутренними процессами, зависящими от особых режимов работы аппаратов. Климатические условия связаны с атмосферным давлением, влажностью, температурой, солнечной радиацией, наличием солей, пыли, песка, промышленных загрязнений, газовым составом — наличием углекислого газа, сероводорода, аммиака и т. п. С климатическими условиями связаны и влияние биологических факторов (грибковых образований, продуктов биохимического обмена веществ, воздействия насекомых, термитов, грызунов и т.). Климатические условия сильно зависят от географического района, времени года и суток. Так, атмосферное давление изменяется в зависимости от метеорологических условий и падает с увеличением высоты над уровнем моря на каждые 1000 м примерно на $1,33 \cdot 10^4$ Па, относительная влажность может изменяться от 40—60 % (сухой жаркий климат) до 90—100% (влажный жаркий климат); температура может изменяться от -60°C (холодный климат) до

50°C (жаркий климат); суточные колебания температуры могут достигать 20—30°C (в горной местности с жарким климатом) и 10—20°C в местности с умеренным и холодным климатом; солнечная радиация в сочетании с высокой температурой среды может вызывать повышение температуры в частях аппаратов (даже 100°C и более в тропических условиях); для пустынь и степей характерно большое содержание абразивного песка и пыли в воздухе, причем возможны бури с большой скоростью ветра (30—40 м/с и более); большая концентрация солей наблюдается в морском тумане; содержание углекислого газа, сероводорода и других активных газов характерно для промышленных центров (металлургические и химические заводы); аммиака — на животноводческих фермах и т. д.

Проявление дестабилизирующего воздействия указанных факторов многообразно. Так, например, изменение атмосферного давления может повлиять на режим теплообмена аппарата с окружающей средой, на формирование, горение и гашение дуги; влажность также может влиять на эти процессы и, кроме того, на коррозионные процессы; высокая температура окружающей среды может отрицательно влиять на тепловой режим работы аппарата; повышение температуры деталей (особенно пластмассовых) под действием солнечной радиации может вызвать необратимые процессы, влияющие на механическую и электрическую прочность; периодические температурные колебания вызывают выпадение росы, образование тумана, а при переходе через 0°C — обледенение, что может отрицательно повлиять на переходное сопротивление контактных соединений. Аналогичным образом может проявляться и воздействие химически активных примесей в среде, например, наличие сероводорода весьма отрицательно влияет на переходное сопротивление контактов даже из серебра и т. д.

Дестабилизирующие факторы могут быть обусловлены и внешними механическими воздействиями — вибрациями, ударами, возникающими при транспортировании, а также в условиях применения аппаратов в мобильных агрегатах и устройствах (самолетах, кораблях, сухопутной транспорте и т. п.). В результате могут возникать ложные срабатывания аппаратов (включение или отключение), нарушения механической прочности. Особенно опасны резонансные явления, которые могут возникать в условиях действия периодических возмущений. Требования к аппаратам с учетом таких специфических условий их эксплуатации специально оговариваются в соответствующих нормативных документах.

Кроме этих общих требований для каждого вида аппарата существуют свои конкретные требования, регламентирующие режимы его работы, параметры и характеристики. Они формируются, с одной стороны, исходя из функциональных назначений, условий эксплуатации аппаратов, с другой — возможностями их удовлетворения на основе реально осущест-

вимых и экономически оправданных конструкторских и технологических решений.

Правильное определение как общих, так и конкретных требований, а также значений параметров и характеристик аппаратов, закрепляемых в последующем в нормативных документах, является весьма ответственным актом, в котором испытания играют определяющую роль. Вначале они устанавливаются по результатам исследований и испытаний, проводимых в основном еще на стадии разработки и с учетом, конечно, априорной информации, предыдущего опыта создания и эксплуатации аналогов и прототипов.

Так как на стадии разработки число испытываемых макетных или опытных образцов, как правило, весьма ограничено (даже могут быть единичные), то становится затруднительным (или же невозможным) накопление статистического материала, необходимого для оценки параметров и характеристик с заданной степенью достоверности. Поэтому в последующем эти требования, параметры и характеристики могут уточняться в процессе промышленного освоения и эксплуатации, но опять же на основе различных видов испытаний.

Таким образом, удовлетворение большой гаммы общих и конкретных требований к аппаратам, среди которых зачастую бывают и противоречивые, достигается не только в результате претворения в жизнь творческих замыслов конструкторов и технологов, но и не в меньшей мере в процессе исследований и испытаний аппаратов на всех этапах их разработки и освоения. Это и предопределяет необходимость правильной и своевременной постановки, организации и осуществления испытаний и исследований аппаратов.

Общие вопросы испытания НВА

Испытание — это «экспериментальное определение количественных и (или) качественных свойств объекта испытаний как результата воздействий на него при его функционировании, при моделировании объекта и (или) воздействий».

Применительно, к техническим изделиям и системам испытание — это процесс выполнения некоторых операций (действий) для определения свойств изделий вообще или по проверке соответствия этих свойств тем или иным требованиям. Первое утверждение означает установление ранее известных характеристик, их фиксацию как таковых. Второе же означает сравнение некоторых, в общем-то ожидаемых, характеристик с оговоренными заранее в соответствующих документах (стандартах, технических условиях, чертежах и т. п.).

Испытание в широком смысле слова, как и любой другой эмпирический познавательный процесс, может включать в себя и пассивное наблюдение, когда исследователь не вмешивается в течение процесса, и активный эксперимент, когда исследователь сознательно ставит объект испытания в определенные условия и изменяет их для установления их влияния на течение процесса и поведение объекта. Последнее предполагает обязательное осуществление измерительных процедур, если ставится цель получения некоторых количественных зависимостей и связей. В технике, говоря об испытании, обычно подразумевают собственно эксперимент, который включает в себя и наблюдение, измерение.

Общей целью любого вида испытаний является получение совокупности некоторых сведений, характеризующих состояние и поведение объекта испытаний в тех или иных условиях и режимах работы. Информация, получаемая в результате испытаний, не всегда может допускать непосредственное использование, а требует определенной обработки, включая в ряде случаев и необходимость применения ЭВМ. Действенность этой информации существенно зависит от правильной постановки и тщательности выполнения самих испытаний и обработки их результатов.

Независимо от объекта испытаний, назначения и вида самих испытаний можно указать ряд общих положений об их организации и проведении.

Любое испытание состоит из трех последовательных стадий: предварительной стадии, осуществления самих испытаний и завершающей стадии. *На первой (предварительной) стадии* формируются цели и задачи, составляются планы действий и программы испытаний, определяется примерный состав необходимого испытательного оборудования. *На второй стадии* осуществляются выбор, проверка и подготовка уточненного состава испытательного оборудования и измерительного комплекса и выполняются сами процедуры измерений. *На третьей стадии* проводятся обработка результатов измерений, их анализ и обобщение, выработка выводов и рекомендаций.

Результативность испытаний зависит от тщательности выполнения работ на всех этих стадиях, однако она наиболее рельефно обнаруживается на последней стадии. Поэтому этой части следует уделить особое внимание и следить за тем, чтобы заключения по результатам проведенных испытаний четко соответствовали поставленным целям и задачам, выводы достаточно полно отвечали на все вопросы, для решения которых были поставлены данные.



Рисунок 4.1. Классификация воздействий на электрический аппарат.

Термины и определения основных понятий, видов контроля и испытаний регламентированы ГОСТ 16504-81. В соответствии с этим ГОСТ имеется много видов технического контроля и испытаний в зависимости от целей, методов, условий их проведения и т.д.

Систематизация видов испытаний по основным признакам

Назначение испытаний: исследовательские, контрольные, сравнительные, определительные.

Уровень проведения испытаний: государственные, межведомственные, ведомственные.

Этапы разработки продукции: доводочные, предварительные, приемочные.

Испытания готовой продукции: квалификационные, предъявительские, приемо – сдаточные, периодические, инспекционные, типовые, аттестационные, сертификационные.

Условия и место проведения испытаний: лабораторные, стендовые, полигонные, натурные, испытания с использованием моделей, эксплуатационные.

Продолжительность испытаний: нормальные, ускоренные, сокращенные.

Вид воздействия: механические, климатические, термические, радиационные, электрические, электромагнитные, магнитные, химические, биологические.

Результат воздействия: неразрушающие, разрушающие, испытания на стойкость, испытания на прочность, испытания на устойчивость

Определяемые характеристики объекта: функциональные, испытания на надежность, испытания на транспортабельность, граничные испытания, технологические испытания.

Определение потери напряжения в неполнофазных сетях

Приведенные выше методы определения потери напряжения в трехфазной сети даны в предположении равномерной нагрузки всех фаз в отдельных точках сети, что имеет место, если нагрузкой являются трехфазные электродвигатели. В этом случае сеть может выполняться без нулевого провода.

Для сетей с осветительной нагрузкой обычно применяется нулевой провод, по которому протекает ток несимметрии.

Проектирование осветительных сетей обычно ведут таким образом, что осветительная нагрузка равномерно распределяется по фазам, и поэтому с достаточной точностью расчет может выполняться, как для симметричной трехфазной сети.

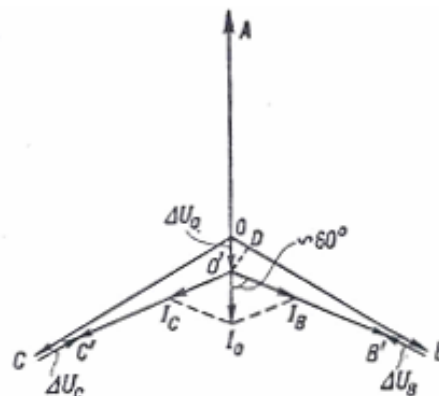
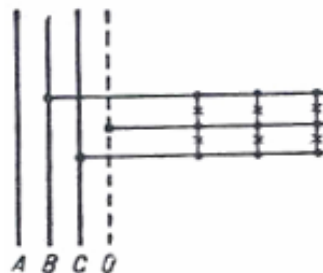


Рисунок 4.2. Двухфазное ответвление и векторная диаграмма двухфазного ответвления.

Практический интерес может представить двухфазное ответвление от четырехпроводной линии (рисунок 4.2), применяемое по соображениям экономии цветных металлов в тех случаях, когда сечения проводов четырехпроводной сети, полученные по потере напряжения или плотности тока приходится увеличивать по условию механической прочности.

Рассмотрим этот случай, полагая, что нагрузка обеих фаз одинакова и $\cos \varphi = 1$.

Векторная диаграмма, соответствующая этому случаю, изображена на рис. 6-13. Здесь $OA = OB = OC = U_A = U_B = U_C$ — фазные напряжения в начале ответвления и I_d и I_c — нагрузки фаз B и C .

Откладываем от точек B и C по направлению к точке O потерн напряжения $\Delta U_B = I_B r_b$ и $\Delta U_C = I_C r_c$, где r_b и r_c — соответственно активные сопротивления фаз B и C . Откладываем от точки O потерю напряжения в нулевом проводе $OO' = \Delta U_0 = I_0 r_0$ где r_0 — сопротивление нулевого провода, а I_0 — ток в нулевом проводе, при равенстве токов I_a и I_b численно равный фазному току, как это можно видеть из диаграммы токов, принимая угол $I_0 O I_B$ близким к 60° .

Нейтраль диаграммы напряжений благодаря наличию падения напряжения ΔU_0 смещается в точку O' . Напряжения у приемников тока при этом изображаются векторами $O'B'$ и $O'C'$.

Потеря напряжения в проводе фазы B и нулевом проводе (а также в проводе фазы C и нулевом проводе) при заданных одинаковых токах в фазном и нулевых проводах и одинаковых сечениях фазных и нулевых проводов, т. е. при $F_B = F_c = F_0 = F$, найдется приближенно из векторной диаграммы:

$$\Delta U_{oi} = \Delta U_B + \Delta U_0 \cos 60^\circ = BB' + OD$$

или подставив вместо сопротивлений $r_b = r_c = r_o = r$ их значение, выраженное через длину L , проводимость γ и сечение F , $r = \frac{l}{\gamma F}$, получим:

$$\begin{aligned} \Delta U_{\phi 0} &= \frac{\Sigma I l}{\gamma F} + \Sigma I_0 \cos 60^\circ \frac{l}{\gamma F} = \\ &= \frac{\Sigma I l}{\gamma F} + \frac{\Sigma I l}{\gamma F} \cdot \frac{1}{2} = 1,5 \frac{\Sigma I l}{\gamma F}. \end{aligned}$$

Выразив ток I через мощность двух ответвлений

$$I = \frac{P}{2U_\phi} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{P}{U}$$

получим потерю напряжения в вольтах:

$$\Delta U_{\phi 0} = \frac{1,5 \sqrt{3} \Sigma P l}{2 U \gamma F} = \frac{0,75 \sqrt{3}}{\gamma F U} \Sigma P l,$$

или в процентах

$$\Delta U^0 /_0 = \frac{\Delta U_{\phi 0}}{U_{\phi}} 100 = \frac{\sqrt{3} \Delta U_{\phi 0}}{U} \cdot 100;$$

$$\Delta U^0 /_0 = \frac{2,25 \cdot 100 \Sigma P l}{\gamma F U^2}.$$

Второй практически часто встречающийся случай - однофазное ответвление от четырехпроводной сети. Такие ответвления выполняют от четырехпроводной сети для вводов и внутренней проводки в домах, причем фазный и нулевой провод и в этом случае делают одинакового сечения, так как токи в них одинаковы.

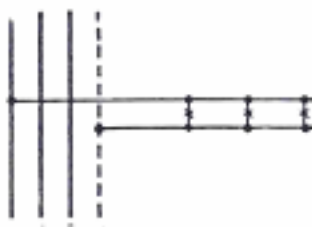


Рисунок 4.3. Однофазное ответвление.

Расчет однофазного ответвления не отличается от расчёта сети постоянного тока и производится по формулам с подстановкой фазового U_{ϕ} или линейного напряжения. Потеря напряжения:

$$\Delta U_{\phi 0} = \frac{2}{\gamma F} \Sigma I l,$$

или, подставляя

$$\Sigma I_{\phi 0} = \frac{1,5 \Sigma P_{\phi}}{U_{\phi}} \Sigma l = \frac{1,5 \Sigma P_{\phi}}{U_{\phi}} \Sigma l,$$

$$I = \frac{P_{\phi}}{U_{\phi}} = \frac{P_{\phi}}{U_{\phi}},$$

или в процентах

$$\Delta U^0 /_0 = \frac{\Delta U_{\phi 0}}{U_{\phi}} 100 = \frac{\Delta U_{\phi 0} \sqrt{3}}{U} 100 = \frac{2 \sqrt{3} \sqrt{3} \cdot 100}{\gamma F U^2} \Sigma P l,$$

что дает:

$$\Delta U^0 /_0 = \frac{6 \cdot 100}{\gamma F U^2} \Sigma P l.$$

Так как осветительная сеть обычно состоит из участков, выполненных четырьмя проводами, и двухфазных и однофазных ответвлений, то для

определения потери напряжения от питательного пункта до какой-либо точки сети необходимо сложить фазные потерн напряжения на отдельных участках. Удобнее всего вести расчет по формулам, в которых потеря напряжения выражается в процентах.

Пример: Найти наибольшую потерю напряжения в осветительной уличной сети трехфазного тока ($\cos\varphi = 1$) с номинальным напряжением 380/220 В, однолинейная и развернутая схемы которой даны на рис, 6-15,а и б.

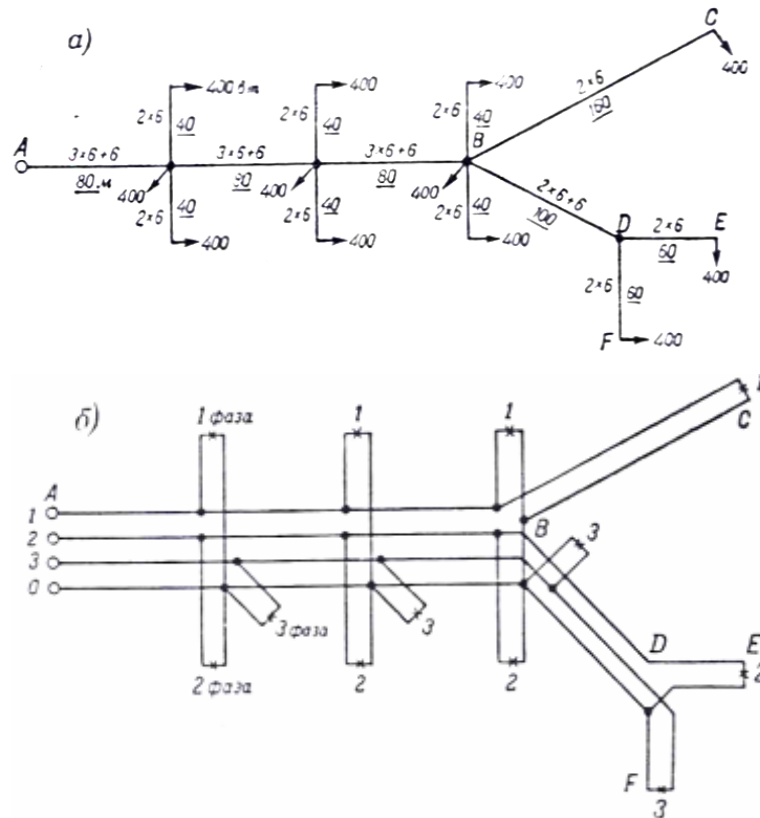


Рисунок 4.4. Схема к примеру

От питательного пункта *A* до точки *B* линия выполнена четырьмя проводами (три фазы и нуль), на участке *BO* — тремя проводами (две фазы и нуль)> на остальных — двумя проводами (фаза и нуль).

Нагрузки выражены в ваттах, расстояния—в метрах, Число проводов и их сечения даны на схеме рис. 6-15,д.

На схеме рис. 6-15,б показано присоединение нагрузок к отдельным фазам, обозначенным цифрами, /, 2 и 3. Провода на всех участках медные.

Решение:

Потеря напряжения на участке *AB* (*a* процентах) по формуле (6-266) составит:

$$\Delta U_{AB}\% = \frac{100}{\gamma F U_H^2} \Sigma Pl = \frac{100}{53 \cdot 6 \cdot 380^2} (4\,800 \cdot 80 + 3\,600 \cdot 80 + 2\,400 \cdot 80) = 1,89\%.$$

Потеря напряжения на участке BC (в процентах) по формуле (С-38):

$$\Delta U_{BC}\% = \frac{6 \cdot 100}{\gamma F U_H^2} \Sigma Pl = \frac{6 \cdot 100 \cdot 400 \cdot 160}{53 \cdot 6 \cdot 380^2} = 0,84\%.$$

Потеря напряжения на участке BD (в процентах) по формуле (6-36):

$$\Delta U_{BD}\% = \frac{2,25 \cdot 100}{\gamma F U_H^2} \Sigma Pl = \frac{2,25 \cdot 100 \cdot 800 \cdot 100}{53 \cdot 6 \cdot 380^2} = 0,39\%.$$

Потеря напряжения на участке DE или DF (в процентах) по формуле (6-38):

$$\Delta U_{DE}\% = \Delta U_{DF}\% = \frac{6 \cdot 100 \cdot 400 \cdot 60}{53 \cdot 6 \cdot 380^2} = 0,31\%.$$

Потеря напряжения до точки C (в процентах):

$$\Delta U_{AC}\% = 1,89 + 0,84 = 2,73\%$$

и до точки E или F

$$\Delta U_{AE}\% = \Delta U_{AF}\% = 1,89 + 0,39 + 0,31 = 2,59\%.$$

Наибольшая потеря напряжения имеет место до точки C .

Определение сечений проводов и кабелей по заданной величине потери напряжения при постоянном сечении вдоль линии

В предыдущих параграфах рассматривались • методы определения потери напряжения либо при заданных сечениях проводов, либо при сечениях, определенных предварительно по экономической -плотности тока. При этом могут быть такие случаи, когда выбранные сечения проводов не обеспечивают допустимой потери напряжения, вследствие чего сечения приходится увеличивать и затем делать снова поверочный расчет. Чаще всего приходится определять сечение линии по допустимой потере напряжения в сетях до 1 000 а, где по экономической плотности тока выбор в большинстве случаев не делается. Поэтому для упрощения задачи желательно иметь метод определения сечения проводов и кабелей по заданной допустимой величине потери напряжения.

Такой метод был предложен проф. Степановым В. Н., причем в этом методе по всей длине линии сечение проводов принимается постоянным. Хотя по сравнению со ступенчатым (убывающим по длине) сечением это и не всегда бывает с точки зрения затраты металла выгодным, однако во многих случаях выбор одинакового сечения по линии оправдывается прак-

тическими соображениями (однотипность опор, зажимов; лучшее использование строительной длины проводов).

Решение этой задачи в линиях постоянного тока или в тех линиях переменного тока, в которых можно пренебречь индуктивным сопротивлением, весьма просто. Сечение определяется непосредственно из формул и зависит от суммы моментов тока, деленной на проводимость и допустимую величину потери напряжения.

В линиях переменного тока с большими значениями индуктивного сопротивления потеря напряжения может рассматриваться как состоящая из двух частей: части, обусловленной активными сопротивлениями, и части обусловленной индуктивными сопротивлениями. Поэтому для линии с несколькими нагрузками можно написать:

$$\Delta U = \sqrt{3} \Sigma (I_a r + I_r x) = \sqrt{3} \Sigma I_a r + \\ + \sqrt{3} \Sigma I_r x = \Delta U_a + \Delta U_r,$$

т. е. потеря напряжения зависит не только от активных сопротивлений r , но и от индуктивных сопротивлений x , причем зависимость последних от сечения проводов более сложна, чем для активных сопротивлений.

Действительно индуктивное сопротивление, как это видно из формулы:

$$x_0 = \omega \left(4,6 \lg \frac{D}{d/2} + 0,5 \right) 10^{-4} [\text{ом/км}]$$

зависит от стоящих под знаком логарифма диаметра провода d и расстояния D между проводами.

Зависимость активного сопротивления от сечения провода определяется гиперболической кривой, в то время как индуктивное сопротивление зависит от сечения весьма мало и имеет значение, колеблющееся для воздушных линий в пределах от 0,35 до 0,45 ом/км.

Учитывая это обстоятельство, можно задаться в начале расчета некоторой средней величиной индуктивного сопротивления (например, $x = 0,4$ ом/км — для воздушных линий) и подсчитать часть потери напряжения, обусловленную этим сопротивлением:

$$\Delta U_r = \sqrt{3} x_0 \Sigma I_r l.$$

Зная общую величину допустимой потери напряжения $\Delta U_{\text{доп}}$ и вычитая ΔU_r из $\Delta U_{\text{доп}}$, находим величину потери напряжения, которая может быть допущена в активных сопротивлениях линии, т. е.

$$\Delta U_{a \text{ доп}} = \Delta U_{\text{доп}} - \Delta U_r.$$

Тогда в предположении постоянного сечения проводов вдоль линии можем написать:

$$\gamma \Omega^{\alpha} \omega_{\text{оп}} = \sqrt[3]{3} \Sigma I^{\alpha} l = \frac{I_k}{\sqrt[3]{3}} \Sigma I^{\alpha} l = \frac{I_k \Omega}{\Sigma b l}.$$

Отсюда определяем сечение проводов

$$F = \frac{\sqrt[3]{3}}{\gamma \Delta U_{\text{а доп}}} \Sigma I^{\alpha} l = \frac{\Sigma P l}{\gamma \Delta U_{\text{а доп}} U}.$$

Полученное сечение провода должно быть округлено до стандартного, после чего необходимо определить потерю напряжения с учетом действительных значений γ_0 и x_{ii} для

выбранного сечения, поскольку ранее x_0 было принято условно. Если полученная величина потери напряжения будет меньше допустимой, то выбранные сечения проводов принимаются; если же потеря напряжения окажется больше допустимой, необходимо расчет провести снова, увеличив соответственно сечение провода. Разумеется, повторный расчет не требуется, если предварительно принятое значение сопротивления x_0 больше фактически полученного x_0 для выбранного сечения.

Выбранные изложенным выше методом сечения проводов и кабелей по допустимой потере напряжения должны быть проверены по экономической плотности тока и по нагреву рабочим током и в случае необходимости увеличены.

Пример: воздушная сеть трехфазного тока с номинальным напряжением 380 В выполняется алюминиевыми проводами со средним геометрическим расстоянием между проводами 600 мм. На схеме сети даны нагрузки в киловаттах и их коэффициенты мощности, а также расстояние между точками приложения нагрузок в метрах.

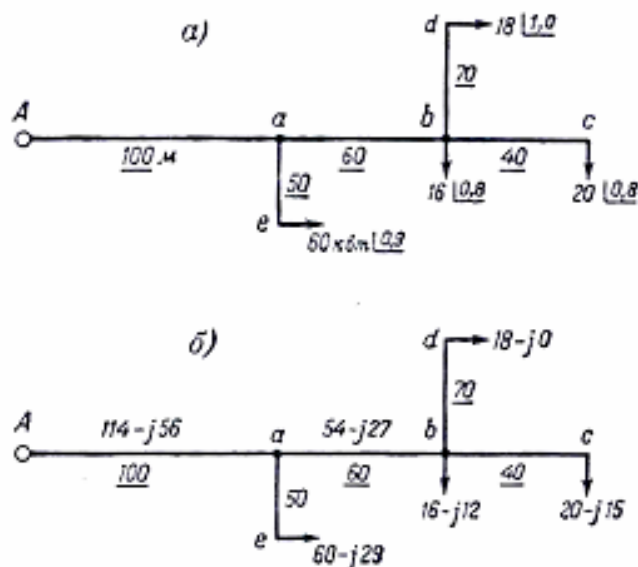


Рисунок 4.5. Схема к примеру.

Определить сечение проводов магистрали Ac (от питающего пункта A до точки c) и ответвлений ae и bd исходя из постоянного сечения проводов вдоль магистрали. Сечения проводов ответвлений определять, а зависимости от найденных сечений проводов магистрали.

Допустимую потерю напряжения принять равной 5% номинального напряжения сети.

К сети присоединены мелкие промышленные предприятия со временем использования максимума нагрузки 3 500 ч.

Решение:

Представляем заданные нагрузки в комплексном виде и находим распределение их по участкам сети (рисунок 4.5, б).

Находим допустимую потерю напряжения в вольтах:

$$\Delta U_{\text{доп}} = \frac{5 \cdot 380}{100} = 19 \text{ в.}$$

Определяем сечение проводов магистрали Ac : задаемся средним значением индуктивного сопротивления линий:

$$x_0 = 0,35 \text{ ом/км.}$$

Реактивная составляющая потери напряжения

$$\Delta U_{rAc} = \frac{x_0 \Sigma Q l}{U_n} = \frac{0,35 (15 \cdot 0,04 + 27 \cdot 0,06 + 56 \cdot 0,1)}{0,38} = 7,2 \text{ в.}$$

Активная составляющая допустимой потери напряжения

$$\Delta U_{aAc} = \Delta U_{\text{доп}} - \Delta U_{rAc} = 19 - 7,2 = 11,8 \text{ в.}$$

Тогда сечение проводов магистрали

$$F_{Ac} = \frac{\Sigma P l}{\gamma U_n \Delta U_{aAc}} = \frac{20 \cdot 40 + 54 \cdot 60 + 114 \cdot 100}{32 \cdot 0,38 \cdot 11,8} = 107 \text{ мм}^2.$$

Принимаем провод марки А-120, для которого

$$r_0 = 0,27 \text{ ом/км и } x_0 = 0,297 \text{ ом/км.}$$

Определяем сечения проводов ответвлений. Действительная потеря напряжения на участке Aa :

$$\Delta U_{Aa} = \frac{(Pr_0 + Qx_0) l}{U_n} = \frac{(114 \cdot 0,27 + 56 \cdot 0,297) 0,1}{0,38} = 12,5 \text{ в.}$$

Допустимая потеря напряжения для ответвления ae

$$\Delta U_{ae} = \Delta U_{\text{доп}} - \Delta U_{Aa} = 19 - 12,5 = 6,5 \text{ в.}$$

Ответвление ae

$$\Delta U_{rae} = \frac{0,35 \cdot 29 \cdot 0,05}{0,38} = 1,33 \text{ в};$$

$$\Delta U_{aae} = \Delta U_{ae} - \Delta U_{rae} = 6,5 - 1,33 = 5,17 \text{ в};$$

$$F_{ae} = \frac{Pl}{U_n \cdot U_{aae}} = \frac{60 \cdot 50}{32 \cdot 0,38 \cdot 5,17} = 49 \text{ мм}^2.$$

Принимаем провод марки А-50, для которого $x_0 = 0,325 \text{ ом/км}$ меньше принятого $0,35 \text{ м/км}$.

Ответвление bd .

Действительная потеря напряжения на участке ab

$$\Delta U_{ab} = \frac{(Pr_0 + Qx_0) l}{U_n} = \frac{(54 \cdot 0,27 + 27 \cdot 0,297) \cdot 0,06}{0,38} = 3,55 \text{ в};$$

$$\Delta U_{bd} = 6,5 - 3,55 = 2,95 \text{ в}.$$

Так как $\cos \varphi = 1$, то $Q=0$ и $\Delta U_{rbd}=0$, следовательно:

$$F_{bd} = \frac{18 \cdot 70}{32 \cdot 0,38 \cdot 2,95} = 35 \text{ мм}^2.$$

Принимаем провод марки А-35.

Проверяем выбранные сечения проводов по нагреву.

Наибольший рабочий ток будет протекать на головном участке Аа, равный:

$$I_{Aa} = \frac{\sqrt{114^2 + 56^2}}{\sqrt{3 \cdot 0,38}} = 193 \text{ а};$$

на участке ab

$$I_{ab} = \frac{\sqrt{54^2 + 27^2}}{\sqrt{3 \cdot 0,38}} = 92 \text{ а}.$$

Допустимый ток по нагреву для провода А-120 (табл. П-20) составляет 370 а , что значительно превышает действительные токи.

В соответствии с разделом 1-2-24а ПУЭ сечения сети проверке по экономической плотности тока не подлежат.

Методы определения сечений проводов и кабелей по заданной величине потери напряжения при убывающей величине сечения вдоль линии

Выше указывалось, что выбор постоянного по величине сечения провода вдоль линии, несмотря на ряд практических преимуществ, не всегда приводит к экономичному решению как с точки зрения затраты цветного металла, так и с точки зрения потерь электрической энергии.

Ниже рассматриваются методы определения сечения проводов по заданной величине потери напряжения при убывающей величине сечения вдоль линии.

Определение сечения по условию наименьшей затраты цветного металла

Пусть для линии, имеющей несколько нагрузок, требуется определить сечения проводов отдельных участков таким образом, чтобы общая величина потери напряжения а линии не превосходила допустимой величины и чтобы найденные сечения проводов удовлетворяли условию минимума затрат проводникового металла.

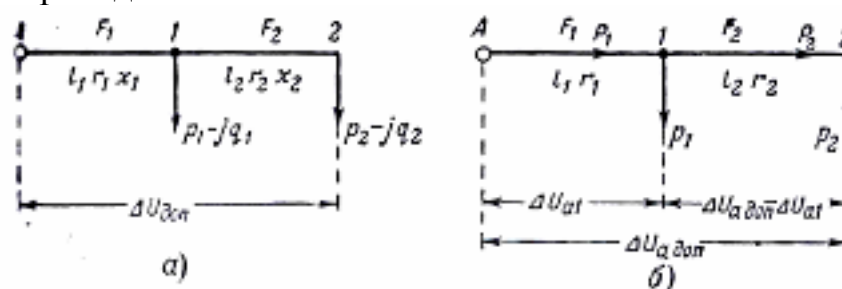


Рисунок 4.6. Схемы к расчету на минимум проводникового материала.

Для простоты выводов рассмотрим линию с двумя нагрузками (рисунок 4.6, а) и полученные результаты обобщим для линии с многими нагрузками.

Применяя прием, описанный в предыдущем параграфе сдвигая средней величиной индуктивного сопротивления x_0 [ом/км] и определяем часть общей потери напряжения, обусловленную индуктивными сопротивлениями участков.

Вычитая из общей заданной допустимой величины потери напряжения для всей линии часть потерн напряжения в индуктивных сопротивлениях, получим величину потери напряжения, которая может быть допущена в активных сопротивлениях и по которой можно уже непосредственно определить сечения проводов по минимуму затраты цветного металла.

Таким образом, задача сводится к определению сечения проводов линии, имеющей только активные сопротивления и активные составляющие нагрузок (рис. 4.6,б), так как реактивные составляющие нагрузок, как связанные с индуктивными сопротивлениями, которые в данном случае уже учтены, не будут участвовать в расчете.

Предположим, что величины междофазных активных потерь напряжения на отдельных участках, при которых получается минимум затраты цветного металла на всю линию, нам известны и составляют: на первом

участке ΔU_{a1} , а на втором участке – $\Delta U_{a \text{ доп}} - \Delta U_{a1}$, где - $\Delta U_{a \text{ доп}}$ - общая допустимая потеря в активном сопротивлении, равная $\Delta U_{a \text{ доп}} = \Delta U_{\text{доп}} - \Delta U_{\Gamma}$. Тогда сечения проводов отдельных участков линии выразятся так:

$$F_1 = \frac{P_1 l_1}{\gamma \Delta U_{a1} U_n} \text{ и } F_2 = \frac{P_2 l_2}{\gamma (\Delta U_{a \text{ доп}} - \Delta U_{a1}) U_n},$$

а объем металла для всех трех фаз

$$V = 3F_1 l_1 + 3F_2 l_2 = \frac{3P_1 l_1^2}{\gamma \Delta U_{a1} U_n} + \frac{3P_2 l_2^2}{\gamma (\Delta U_{a \text{ доп}} - \Delta U_{a1}) U_n}.$$

В этом выражении переменной величиной, от которой зависит объем металла, является ΔU_{a1} ; остальные величины в формуле постоянны. Поэтому для получения наименьшего объема металла, а следовательно, и веса проводов надо взять от выражения V , представляющего собой функцию переменной ΔU_{a1} , первую производную по ΔU_{a1} и приравнять ее нулю, т. е.

$$\frac{dV}{d(\Delta U_{a1})} = -\frac{3P_1 l_1^2}{\gamma (\Delta U_{a1})^2 U_n} + \frac{3P_2 l_2^2}{\gamma (\Delta U_{a \text{ доп}} - \Delta U_{a1})^2 U_n} = 0,$$

или

$$\frac{P_1 l_1^2}{\gamma (\Delta U_{a1})^2 U_n} = \frac{P_2 l_2^2}{\gamma (\Delta U_{a \text{ доп}} - \Delta U_{a1})^2 U_n}.$$

Умножив левую часть равенства на

$$\frac{P_1}{\gamma P_1 U_n},$$

а правую на

$$\frac{P_2}{\Delta P_2 U_n}$$

получим:

$$\frac{1}{P_1} \left(\frac{P_1^2 l_1^2}{\gamma^2 (\Delta U_{a1})^2 U_n^2} \right) = \frac{1}{P_2} \left(\frac{P_2^2 l_2^2}{\gamma^2 (\Delta U_{a \text{ доп}} - \Delta U_{a1})^2 U_n^2} \right).$$

Заменив выражение в скобках через F_1^2 и F_2^2 , получим:

$$\frac{F_1^2}{P_1} = \frac{F_2^2}{P_2},$$

или

$$\frac{F_1}{\sqrt{P_1}} = \frac{F_2}{\sqrt{P_2}} = k_p,$$

откуда

$$F_1 = k_p \sqrt{P_1}; \quad F_2 = k_p \sqrt{P_2}.$$

Аналогичные зависимости могут быть получены и для линии с многими нагрузками. Из этих зависимостей видно, что сечение провода на любом участке при выполнении условия минимальной затраты металла должно быть пропорционально корню квадратному из активной мощности.

Для определения значения k_p по заданным величинам пользуемся выражением активной потери напряжения

$$\Delta U_a = \frac{P_1 l_1}{\gamma F_1 U_H} + \frac{P_2 l_2}{\gamma F_2 U_H} = \frac{\sqrt{P_1}}{F_1} \cdot \frac{\sqrt{P_1} l_1}{\gamma U_H} + \frac{\sqrt{P_2}}{F_2} \cdot \frac{\sqrt{P_2} l_2}{\gamma U_H},$$

заменяя

$$\frac{\sqrt{P_1}}{F_1} = \frac{\sqrt{P_2}}{F_2} = \frac{1}{k_p},$$

получим:

$$\Delta U_a = \frac{\sqrt{P_1} \cdot l_1}{\gamma k_p U_H} + \frac{\sqrt{P_2} \cdot l_2}{\gamma k_p U_H} = \frac{1}{\gamma k_p U_H} (\sqrt{P_1} \cdot l_1 + \sqrt{P_2} \cdot l_2),$$

откуда, полагая $\Delta U_a = \Delta U_{a \text{ доп}}$, найдем:

$$k_p = \frac{1}{\gamma \Delta U_{a \text{ доп}} U_H} (\sqrt{P_1} \cdot l_1 + \sqrt{P_2} \cdot l_2),$$

или для линии с многими нагрузками

$$k_p = \frac{1}{\gamma \Delta U_{a \text{ доп}} U_H} \sum \sqrt{P} \cdot l.$$

Определив k , находят течение проводов на отдельных участках, удовлетворяющие требованию минимума затрат цветного металла.

При выражении нагрузок токами получаем аналогично:

$$F_1 = k_i \sqrt{I_{a1}}; \quad F_2 = k_i \sqrt{I_{a2}}$$

где

$$k_i = \frac{\sqrt{3}}{\gamma \Delta U_{a \text{ доп}}} \sum \sqrt{I_a} \cdot l.$$

Следует иметь в виду, что коэффициенты k_p и k_i не равны друг другу.

Полученные сечения проводов округляют до стандартных, причем обычно на головных участках округление производится в сторону ближайшего большего стандартного сечения провода, а на конечных – в сторону ближайших меньших стандартных сечений проводов.

Для принятых сечений проводов делают проверку по действительным значениям ε_0 и XQ на допустимую потерю напряжения и допустимую нагрузку током по нагреву и в случае надобности изменяют сечения на некоторых участках.

Определение сечения по условию постоянства плотности тока

Для определения сечения на отдельных участках линии по допустимой потере напряжения при условии постоянства плотности тока на всех участках для схемы рисунка 4.6 напишем выражение допустимой активной потери напряжения для всей линии:

$$\Delta U_{a \text{ доп}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{a1} l_1}{\gamma F_1} + \frac{\sqrt{3} \cdot I_{a2} l_2}{\gamma F_2} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_1 \cos \varphi_{A1} l_1}{\gamma F_1} + \frac{\sqrt{3} \cdot I_2 \cos \varphi_{12} l_2}{\gamma F_2}.$$

Задавшись на всех участках согласно условию постоянной плотности тока

$$j_{\text{пост}} = \frac{I_1}{F_1} = \frac{I_2}{F_2},$$

получим:

$$\Delta U_{a \text{ доп}} = \frac{\sqrt{3} \cdot j_{\text{пост}}}{\gamma} (\cos \varphi_{A1} l_1 + \cos \varphi_{12} l_2),$$

откуда

$$j_{\text{пост}} = \frac{\gamma \Delta U_{a \text{ доп}}}{\sqrt{3} (\cos \varphi_{A1} l_1 + \cos \varphi_{12} l_2)},$$

или для линии с любым числом нагрузок

$$j_{\text{пост}} = \frac{\gamma \Delta U_{a \text{ доп}}}{\sqrt{3} \sum (\cos \varphi l)}.$$

Определив $j_{\text{пост}}$, находят сечение проводов для каждого участка из соотношении $F = \frac{I}{j_{\text{пост}}}$, после чего делается проверка на допустимую потерю напряжения для фактических значений r_0 и x_0 и допустимый по нагреву ток нагрузки.

Область применения рассмотренных методов

Анализ рассмотренных методов расчета сетей показывает, что линии, рассчитанные по наименьшему расходу цветного металла, имеют и наименьшую величину капитальных затрат на ее сооружение, а линии, рассчитанные на постоянную плотность тока,— наименьшие потери мощности и энергии.

Поэтому первый метод (наименьших затрат металла) применим для нагрузок с малым числом часов использования максимума, так как эксплуатационные расходы в этом случае в основном определяются отчислениями от капитальных затрат.

Наоборот, метод постоянной плотности тока должен применяться для нагрузок с большим числом часов использования максимума, так как в этом случае следует экономить потерн электрической энергии.

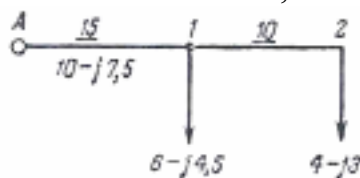
Метод расчета сети, рекомендуемой ПУЭ, по экономической плотности тока учитывает главнейшие факторы, влияющие на экономичность сооружения, и поэтому является основным. Однако сечение проводов, выбранное по этому методу, может не обеспечить допустимой потери напряжения, поэтому предварительно следует определить плотность тока $I_{\text{пост}}$, обеспечивающую заданную потерю напряжения. Если полученное значение $I_{\text{пост}}$ будет меньше экономической плотности тока $I_{\text{э}}$, то принимается $I_{\text{пост}}$, если $I_{\text{пост}} > I_{\text{э}}$, то принимается экономическая плотность тока.

Для более точной оценки экономичности запроектированной сети, а также для сетей сложной конфигурации должны быть выполнены технико-экономические подсчеты с определением капитальных затрат, потерь электрической мощности и энергии и эксплуатационных расходов для нескольких возможных вариантов.

Сказанное иллюстрируется приведенными ниже примерами.

Пример

а) Определить сечения сталеалюминиевых проводов воздушной линии передачи трехфазного тока напряжением 35 кВ, питающих два промышленных предприятия по схеме, изображенной на рисунке



4.7.

Рисунок 4.7. Схема к примеру.

На схеме даны нагрузки (в МВт и МВАр) , а расстояния (в км).

Коэффициент мощности потребителей $\cos\varphi = 0,8$. Расстояние между осями горизонтально расположенных проводов линии 3,0 м.

Допустимая потеря напряжения 8%. Время использования наибольшей нагрузки $T = 2\,800$ ч. Расчет произвести по методу постоянной плотности тока и наименьшего расхода цветного металла с проверкой по экономической плотности тока. Для выбора наивыгоднейшего решения произвести технико-экономический расчет, принимая стоимость установленного 1 кВт на электростанции 1500 руб/кВт стоимость потерян-

ного 1 кВт·ч электроэнергии 8 коп/кВт·ч, отчисления на амортизацию и ремонт линии 4,0 %.

Стоимость 1 км линии для сталеалюминевых проводов сечением 70, 95, 150, 185 и 240 мм² составляет, соответственно, 55, 5, 60, 65 и 75 тыс. руб.

б) Ту же задачу решить для случая, если предприятия имеют число часов использования наибольшей нагрузки, равное 5500.

Решение:

а) Допустимая потеря напряжения

$$\Delta U_{\text{доп}} = \frac{8 \cdot 35 \cdot 000}{100} = 2 \cdot 800 \text{ в.}$$

Приняв среднее значение реактивного сопротивления линии $x_0 = 0,4 \text{ ом/км}$, находим:

$$\Delta U_r = \frac{3 \cdot 000 \cdot 10 + 7 \cdot 500 \cdot 15}{35} \cdot 0,4 = 1 \cdot 620 \text{ в.}$$

Допустимая потеря напряжения от активных нагрузок

$$\Delta U_{a \text{ доп}} = 2 \cdot 800 - 1 \cdot 620 = 1 \cdot 180 \text{ в.}$$

Определяем плотность $I_{\text{пост}}$, при которой будет обеспечиваться указанная потеря напряжения:

$$I_{\text{пост}} = \frac{\Delta U_{a \text{ доп}}}{\sqrt{3} \Sigma (l \cos \varphi)} = \frac{1 \cdot 180 \cdot 32}{\sqrt{3} (15 + 10) \cdot 0,8 \cdot 10^3} = 1,1 \text{ а/мм}^2.$$

Так как экономическая плотность тока для $T=2 \cdot 300 \text{ ч}$, $i_3 = 1,3 \text{ а/мм}^2 > I_{\text{пост}} = 1,1 \text{ а/мм}^2$, то экономическое сечение не может обеспечить допустимой потери напряжения, и для определения сечения проводов следует принять плотность тока $1,1 \text{ а/мм}^2$. Токи на участках:

$$I_{A1} = \frac{\sqrt{10 \cdot 000^2 + 7 \cdot 500^2}}{\sqrt{3} \cdot 35} = 206 \text{ а;}$$

$$I_{12} = \frac{\sqrt{4 \cdot 000^2 + 3 \cdot 000^2}}{\sqrt{3} \cdot 35} = 82,6 \text{ а.}$$

Сечения проводов:

$$F_{A1} = \frac{206}{1,1} = 188 \text{ мм}^2 - \text{принимаем АС-185;}$$

$$r_0 = 0,17 \text{ ом/км;}$$

$$F_{12} = \frac{82,6}{1,1} = 75 \text{ мм}^2 - \text{принимаем АС-70;}$$

$$r_0 = 0,45 \text{ ом/км.}$$

Определяем сечения по условию наименьшего расхода цветного металла:

$$k_p = \frac{\Sigma \sqrt{P} \cdot l}{\sqrt{U_n} \Delta U_{a \text{ доп}}} = \frac{(\sqrt{10 \cdot 000} \cdot 15 + \sqrt{4 \cdot 000} \cdot 10) \cdot 10^3}{32 \cdot 35 \cdot 1 \cdot 180} = 1,6.$$

Сечения проводов:

$$F_{A1} = 1,6 \sqrt{10\,000} = 160 \text{ — принимаем АС-150;}$$

$$r_0 = 0,21 \text{ ом/км;}$$

$$F_{12} = 1,6 \sqrt{4\,000} = 101 \text{ — принимаем АС-95;}$$

$$r_a = 0,33 \text{ ом/км.}$$

Для окончательного выбора варианта производим технико-экономический подсчет для обоих вариантов.

Таблица 4.1

Наименование технико-экономических показателей	Вариант 1 (постоянство плотности тока)	Вариант 2 (наименьший расход металла)
Потери мощности, кВт	$3 \cdot (206^2 \cdot 0,17 \cdot 15 + 82,6^2 \cdot 0,45 \cdot 10) = 415$	$3 \cdot (206^2 \cdot 0,21 \cdot 15 + 82,6^2 \cdot 0,33 \cdot 10) = 468$
Стоимость потерь электрической энергии (при $\tau=1800$ ч), тыс. руб.	$10^{-3} \cdot 0,08 \cdot 1800 \cdot 415 = 60$	$10^{-3} \cdot 0,08 \cdot 1800 \cdot 468 = 68$
Стоимость линий, тыс. руб.	$65 \cdot 15 + 55 \cdot 10 = 1525$	$60 \cdot 15 + 55 \cdot 10 = 1450$
Стоимость добавочной мощности на электростанции для покрытия потерь, тыс. руб.	$1,5 \cdot 415 = 624$	$1,5 \cdot 468 = 702$
Полная величина капитальных затрат, тыс. руб.	$1525 + 624 = 2149$	$1450 + 702 = 2152$
Отчисление на амортизацию и ремонт (4%), тыс. руб.	$0,04 \cdot 2149 = 86$	$0,04 \cdot 2152 = 86$
Полная стоимость ежегодных эксплуатационных расходов, тыс. руб.	$86 + 60 = 146$	$86 + 68 = 154$

По капитальным затратам оба варианта равноценны. Так как потери во втором варианте больше, то и эксплуатационные расходы для него хотя и на небольшую величину превышало эксплуатационные расходы первого варианта, поэтому окончательно должно быть принято сечение АС-185 а первом участке и АС-70 на втором.

б) Для потребителей с числом часов использования максимальных нагрузок 5500 экономическая плотность тока $i_0 = 1 \text{ А/мм}^2$.

Сечения при этом получаются:

$$F_{A1} = \frac{206}{1} = 206 \text{ мм}^2 \text{ — ближайшее АС-240;}$$

$$r_0 = 0,131 \text{ ом/км;}$$

$$F_{12} = \frac{82,6}{1} = 82,6 \text{ мм}^2 \text{ — ближайшее АС-95;}$$

$$r_0 = 0,33 \text{ ом/км.}$$

По условию наименьшего расхода цветного металла аналогично предыдущему имеем:

$$F_{A1} = AC-150 \text{ и } F_{12} = AC-95.$$

Производим технико-экономическое сравнение вариантов.

Таблица 4.2

Наименование технико-экономических показателей	Вариант 1 (постоянство плотности тока)	Вариант 2 (наименьший расход металла)
Потери мощности, кВт	$3 \cdot (206^2 \cdot 0,31 \cdot 15 + 82,6^2 \cdot 0,3 \cdot 10) = 317$	$3 \cdot (206^2 \cdot 0,21 \cdot 15 + 82,6^2 \cdot 0,33 \cdot 10) = 468$
Стоимость потерь электрической энергии (при $\tau=1800$ ч), тыс. руб.	$10^{-3} \cdot 0,08 \cdot 4000 \cdot 317 = 101$	$10^{-3} \cdot 0,08 \cdot 4000 \cdot 468 = 150$
Стоимость линий, тыс. руб.	$75 \cdot 15 + 55 \cdot 10 = 1675$	$60 \cdot 15 + 55 \cdot 10 = 1450$
Стоимость добавочной мощности на электростанции для покрытия потерь, тыс. руб.	$1,5 \cdot 317 = 476$	$1,5 \cdot 468 = 702$
Полная величина капитальных затрат, тыс. руб.	$1675 + 476 = 2141$	$1450 + 702 = 2152$
Отчисление на амортизацию и ремонт (4%), тыс. руб.	$0,04 \cdot 2141 = 86$	$0,04 \cdot 2152 = 86$
Полная стоимость ежегодных эксплуатационных расходов, тыс.руб.	$86 + 101 = 187$	$86 + 150 = 236$

Принимается первый вариант, имеющий и по капитальным затратам и по эксплуатационным расходам преимущества перед вторым, т. е. АС-240 на первом участке и АС-95—на втором.

Из сравнения результатов, полученных в первой и второй задачах, можно заметить, что при большем числе часов использования наибольшей нагрузки сечение, выбранное по экономической плотности тока, даст существенное уменьшение потерь по сравнению с сечением, полученным по методу наименьшего расхода цветного металла, тогда как в первой задаче оба метода по технико-экономическим показателям дали малоразличающиеся результаты.

Расчеты сетей без учета индуктивного сопротивления

Проанализируем, в каких случаях можно с достаточной точностью пренебрегать индуктивным сопротивлением.

Активное и индуктивное сопротивления воздушных и кабельных линий трехфазного тока при увеличении сечения становятся более соизмеримыми. при малых же сечениях активное сопротивление во много раз больше индуктивного, что дает возможность им пренебрегать по сравнению с активным.

Это иллюстрируется величинами соотношений r_0/x_0 для воздушных и кабельных линий различных сечений, приведенных ниже.

Таблица 4.3

Сечение проводов, мм ²	Воздушная линия с расстоянием между проводами 1000 мм	Кабельная линия
10	$\frac{r_0}{x_0} = \frac{1,81}{0,413} = 4,4$	$\frac{r_0}{x_0} = \frac{2,1}{0,1} = 21$
150	$\frac{r_0}{x_0} = \frac{1,123}{0,319} = 0,4$	$\frac{r_0}{x_0} = \frac{0,14}{0,06} = 2,1$

Анализ условий получения возможных ошибок приводит к выводам, что, например, при допущении ошибки в 5% можно производить расчеты сетей без учета индуктивного сопротивления для следующих случаев:

1. Воздушные сети при $\cos \varphi$, близком к единице.
2. Кабельные сети напряжением до 10 кВ при $\cos \varphi$ не ниже 0,95 и сечениях жил не выше 35 мм².
3. Внутренние сети, выполненные шнуром или проводом в трубах.
4. Линии, прокладываемые к электродвигателям проводами на роликах при сечении проводов меньше 6 мм².

Во всех остальных случаях электросети следует рассчитывать с учетом индуктивных сопротивлений.

б) Расчет линий местных сетей со стальными проводами

При слабой загрузке линий электросетей, когда сечение медных или алюминиевых проводов выбирается не по потере напряжения, а по соображениям механической прочности и, таким образом, сечение провода мало используется в электрическом отношении, целесообразно вместо проводов из цветного металла применять стальные провода. Такие случаи могут иметь место в сельскохозяйственных или поселковых сетях с малой плотностью нагрузки, в сетях железнодорожных узлов и линиях железнодорожной автоблокировки и т. п.

Рассмотрим, например, случай передачи мощности 25 кет на расстояние 10 км при напряжении 6 кВ, $\cos \varphi = 0,8$ и среднегеометрическом расстоянии между проводами 1 000 мм.

По соображениям механической прочности должно быть принято наименьшее допустимое сечение алюминиевых проводов, А-16.

Определим потерю напряжения для этого случая при $r_0 = 1,96 \text{ ом/км}$ и $x_0 = 0,391 \text{ ом/км}$ и при токе нагрузки:

$$I = \frac{25}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,8} = 3 \text{ а};$$

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} I l (r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi)}{U_n} 100 =$$

$$= \frac{\sqrt{3} \cdot 3 \cdot 10 (1,96 \cdot 0,8 + 0,391 \cdot 0,6)}{6000} 100 = 1,6\%.$$

Полученная величина потери напряжения показывает, что в электрическом отношении принятый провод использован слабо, так как можно было бы допустить потерю напряжения, значительно большую (не 1,6%, а 8%).

При допустимой потере напряжения 8% сечение проводов получилась бы порядка 2 мм^2 , что недопустимо по механическим соображениям.

Поэтому, заменяя в данном случае провода из цветного металла стальными проводами, имеющими большую механическую прочность, но худшие электрические характеристики, можно, не выходя за пределы допустимой потери напряжения, получить более дешевую линию и сэкономить цветной металл.

Формула расчета линий переменного тока, выполняемых стальными проводами, имеет следующий вид:

$$\Delta U = \sqrt{3} [\Sigma I \cos \varphi r_0 + \Sigma I \sin \varphi (x'_0 + x''_0)] l, \quad (6-45)$$

где x'_0 и x''_0 — соответственно внешнее и внутреннее индуктивные сопротивления.

Так как r_0 и x''_0 зависят от величины протекающего по линии тока нагрузки, то определение сечения проводов со стальными проводами может приводиться только подбором, т. е. сначала задаются сечением провода, а затем определяют потерю напряжения и сравнивают ее с допустимой. В случае большого отклонения полученной потери напряжения от допустимой производят пересчет на другое сечение.

Пример: Подобрать сечение стальных проводов для трехфазной воздушной линии напряжением 6 кв, схема которой приведена на рисунке 4.8, нагрузки потребителей (в квт и квар), длины (в км). Допустимая потеря напряжения равна 8% (480 в) Среднее геометрическое расстояние между проводами 1 000 мм. Сечение провода вдоль всей линии должно быть одинаково.

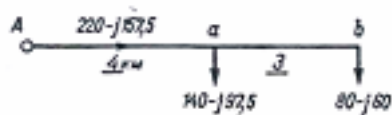


Рисунок 4.8. Схема к примеру.

Решение:

Находим коэффициенты мощности для нагрузок, протекающих по участкам:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_{ab} &= \frac{60}{80} = 0,75; \cos \varphi_{ab} = 0,8; \\ \operatorname{tg} \varphi_{Aa} &= \frac{157,5}{220} = 0,715; \cos \varphi_{Aa} = 0,81. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{ab} &= \frac{80}{\sqrt{3} \cdot 0,8} = 9,63 \text{ а}; \\ I_{Aa} &= \frac{220}{\sqrt{3} \cdot 0,81} = 26,2 \text{ а}. \end{aligned}$$

Определяем тока по участкам:

Задаемся проводом марки ПС-70 и находим по табл. П-9 и П-10 значения сопротивлений:

$$\begin{aligned} \text{Для тока } I = 26,2 \text{ а: } r_0 &= 1,75 \text{ ом/км; } x_0'' = 0,28 \text{ ом/км; } x_0' = 0,325 \text{ ом/км.} \\ \text{Для тока } I = 9,63 \text{ а: } r_0 &= 1,7 \text{ ом/км; } x_0'' = 0,21 \text{ ом/км.} \end{aligned}$$

Определяем потерю напряжения:

$$\begin{aligned} \Delta U_{Ab} &= \sqrt{3} [26,2 \cdot 0,81 \cdot 1,75 \cdot 4 + 26,2 \cdot 0,58 (0,325 + 0,28) \cdot 4 + \\ &+ 9,63 \cdot 0,8 \cdot 1,7 \cdot 3 + 9,63 \cdot 0,6 (0,325 + 0,21) \cdot 3] = 403 \text{ в,} \end{aligned}$$

что меньше допускаемых 480 В.

Так как аналогичный подсчет для провода ПС-50 дает $\Delta U_{Ab} = 658 \text{ в}$, то окончательно останавливаемся на проводе ПС-70.

Расчет сетей местного значения с применением продольной компенсации

При расчете протяженных сетей для обеспечения допустимой потери напряжения сечение проводов приходится выбирать со значительным превышением экономических сечений. Это приводит к перерасходу цветного металла и соответственно капитальных вложений в сети. Кроме того, для

протяженных сетей (например, сельскохозяйственных) возникают особые трудности в обеспечении требуемых уровней напряжения.

В качестве одного из мероприятий повышения эффективности подобных сетей является применение продольной емкостной компенсации индуктивности линии, заключающейся в последовательном включении в линию передачи конденсаторов.

Пример: Выбрать продольную компенсацию для сети 10 кВ, изображенной на рисунке 4.9.

Нагрузки сети — в кВт и квар, длины — в км. Напряжение в питающем пункте 10500 в. Допустимая потеря напряжения 8%. Время использования максимальной нагрузки всех потребителей $T = 4\ 000$ ч. $D_{\text{ср}} = 1\ 000$ мм.

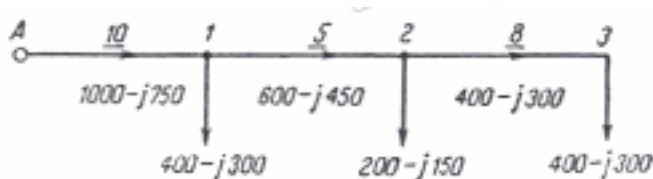


Рисунок 4.9. Схема к примеру.

Решение:

Находим токи и экономические сечения (при $i_0 = 1,1$ а/мм²) по участкам:

1-й участок:

$$I_1 = \frac{\sqrt{1\ 000^2 + 750^2}}{\sqrt{3} \cdot 10} = 72,5 \text{ а};$$

$$F_s = \frac{72,5}{1,1} = 66 \text{ мм}^2;$$

Принимаем провод А-70:

Подобным же образом находим:

для 2-го участка $I_2 = 43,5$ а (провод А-35);

для 3-го участка $I_3 = 29$ а (провод А-25).

Активные и реактивные сопротивления по участкам:

1-й участок: $r_0 = 0,45$; $x_0 = 0,345$;

2-й участок: $r_0 = 0,91$; $x_0 = 0,366$;

3-й участок: $r_0 = 1,27$; $x_0 = 0,377$ ом/км.

Допустимая потеря напряжения

$$\Delta U = \frac{8 \cdot 10\ 000}{100} = 800 \text{ в.}$$

Потери напряжения по участкам (без учета компенсации):

$$\Delta U_1 = \frac{1\ 000 \cdot 0,45 + 750 \cdot 0,345}{10} \cdot 10 = 710 \text{ в.};$$

$$\Delta U_2 = \frac{600 \cdot 0,91 + 450 \cdot 0,366}{10} \cdot 5 = 355 \text{ в.};$$

$$\Delta U_3 = \frac{400 \cdot 1,27 + 300 \cdot 0,377}{10} \cdot 8 = 495 \text{ в.}$$

Полная потеря напряжения $\Delta U = 710 + 355 + 495 = 1\,560$ В, что значительно превышает допустимые 800 В.

Так как у 1-й нагрузки уровень напряжения находится в допустимых пределах, а у 2-й потеря напряжения составляет $710+355=1\,065$ в, то продольную компенсацию целесообразно установить конце 2-го участка. Напряжение на входе будет $U' = 10500 - 710 - 355 \sim 9440$ в. Необходимое напряжение на выходе (после конденсатора) получаем $U'' = 10\,500 - 800 + 495 = 10\,200$ в. Определяем необходимую мощность конденсаторов:

$$Q_C = \frac{P}{\cos \varphi} \left[\sin \varphi - \sqrt{\left(\frac{U'}{U''}\right)^2 - \cos^2 \varphi} \right] = \\ = \frac{600}{0,8} \left[0,6 - \sqrt{\left(\frac{9,44}{10,2}\right)^2 - 0,8^2} \right] = 101 \text{ квар.}$$

Сопротивление фазы

$$X_C = \frac{Q_C}{3I^2} = \frac{101\,000}{3 \cdot 43,5^2} = 17,8 \text{ ом.}$$

Максимально возможное напряжение на конденсаторах составляет $U'' - U' = 10200 - 9440 = 760$ в, поэтому выбираем конденсаторы с номинальным напряжением 1 кВ — типа КПМ-1-50-1.

Номинальный ток этого конденсатора $I_n = 50$ а, и его сопротивление

$$X_C = \frac{50\,000}{50^2} = 20 \text{ ом.}$$

Устанавливаем три конденсатора (по одному на каждую фазу).

Производим проверочный расчет потерь напряжения в линии. Потери реактивной мощности в конденсаторах составляют:

$$Q_C = 3 \cdot 43,5^2 \cdot 20 = 114 \text{ квар.}$$

Эта опережающая мощность уменьшает реактивную мощность, протекающую по участкам А-1 и 1-2 линии. Новое распределение мощности по линии изображено на рисунке 4.10. Из этого рисунка видно, что при установке конденсаторов в конце участка линии 1 – 2 реактивная мощность, а следовательно, потеря напряжения и энергии на этом участке уменьшаются. При установке конденсаторов в начале участка реактивная мощность, протекающая на этом участке, осталась бы без изменения. В связи с этим установка конденсаторов в конце участка предпочтительней.

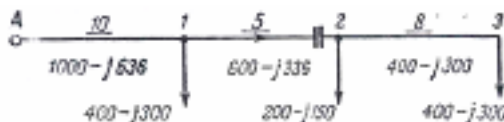


Рисунок 4.10. Окончательная схема к примеру.

Определим потери напряжения по участкам:

$$\Delta U'_1 = \frac{1000 \cdot 0,45 + 636 \cdot 0,345}{10} \cdot 10 = 670 \text{ в};$$

$$\Delta U'_2 = \frac{600 \cdot 0,91 + 336 \cdot 0,366}{10} \cdot 5 - \frac{450 \cdot 20}{10} = -565 \text{ в};$$

$$\Delta U'_3 = \frac{400 \cdot 1,27 + 300 \cdot 0,377}{10} \cdot 8 = 495 \text{ в}.$$

Суммарная потеря напряжения до точки 3:

$$\Sigma \Delta U = 670 - 565 + 495 = 600 \text{ в},$$

что вполне допустимо и меньше 800 В.

Напряжения в точке 1: $10500 - 670 = 9830 \text{ в};$

в точке 2: $9830 + 566 = 10396 \text{ в};$

в точке 3: $10396 - 495 = 9901 \text{ в}.$

Токи утечки в электроустановках зданий

При проектировании и монтаже новых систем электроснабжения зданий, а также при реконструкции старых внедряется трех- и пятипроводная схема подключения электрооборудования, то есть фактически к фазным и нулевому рабочему проводникам добавляется нулевой защитит проводник. Практически любая неочевидная ошибка в подключении электрооборудования в этих схемах (наиболее часто встречается подключение нулевого рабочего проводника к клемме нулевого защитного и наоборот либо подключение под один контактный зажим обоих проводников) приводит к появлению неконтролируемого растекания токов по металлоконструкциям и трубопроводам систем водоснабжения и отопления зданий (рисунок 4.11). Таким образом, ошибки монтажа электроустановок зданий можно считать основной причиной возникновения токов утечки.

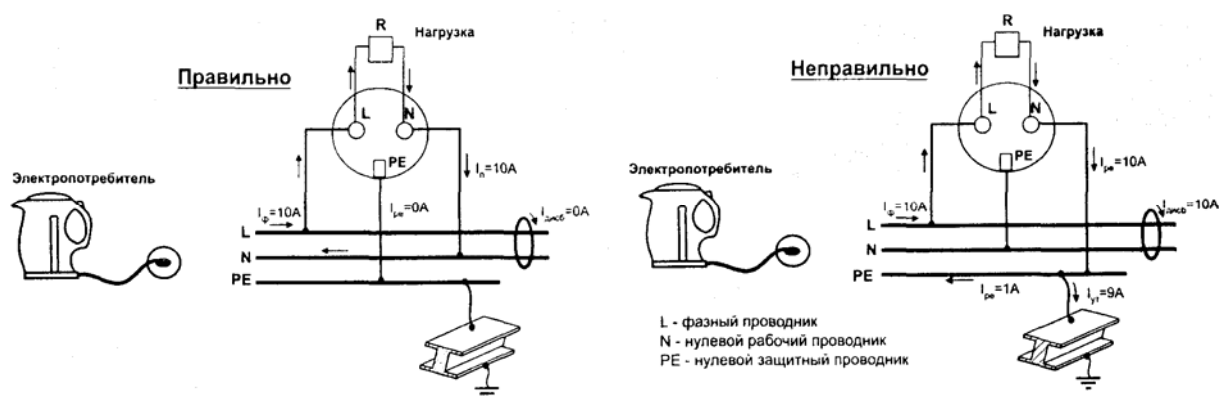


Рисунок 4.11. Подключение нулевого рабочего и нулевого защитного проводников

Помимо ошибок монтажа, существует ряд других причин, приводящих к возникновению токов утечки в электроустановках зданий:

- повреждение изоляции нулевых рабочих проводников, которое может происходить либо из-за перегрева последних, либо в результате механических повреждений;
- ухудшение состояния контактных соединений в цепях нулевых рабочих проводников;
- повреждение изоляции электропотребителей.

Магнитные поля промышленной частоты

Токи утечки не только влияют на инженерные системы здания и компьютерное оборудование, но и оказывают негативное воздействие на здоровье людей. Известно, что магнитное поле в окружающем пространстве создается проводниками с током. Таким образом, причина появления магнитных полей промышленной частоты (МП ПЧ) вблизи силовых трансформаторов, электродвигателей, распределительных устройств очевидна. Установлено, что источником электромагнитного загрязнения в промышленных и жилых зданиях, кроме паразитного излучения электромагнитного поля различными приборами, является протекание постоянных и переменных токов по металлоконструкциям и трубопроводным системам зданий; источниками таких токов практически всегда являются системы электроснабжения этих же зданий. Кроме того, из электротехники хорошо известно, что суммарный ток по линиям питания однофазных и трехфазных нагрузок при отсутствии токов утечки тождественно равен нулю и магнитное поле, создаваемое протекающими в таких (без утечек) кабельных линиях токами, на расстоянии от них более 15-20 см также пренебрежимо мало. При появлении в кабельной линии тока утечки именно этот ток создает в окружающем пространстве магнитное поле, медленно убывающее с увеличением расстояния от рассматриваемого кабеля. Диаграмма на рисунке 4.12 иллюстрирует результаты анализа специалистами ЦЭМБ характеристик источников МП ПЧ, сделанные на основе собственных данных за период 1997-2002 гг.

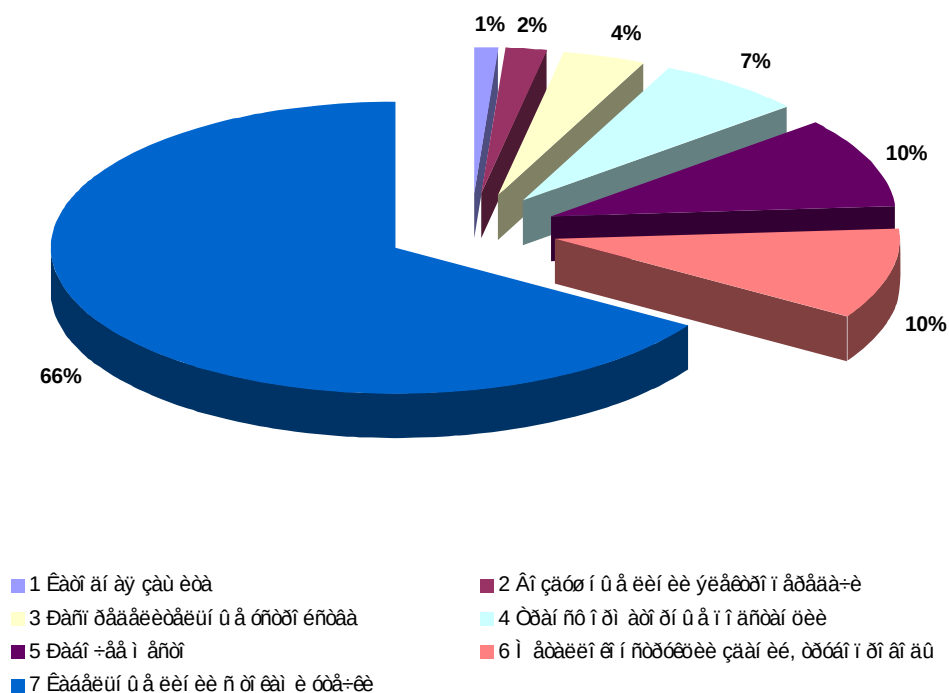


Рисунок 4.12. Распределение источников по типам от общего числа обследованных помещений.

Влияние электромагнитных полей на здоровье людей

«Предполагается, что медицинские последствия, такие как заболевания раком, изменения в поведении, потеря памяти, и многие другие состояния, включая рост числа самоубийств, являются результатом воздействия электромагнитных полей» (из обоснования Международной научной программы (1996-2005 гг.) Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) по биологическому действию ЭМП). По результатам исследований, выполненных нашими специалистами в помещениях офисного типа, оснащенных ПЭВМ, на рабочих местах персонала в 70% случаев наблюдалось превышение нормативных уровней по электрическому полю в 1,5-10 раз, а по магнитному полю в 2-40 раз. Учитывая потенциальную опасность ЭМП для здоровья населения, в нашей стране разработаны и введены в действие Санитарные нормы, по ряду параметров являющиеся самыми жесткими в мире.

Влияние ЭМП на компьютерное оборудование

Если персональный компьютер находится в помещении, по стенам, за потолком или под полом которого проходят кабельные линии с токами утечки, вызывающие повышенный уровень магнитного поля, то изображение на видеомониторе может заметно искажаться («плыть» или «дрожать»). Известны случаи, когда растр покрывается цветными пятнами различных оттенков, а иногда изображение полностью или частично пропадает на несколько секунд и появляется вновь. Очевидно, что работать за таким монитором невозможно и вредно. Следует заметить, что в соответствии с требованиями СанПиН 2.2.2.542-96 «Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» предельно допустимое значение плотности магнитного потока, создаваемого компьютером, на рабочем месте пользователя не должно превышать 0,25 мкТл в диапазоне частот 5-2000 Гц, т.е. наличие «дрожания» изображения на видеомониторе свидетельствует о как минимум 2-4-кратном превышении предельного значения.

Помимо «дрожания» изображения, магнитное поле, вызванное токами утечки по кабельным линиям, а также протеканием токов по металлоконструкциям и трубопроводам здания, при определенных условиях может индуцировать в проводниках информационных кабелей переменные токи промышленной частоты. Таким образом, даже при правильно выполненной системе заземления информационного оборудования в пределах какого-либо отдельно взятого участка локальной вычислительной сети, наличие вышеописанных проблем в других частях здания с большой долей вероятности может привести к сбоям в работе информационных и компьютерных систем по всему зданию.

Протекание токов по системе заземления здания, а значит и по основной системе уравнивания потенциалов, также приводит к ряду негативных последствий как для компьютерных систем, так и для систем электроснабжения в целом. Поскольку в основную систему уравнивания потенциалов входят нулевые защитные (РЕ) проводники, металлические трубы всех инженерных коммуникаций, металлические части каркаса здания, заземляющее устройство молниезащиты, металлические оболочки телекоммуникационных кабелей, то протекание по ним переменных токов может вызывать сбои и «зависания» компьютерных сетей, появления токов помех по интерфейсным, информационным и сигнальным кабелям, а также невозможность нормальной работы другого офисного и электронного оборудования.

Влияние токов утечки на выполнение современных требований по обеспечению пожаро- и электробезопасности в зданиях

Наличие токов утечки по кабельным линиям не позволяет использовать современные средства обеспечения пожарной и электробезопасности - устройства защитного отключения, предписанные Государственными стандартами Российской Федерации, инструктивными письмами Главгосэнергонадзора Российской Федерации и Главного управления государственной противопожарной службы Министерства по чрезвычайным ситуациям России.

С 1 июля 2000 г. введено в действие новое (седьмое) издание раздела 6 и глав 7.1 и 7.2 раздела 7 «Правил устройства электроустановок (ПУЭ)». В частности, в нем указывается на необходимость установки устройств защитного отключения, обеспечивающих требуемый в настоящее время уровень электро- и пожаробезопасности, и, как следствие этого, недопустимость наличия токов утечки в системах электроснабжения зданий.

Коррозионное действие токов утечки

Действие токов утечки на трубопроводные системы приводит к тем же последствиям, что и коррозионное действие постоянных и переменных блуждающих токов. В период с 1996 по 2002 год были выполнены прямые осциллографические измерения токов, протекающих по внутренним трубопроводам систем отопления и водоснабжения зданий, на более чем 200 объектах Москвы. В ходе работ было зафиксировано, что по трубопроводам протекают переменные токи промышленной частоты от 0,1 до 18,2 А

На основании собственных данных, а также экспертных заключений Всероссийского НИИ Коррозии и Ассоциации разработчиков и производителей средств противокоррозионной защиты для топливно-энергетического комплекса (КАРТЭК), можно сделать вывод о прямой корреляции между скоростью коррозии внутренних трубопроводов зданий и величиной протекающих по ним переменных и постоянных токов.

В последнее время с целью исключения коррозионного повреждения внутренних трубопроводов зданий наметилась тенденция по замене металлических водопроводных труб на пластиковые. По этому поводу необходимо высказать следующие соображения:

1. Причиной ускоренной точечной (питтинговой) коррозии труб в 98% случаев является протекание по ним тока, то есть трубы де-факто являются элементами системы электроснабжения.
2. При замене металлических труб на пластиковые решается вопрос об устранении их электрохимической коррозии, но одновременно может существенно возрасти нагрузка на нулевые рабочие проводники.

Расчет распределения тока однофазного замыкания по элементам сложной заземляющей сети

В условиях предприятий промышленного района заземляющие устройства подстанций, связанные между собой и с железобетонными фундаментами промышленных и бытовых зданий естественными заземлителями, образуют разветвленную сложную заземляющую сеть (ЗС). Такая сеть, с одной стороны, способствует снижению полного потенциала на подстанционном заземлителе и напряжений шага и прикосновения на территории подстанции (за счет уменьшения сопротивления растеканию и тока, стекающего в землю), а с другой — допускает вынос потенциала за пределы подстанций. Исследования показали, что неучет токораспределения по элементам ЗС приводит к неправильной оценке условий электробезопасности на территории предприятия.

Приводится методика расчета токораспределения по элементам ЗС при коротких однофазных замыканиях в сетях с заземленной нейтралью, в которой учитывается возврат тока через нейтрали трансформаторов. В сетях с изолированной нейтралью возврат тока замыкания на землю происходит через распределенные емкости, поэтому нет конкретной точки возврата тока к источнику.

Предлагается методика расчета токораспределения по элементам ЗС при однофазных замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью, реализуемая в следующей последовательности:

1. Определение максимально возможных токов однофазного замыкания на землю в высоковольтных сетях с изолированной нейтралью.
2. Расчет эквивалентных грунтовых структур для естественных и искусственных заземлителей.
3. Построение и расчет схемы замещения ЗС промышленного комплекса.
4. Расчет токораспределения и потенциалов по элементам ЗС.

Значение емкостного тока однофазного замыкания на землю I_{Co} определяется как сумма емкостных токов линий всей электрически связанной сети ($I_{Co.l}$), двигателей напряжением выше 1 кВ ($I_{Co.d}$), присоединенных к электрической сети, с учетом распределительных устройств, относящихся к данной сети:

$$I_{Co} = \left(\sum_{i=1}^n I_{Co.l} + \sum_{i=1}^m I_{Co.d} \right) \cdot K_{p.y}$$

где $K_{p.y}$ — коэффициент, учитывающий увеличение емкостного тока однофазного замыкания на землю электрической сети за счет емкости оборудования распределительных устройств.

Емкостный ток отдельных электродвигателей вычисляется по формуле

$$I_{Co.d} = \frac{2\pi f_{ном} \cdot 3C_d U_{ном}}{\sqrt{3}}$$

где C_d — емкость одной фазы статора двигателя (принимается по паспортным данным завода-изготовителя); $U_{ном}$ — номинальное напряжение двигателя.

Собственный емкостный ток однофазного замыкания на землю отдельной кабельной линии, одноцепной и двухцепной воздушных линий электропередачи соответственно находится из выражений:

$$I_{Co.l} = U_{ном} L / n$$

$$I_{Co.g} = K U_{ном} \cdot 10^{-3}$$

$$I_{Co.g.d} = (1,3 \div 1,6) I_{Co.g}$$

где L — длина кабельной линии, км; n — емкостный коэффициент (для кабельных линий сечением выше 70 мм² равен 10, для кабельных линий сечением ниже 70 мм² — 6); K — емкостный коэффициент (для линий 6-10 кВ равен 2,7, для линий 35 кВ на деревянных опорах с тросами — 3,3, для линий 35 кВ на металлических опорах с тросами — 3).

Удельное эквивалентное сопротивление грунта $\rho_{эк}$ определяется на основе геоэлектрических разрезов, полученных при проведении предпроектных изысканий. При вычислении $\rho_{эк}$ учитываются геометрические размеры заземлителя и его конструктивное исполнение. Для естественных заземлителей требуется находить степень насыщения нулевого цикла металлом или железобетоном с учетом глубины погружения свай. Для протяженных естественных заземлителей $\rho_{эк}$ рассчитывается согласно методике.

Основная сложность расчетов заключается в построении схемы замещения ЗС, так как сначала необходимо определить параметры отдельных элементов, а затем объединить их в единую схему замещения в той же последовательности, что и в реальной ЗС. При этом возврат тока однофазного замыкания на землю учитывается введением обратного земляного провода, условно проложенного под реально проходящими линиями электропередачи. Это позволяет рассматривать электрическую систему в момент однофазного замыкания как источник тока по отношению к схеме замещения ЗС. Обратный земляной провод, параметры которого зависят от протяженности линий электропередачи и их конструктивного исполнения, представляется эквивалентным четырехполюсником. В тех случаях, когда протяженность линий значительная, преобладает продольная составляющая, и обратный земляной провод рассматривается как продольная индуктивность. Таким образом, электрическая и заземляющая сети представля-

ются единой схемой замещения, на которой указываются предполагаемые места и максимально возможные токи однофазного замыкания на землю. В общем случае схема замещения может содержать большое количество ветвей и узлов, поэтому для расчета токораспределения предлагается использовать матричную форму записи узловых уравнений:

$$\underline{Y}_y \nabla \varphi = \underline{I}_y$$

где $\underline{Y}_y$ – матрица узловых проводимостей; $\nabla \varphi$ – матрица узловых потенциалов, рассматриваемых как полные потенциалы на ЗС в предполагаемых местах однофазного замыкания на землю; $\underline{I}_y$ – матрица узловых токов, принимаемых как источники токов, равных по значениям токам однофазного замыкания на землю.

Для формирования $\underline{Y}_y$ на основе схемы замещения составляется направленный граф. Тогда $\underline{Y}_y = \underline{A} \underline{Y} \underline{A}^T$, где $\underline{A}$ – первая матрица соединений; $\underline{Y}$ – матрица проводимостей ветвей схемы замещения.

По предлагаемой методике авторами проведены расчеты токораспределения по элементам ЗС рудников открытых горных работ Норильского промышленного района.

Экспериментальное значение однофазного тока замыкания на землю I_{C0} составило 0,8 А, а максимальное расчетное – 1,6 А, что свидетельствует о некотором его завышении. Однако учитывая изменения конфигурации сетей, за расчетное значение тока однофазного замыкания принят ток, равный 5 А.

В условиях рудников отдельные заземляющие устройства подстанций и распределительных пунктов связаны между собой с помощью четвертого провода, оболочек кабелей и естественных заземлителей. Для построения схемы замещения ЗС был составлен ситуационный план с нанесением всех элементов. Затем все элементы были классифицированы и для каждой из них рассчитано значение $r_{эк}$. Параметры грунтов взяты на основе предпроектных изысканий, проведенных институтом "Норильскпроект". Результаты расчетов значений сопротивлений растеканию отдельных элементов ЗС представлены в таблице.

Объединив все элементы ЗС в соответствии с ситуационным планом, введя фиктивный обратный земляной провод и проведя ряд преобразований, получим расчетную схему замещения, токораспределение в которой определялось методом узловых потенциалов (см. рисунок).

Таблица 4.4

Элемент ЗС	Характерный размер, м	Сопротивление растеканию R_z , Ом
Опора ЭКГ-8И	$a = 6,68$	31,5/38,73
Опора ЭКГ-4,6	$a = 4,65$	34,97/42,5

Опора СБШ-250МН	$a = 3,77$	35,5/43,81
КРП-13, КРП-14	$S = 72\text{м}^2$	115,5/115,8
Трубопровод ЦРП1 15-КРП5	$L = 630$	$Z_{\text{пр}} = /0,125$
МТП-1,-2, -3,-4,-70, .468	$L = 260$	24
ЗУ "Гутчиха"	$L = 12 \div 25$	4,68
Водоотливная установка	$L = 14 \div 35$	24
Разрядники (опора № 1)	$L = 54$	9,44
Разрядники (опора № 4)	$L = 20 \div 32$	11,4
КРП-1	$L = 6 \div 100$	7,23
КРП-7, КРП-5, ЦРП-115	$L = 6 \div 26,4$	44
КРП-11	$L = 6 \div 25,8$	42,7

Примечание, a — диагональ квадрата, S — площадь нулевого цикла здания, $Z_{\text{пр}}$ — продольное сопротивление трубопровода; в числителе и знаменателе приведены значения для двух геоэлектрических разрезов.

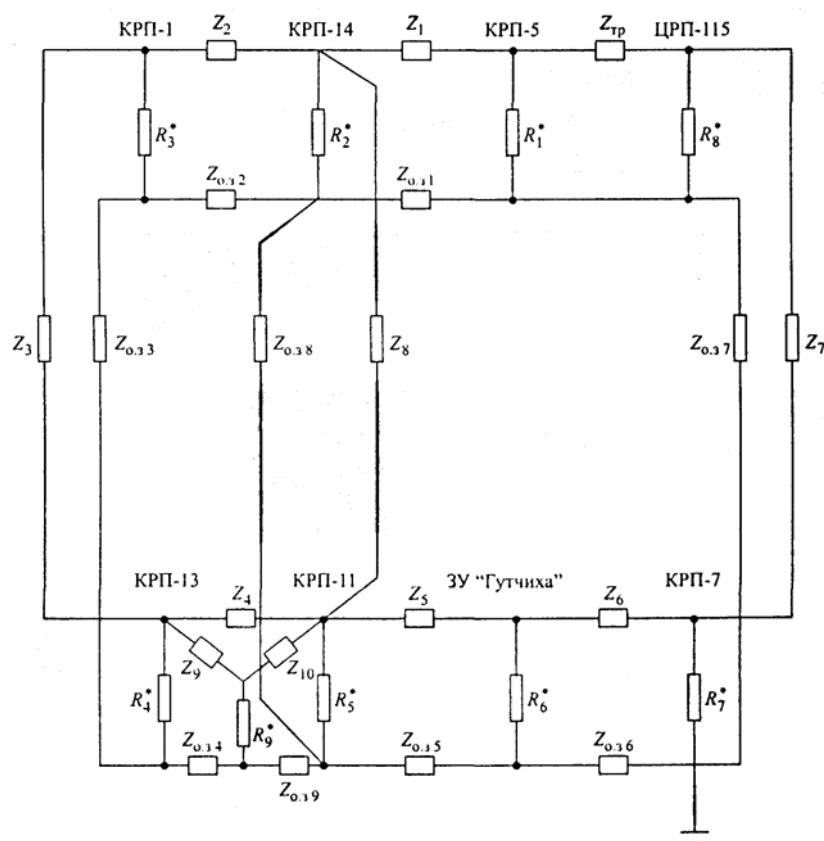


Рисунок 4.13. Схема замещения ЗС промпредприятия.

Расчет проводился с использованием программы MATCAD, а его результаты представлялись в виде матриц узловых потенциалов.

Сравнительный анализ безопасности электрических сетей TN и TT¹

В связи с введением в 1994-1996 гг. новых ГОСТ и выходом седьмой редакции Правил устройства электроустановок (ПУЭ), требования которых значительно приблизились к стандартам Международной электротехнической комиссии (МЭК), возникла необходимость в качественной оценке электрозащитных свойств систем заземления сетей до 1000В.

Типы электрических сетей напряжением до 1 кВ

Для электроснабжения потребителей до 1 кВ применяются трехфазные электрические сети TN-C, TN-C-S, TN-S, TT. Например, в странах Центральной Европы и США используются сети TN, а в Южной Европе и Японии — TT. Эти сети отличаются режимом работы нулевого рабочего (N) и нулевого защитного (PE) проводников, которые могут быть разделены или объединены во всей или в части сети. Во всех этих сетях нейтраль

источника питания глухо заземлена, а у потребителей есть повторные заземления. Нулевой рабочий N-проводник используется для питания приемников электроэнергии и соединения с заземленной нейтралью электроустановки (по нему протекают рабочие токи), а нулевой защитный РЕ-проводник — для соединения заземляемых частей электрооборудования с глухозаземленной нейтралью источника питания (ток в нем появляется только в аварийном режиме). Защитные заземляющие РЕ-проводники соединяют корпуса оборудования с заземлителями. Согласно новым нормативным требованиям ПУЭ в каждой электроустановке должна быть выполнена главная система выравнивания потенциалов, включающая в себя:

- защитный проводник (РЕ или PEN) питающей линии;
- заземляющий проводник:
- металлические трубы коммуникаций здания;
- металлический каркас здания;
- систему молниезащиты.

Указанные проводящие части следует соединять между собой при помощи главной заземляющей шины, устанавливаемой внутри вводного устройства (ВУ) или отдельно от него. Проводимость этой шины должна быть не менее, чем проводника (РЕ или PEN) питающей линии. Главная заземляющая шина выполняется из меди или стали, применение алюминия не допускается в связи с выдавливанием металла из-под соединений. Каждый проводник должен присоединяться к указанной шине с помощью отдельного болтового соединения. По мнению автора, в нормативных документах необходимо особо подчеркнуть недопустимость присоединения к одному болтовому соединению двух и более нулевых проводников.

Основное назначение заземления нейтрали источника питания — ограничение в ней потенциала при замыкании одной из фаз на землю. При этом согласно шестой редакции ПУЭ в четырехпроводных сетях 0,4 кВ, во-первых, напряжение на исправных фазах не должно превышать 250 В по условию работы аппаратуры, а во-вторых, напряжение нейтрали по отношению к земле не должно превышать допустимого значения напряжения прикосновения. Для выполнения первого условия необходимо, чтобы напряжение смещения нейтрали не превышало 60 В. По второму условию требуемый уровень безопасности обеспечивается при определенном сочетании тока, протекающего через тело человека, и продолжительности воздействия. Напряжение прикосновения к корпусам электроустановок не должно превышать 650 В при предельно допустимой продолжительности его воздействия 0,01-0,008 с и до 36 В — при воздействии более 1 с. Для сети 0,4 кВ это может быть достигнуто при коэффициенте напряжения прикосновения $A = 36/60 = 0,6$. В С111Л допускаемое напряжение прикосновения не более 30 В действующего значения синусоидального тока (42,4

В амплитудного). Сопротивление заземления источника питания согласно п. 1.7.62 ПУЭ не должно превышать 4 Ом с учетом сопротивления естественных заземлителей и повторных заземлений у потребителей. Общее сопротивление растеканию всех повторных заземлений нулевого провода в любое время года не должно превышать 10 Ом. При этом сопротивление растеканию каждого из повторных заземлений не должно быть больше 30 Ом.

В предыдущих редакциях ПУЭ основной упор в системе электробезопасности был сделан на создание металлоемких повторных заземлений у потребителей, при этом время отключения аварии нормировалось только по термической стойкости оборудования в высоковольтной сети. Защита от сверхтоков в сети до 1 кВ обеспечивалась с помощью простых токовых защит (практически без ограничения по времени срабатывания), в большинстве случаев не способных срабатывать при попадании напряжения на корпус оборудования или при нарушении целостности нулевого проводника. Попадание потенциала на корпус оборудования выявлялось только по косвенным признакам. В новых нормативных документах время отключения аварии в сети с фазным напряжением 220 В ограничивается 0,4 с, в распределительной сети — 5 с. Однако согласно п. 1.7.79 ПУЭ для автоматических выключателей с номинальным током до 100 А кратность тока КЗ относительно уставки допускается принимать 1,4, а для автоматических выключателей с номинальным током более 100 А — 1,25. При столь малом различии между током отключения и током КЗ реальное время отключения аварии составляет минуты. При этом не соблюдаются нормативы по напряжению прикосновения, и задержка с отключением создает новые очаги аварии. При выборочном расчете электроустановок Северо-Кавказской железной дороги (СКЖД) по допустимому нагреву трансформаторов и нулевых жил кабелей токами однофазного КЗ оказалось, что время отключения не должно превышать 20-25 с. При этом по ПУЭ и характеристикам защитных элементов можно было выбирать гораздо большие уставки по времени. Это одна из причин возникновения ситуации, когда КЗ вообще не отключаются, а самоустраиваются после полного выгорания попавшего в зону дуги оборудования.

Требования МЭК гораздо жестче. Заземление или зануление в помещениях без повышенной опасности требуется выполнять при номинальном напряжении 50 В переменного тока. Защита от косвенного прикосновения к частям электроустановки, коюрые могут оказаться под напряжением, выполняется устройством защиты отключения дифференциального типа (УЗО-Д) с током срабатывания от 6 мА (в розетках) до 500 мА (на вводах электроустановок). Безопасность обеспечивается применением высокотехнологичных защитных устройств. В результате в США в 1988г. было заре-

гистрировано 714 смертельных случаев электротравматизма в электроустановках жилых и общественных зданий, а в Советском Союзе в том же году — 5435.

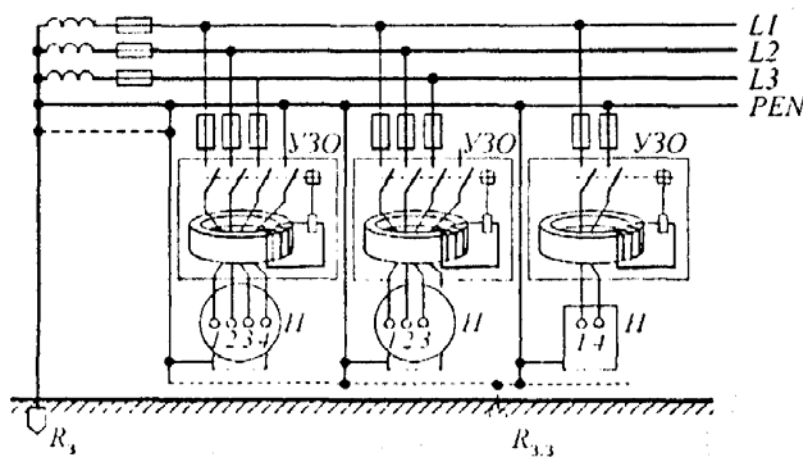


Рисунок 4.14. Схема электроснабжения установки с классическим занулением (сеть TN-C)

Электрическая сеть TN-C

Для питания большинства промышленных электроустановок 220/380 В сейчас обычно применяется трехфазная четырехпроводная электрическая сеть TN-C (рисунок 4.14). Основная защитная функция возложена на систему зануления, при которой замыкание фазы на корпус оборудования должно приводить к его отключению с помощью токовых защит. Четвертый проводник питающей сети совмещает функции нулевого рабочего (N) и нулевого защитного (PE) проводников. Совмещенный (нулевой и защитный) PEN-проводник согласно п. 1.7.79 ПУЭ должен иметь проводимость, не меньшую половины проводимости фазного проводника. Во вводных устройствах электроустановок с зануленным оборудованием устраивается совмещенная тина PEN. Объединение нулевых и заземляющих проводников допускается только в том месте сети, где установлены коммутационные аппараты аварийного отключения. В такой электрической сети фактически используется земля в качестве параллельного проводника для тока нулевого провода, поэтому применение УЗО-Д в этой сети недостаточно эффективно. В результате несимметрии сети в аварийных режимах (при КЗ и неполнофазном режиме) по земле протекает значительный блуждающий ток, не попадающий в зону действия токовых защит в фазных проводниках. У потребителей с малым сопротивлением заземляющего устройства наблюдается появление в нулевой жиле питающего кабеля блуждающего

тока от других электроустановок. Чем меньше сопротивление заземлений в сети TN-C, тем больше блуждающие токи, которые создают дополнительную опасность пожара и электротравматизма.

В случае если сопротивление заземляющего устройства у потребителя меньше, чем на питающей подстанции, в аварийном режиме создаются неблагоприятные условия для всех прочих потребителей. При КЗ на вводном устройстве часто выгорает контакт в нулевом проводнике, сеть переходит в режим TT, и весь аварийный сверхток протекает по земле и последовательно включенным заземлениям подстанции и потребителя. При этом у других потребителей подстанции напряжение прикосновения на корпусах зануленного оборудования превышает все допустимые значения. Стремление сделать сопротивление заземляющих устройств потребителей как можно меньше привело к тому, что, например, в условиях СКЖД сопротивления более 80 % повторных заземлений составляют менее 4 Ом, а 9 % — менее 1 Ом. Параллельная цепь через землю создает путь для всех блуждающих токов (до сотен ампер), вызывающих пожары.

Необходимо отметить, что допустимое сопротивление заземления источника питания 4 Ом было установлено исходя из того, что при падении фазного провода даже на мокрую землю или в грязь его сопротивление растеканию будет не менее 15 - 20 Ом. Меньшие сопротивления растеканию создают неблагоприятные условия по электробезопасности для всех электроустановок подстанции. В этой ситуации при низких сопротивлениях повторного заземления у потребителей происходит фактическое "распределение аварии" по всем прочим потребителям. Чтобы исключить это, необходимо сопоставить допустимые пределы разницы сопротивлений заземляющих устройств источника питания и потребителя. Однако в существующей технической практике и в расчетах это не принято. Нарушение целостности нулевого или защитного проводника может быть долго не замечено, и при КЗ неожиданно наступает тяжелая аварийная ситуация с отказом защит. В случае обрыва РЕ-проводника оборудование может работать при параметрах рабочего режима, близких к номинальным, но без заземления.

Электрическая сеть TN-S

Электрическая сеть TN-S (рисунок 4.15) — это трехфазная пятипроводная сеть. В ней N-проводники разделяются с РЕ-проводниками на шинах PEN подстанции и далее идут отдельно на всем протяжении сети.

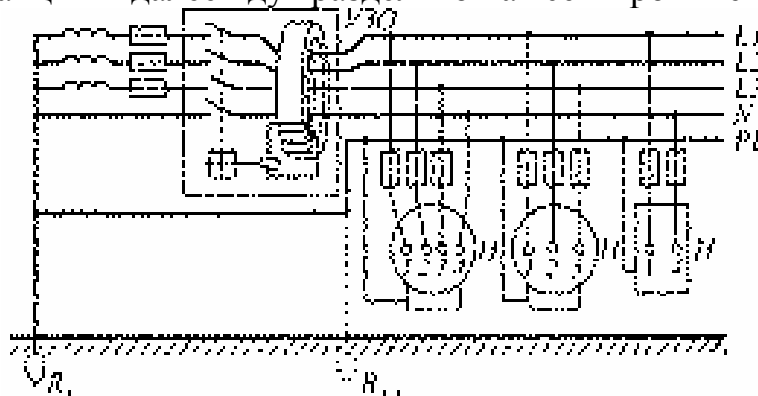


Рисунок 4.15. Схема электроустановки с нулевым и защитным раздельными проводниками (сеть TN-S)

Шины N и шины PE вводных устройств потребителей изолированы одна от другой, N- и PE-проводники равны по сечению и разделены. Это создает хорошие условия для применения УЗО-Д. В такой сети токи несимметрии и нулевой последовательности в нормальном режиме не протекают по заземляющим устройствам и PE-проводникам. При обрыве в цепи N-проводника нарушается работа однофазных потребителей, возникает сильный перекося фаз, но условия электробезопасности не нарушаются. При обрыве N-проводника и КЗ на корпус оборудования ток достигает уставок срабатывания защит фазных проводников. При обрыве PE-проводника питающей линии сохраняется работа всех потребителей в номинальном режиме, но оборудование остается заземленным только на собственные заземлители — фактически в режиме сети TT. В сети TN-S по сравнению с сетью TN-C расход проводниковых материалов возрастает на 20 - 30 %. При других типах сетей кажущаяся экономия на отдельном PE-проводнике на деле оборачивается снижением безопасности.

Электрическая сеть TN-C-S

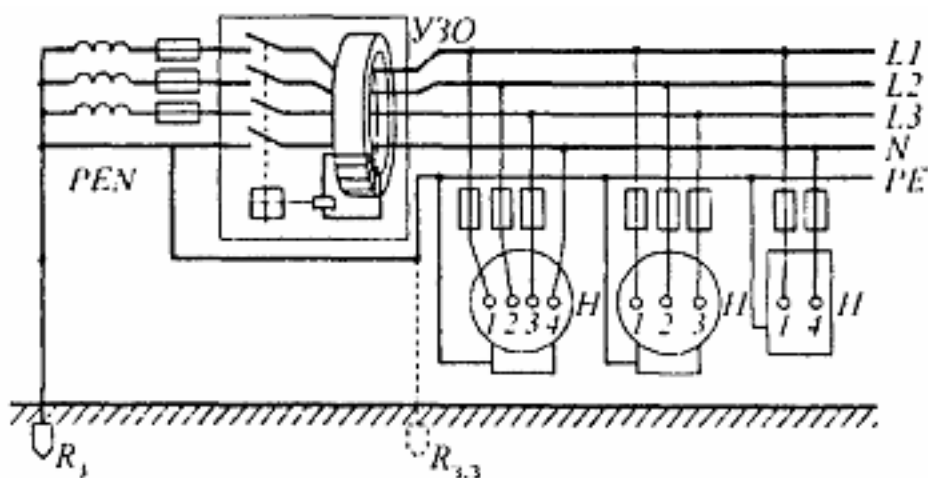


Рисунок 4.16. Схема электроустановки с нулевым и защитным проводниками, имеющими соединение до ввода — “быстрое зануление” (сеть TN-C-S).

В этой сети (рисунок 4.16) питание потребителей осуществляется по трехфазной четырехпроводной линии с объединенным PEN-проводником. В распределительной сети на вводных устройствах потребителей происходит разделение PE- и N-проводников, равных по сечению и выполненных из цветного металла. Эта сеть по многим параметрам несущественно огли-

чается от сети TN-C, но условия электробезопасности для однофазных потребителей в ней лучше. Расход проводниковых материалов в распределительной сети TN-C-S на 20 - 30 % выше, чем в сети TN-C.

Наличие в сетях TN-C и TN-C-S общего PEN-проводника и его заземления снижает значение потенциала N- и PE-проводников между собой и относительно земли при коммутационных и атмосферных перенапряжениях. Это может оказаться преимуществом перед сетями TN-S и TT при питании электронной техники, имеющей емкостные связи между N- и PE-проводниками, особенно в зоне сильного электромагнитного влияния высоковольтных ЛЭП.

Электрическая сеть TT

Электрическая сеть TT (рисунок 4.17) — это трехфазная четырехпроводная сеть, в которой нулевые проводники питающей линии используются только для протекания рабочих и аварийных токов и не применяются в системе заземления. Корпуса оборудования не зануляются. Токи нулевой последовательности не могут протекать между потребителями по заземляющим устройствам, и блуждающих токов в нулевом проводнике нет. Это исключает одну из причин пожаров.

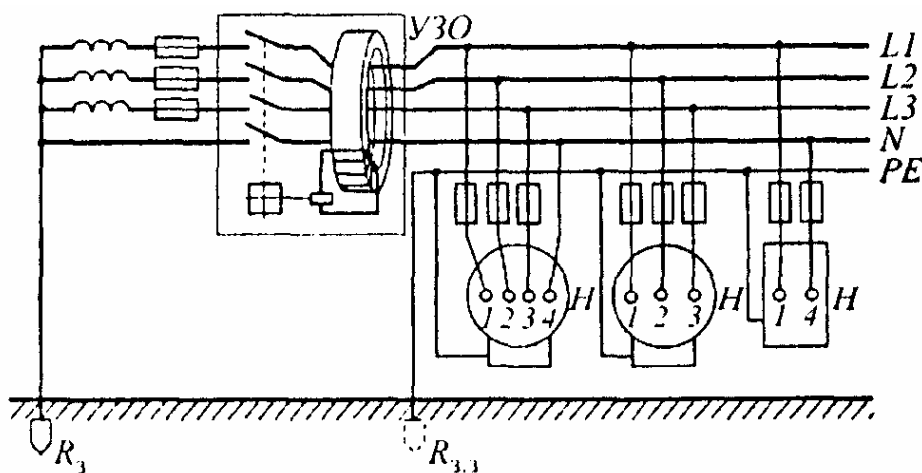


Рисунок 4.17. Схема электроустановки с нулевым рабочим проводником и защитным заземлением электроустановки (сеть TT).

Совместная работа сетей TN и TT нежелательна, а при отсутствии защитно-отключающего устройства типа УЗО-Д вообще недопустима. При к. з. в сети TT и малом сопротивлении заземлений в сети TN происходят большое смещение нейтрали и вынос потенциала на зануленные корпуса потребителей. При переходе с сети TN-C на сеть TT не требуется прокладка дополнительных проводников, но необходима обязательная установка дополнительного защитно-отключающего устройства типа УЗО-Д, а также

установка в фазных проводниках коммутационного аппарата типа контактора или автомата с независимым расцепителем на вводе у потребителей для немедленного отключения электроустановки при КЗ на РЕ-проводники. В мировой практике токовые защитные элементы и УЗО-Д часто совмещаются в одном аппарате. При КЗ на корпус независимо от соотношения сопротивлений заземлений в сети ТТ выноса потенциала на корпуса оборудования других потребителей не происходит.

В режиме сети ТТ работают электроустановки жилых и административных зданий Японии. При этом сопротивления повторных заземлений на два порядка выше, чем по ПУЭ. На главном распределительном щите здания сопротивление заземления должно быть не выше 500 Ом, если УЗО способно отключить цепь за время не более 0,5 с. Число смертельных случаев на 1 млн. населения в зданиях Японии в 1988г. составило 0,63. Это свидетельствует о том, что электробезопасность лучше обеспечивается применением совершенных защитных устройств и далеко не всегда зависит от количества "зарытого металла".

Сравнительный анализ сетей при различных режимах нейтрали

Для сравнительного анализа сетей рассмотрим различные аспекты их работы в разных режимах электроснабжения электроустановки потребителя, имеющей защитное заземление сопротивлением менее 4 Ом и вводное устройство, оснащенное токовыми защитами в фазных проводниках:

1. Неполнофазный режим в других гальванически связанных электроустановках:

- а) протекает блуждающий ток по нулевым жилам кабелей;
- б) фактически используется земля в качестве нулевого проводника.

2. Однофазное КЗ на N-проводники электроустановки:

- а) протекает часть аварийного сверхтока по РЕ-проводникам;
- б) срабатывает максимально-токовая защита в фазных проводниках.

3. Однофазное КЗ на корпуса оборудования:

- а) ток однофазного КЗ меньше, чем при КЗ на N-проводники;
- б) срабатывает обычная токовая защита в фазных проводниках.

4. Обрыв N-проводника питающей линии:

- а) возможно продолжение работы в режиме, близком к нормальному;

- б) происходит повреждение оборудования до отключения питающей его линии токовыми защитами;

- в) необходим немедленный аварийный останов.

5. Обрыв РЕ-проводника:

а) возможно продолжение работы в режиме, близком к нормальному;

б) возникает скрытая опасность для персонала, необходим немедленный аварийный останов.

6. Обрыв N-проводника питающей линии и однофазное КЗ на корпус:

а) появляется опасность для персонала других потребителей при возникновении большого напряжения прикосновения на корпусах оборудования;

б) возникает несимметрия фазных напряжений у других потребителей;

в) не срабатывают токовые защиты в фазных проводниках;

г) блуждающий ток перетекает в проводники других потребителей;

д) возникает режим, предусмотренный расчетами.

7. Обрыв РЕ-проводника питающей линии и однофазное КЗ на корпус:

а) появляется опасность для персонала других потребителей при возникновении большого напряжения прикосновения на корпусах оборудования;

б) не срабатывают токовые защиты в фазных проводниках;

в) аварийный ток перетекает в проводники других потребителей;

г) возникает режим, предусмотренный расчетами.

Результаты анализа сетей до 1 кВ при различных режимах нейтрали приведены в таблице 4.5. Кроме того, делаются следующие выводы:

I. Целесообразна установка защит для контроля фазного напряжения:

а) по условиям электробезопасности;

б) по условиям работы оборудования.

II. Возможно появление большого значения индуцированного (наведенного) напряжения на корпусах оборудования при грозе и вблизи электрифицированных железных дорог.

III. Необходима установка защит для контроля целостности РЕ-проводников защитных заземлений.

IV. Обязательно сопоставление значений сопротивлений источника питания и потребителя.

V. Требуются прокладка дополнительных кабелей и проводников и увеличение расхода цветных металлов при переходе на другой тип сети.

VI. Необходима обязательная установка на вводных устройствах коммутационных аппаратов для немедленного аварийного останова при обрыве N- и РЕ-проводников.

VII. Увеличивается объем регламентных работ и контроля параметров сети по сравнению с сетью TN-C.

VIII. Возможна совместная работа на одной подстанции сети TN-C с сетями других типов.

Особого внимания заслуживает проблема присоединения водопроводной сети на вводе электроустановки к главной заземляющей шине. Согласно ПУЭ водопровод может использоваться как естественный заземлитель и сторонняя проводящая часть, однако при этом на него будет вынесен потенциал нейтрали при всех несимметричных нагрузках и аварийных режимах подстанции. Этот потенциал каждый может "оценить" при прикосновении к крану: обычно он составляет 3-10 В, а в аварийных режимах — гораздо больше. В случае отсутствия на вводе металлического соединения с нейтралью потенциал на водопроводе в жилых домах могут создать граждане, использующие РЕ-проводники вместо N-проводников. Согласно рекомендациям МЭК на сторонних проводящих частях он не должен быть более 6 В переменного тока. Согласно ГОСТ 12.1.038-82 напряжение прикосновения при нормальном режиме бытовой и производственной техники не должно превышать 2В, а в условиях влажности оно должно быть в три раза меньше. Система выравнивания потенциалов в данных случаях обычно неэффективна. Поэтому для этих ситуаций необходимо внести в ПУЭ требование об обязательном отделении пластмассовой изолирующей вставкой на вводе в здание распределительной водопроводной сети в помещениях от магистральных металлических труб, используемых для повторного заземления электроустановок.

В прежних редакциях ПУЭ предусматривались металлоемкие и пассивные меры пожаро- и электробезопасности. Результатом явился неуклонный рост числа смертельных исходов при электротравматизме (до 12 на 1 млн. населения в 1982г.). В этом же году в странах, применяющих нормы МЭК, данный показатель составлял в среднем 2,85, и наблюдалась тенденция к дальнейшему его снижению. В России в 1998г. он достиг 18. Кроме характерного для нас пренебрежения собственной безопасностью, такое положение можно объяснить и несовершенством прежних ПУЭ. Защита электроустановок от сверхтоков выполнялась самыми примитивными, а то и подручными средствами, без систематического инструментального контроля их работоспособности, а если он и осуществлялся, то низкоквалифицированным персоналом. В этой связи седьмую редакцию ПУЭ о применении для электроустановок зданий сетей TN-C-S и TN-S надо еще более ужесточить и добавить требование об обязательном оснащении электроустановок УЗО-Д.

Таблица 4.5

Номера режимов, выводы и рекомендации по обеспечению безопасности сети		TN-C	TN-C-S	TN-S	TT
1	а)	Да	Да	Нет	Нет
	б)	Да	Да	Нет	Нет
2	а)	Да	Да	Нет	Нет
	б)	Да	Да	Да	Да
3	а)	Нет	Нет	Нет	Да
	б)	Да	Да	Да	Нет
4	а)	Да	Да	Нет	Нет
	б)	Нет	Нет	Да	Да
	в)	Нет	Нет	Да	Да
5	а)	Да	Да	Да	Да
	б)	Да	Да	Да	Да
6	а)	Да	Да	Нет	Нет
	б)	Да	Да	Да	Нет
	в)	Нет	Нет	Да	Да
	г)	Да	Да	Да	Ист
	д)	Нет	Нет	Да	Да
7	а)	РЕ- и N-проводники совмещены	РЕ- и N-проводники совмещены	Да	-
	б)			Да	-
	в)			Да	-
	г)			Нет	-
I	а)	Да	Да	Нет	Нет
	б)	Да	Да	Да	Да
II		Да	Да	Да	Нет
III		Да	Да	Да	Да
IV		Да	Да	Да	Нет

V	-	Расход проводов увеличи- вается на 20 - 30 %	Расход проводов и кабелей увеличи- вается на 20 - 30 %	Нет
VI	Нет	Нет	Да	Да
VII	-	Да	Да	Да
VIII	-	Да	Да	Нет

ГЛАВА 5. ЭЛЕМЕНТЫ ЗАЩИТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Предохранители. Общие сведения

Предохранители — это электрические аппараты, предназначенные для защиты электрических цепей от токовых перегрузок и токов КЗ. Основными элементами предохранителя являются плавкая вставка, включаемая последовательно с защищаемой цепью, и дугогасительное устройство

К предохранителям предъявляются следующие требования.

1. Времятоковая характеристика предохранителя должна проходить ниже, но возможно ближе к времятоковой характеристике защищаемого объекта.
2. Время срабатывания предохранителя при КЗ должно быть минимально возможным, особенно при защите полупроводниковых приборов. Предохранители должны работать с токоограничением (§ 4.3).
3. При КЗ в защищаемой цепи предохранители должны обеспечивать селективность защиты.
4. Характеристики предохранителя должны быть стабильными, а технологический разброс их параметров не должен нарушать надежность защиты.
5. В связи с возросшей мощностью установок предохранители должны иметь высокую отключающую способность.
6. Конструкция предохранителя должна обеспечивать возможность быстрой и удобной замены плавкой вставки при ее перегорании.

Нагрев плавкой вставки при длительной нагрузке

Основной характеристикой предохранителя является времятоковая характеристика, представляющая собой зависимость времени плавления вставки от протекающего тока. Для совершенной защиты желательно, чтобы времятоковая характеристика предохранителя (кривая 1 на рисунке 5.1) во всех точках шла немного ниже характеристики защищаемой цепи или объекта (кривая 2 на рисунке 5.1). Однако реальная характеристика предохранителя (кривая 3) пересекает кривую 2. Поясним это. Если характеристика предохранителя соответствует кривой 1, то он будет перегорать из-за старения или при пуске двигателя. Цепь будет отключаться при отсутствии недопустимых перегрузок. Поэтому ток плавления вставки выбирается больше номинального тока нагрузки. При этом кривые 2 и 3 пересекаются. В области больших перегрузок (область *Б*) предохранитель защищает объект. В области *А* предохранитель объект не защищает.

При небольших перегрузках (1,5 - 2) $I_{ном}$ нагрев предохранителя протекает медленно. Большая часть тепла отдается окружающей среде. Сложные условия теплоотдачи затрудняют расчет плавкой вставки.

Ток, при котором плавкая вставка сгорает при достижении ею установившейся температуры, называется пограничным током $I_{погр.}$.

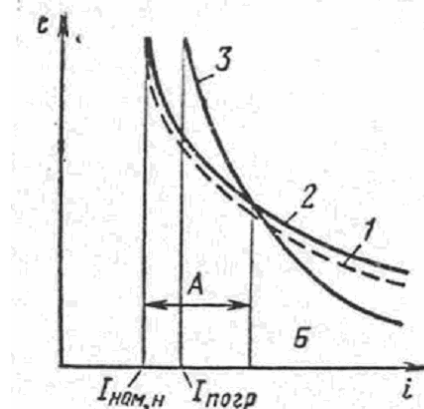


Рисунок 5.1. Согласование характеристик предохранителя и защищаемого объекта

Для того чтобы предохранитель не срабатывал при номинальном токе $I_{ном}$, необходимо $I_{погр} > I_{ном, н.}$ С другой стороны, для лучшей защиты значение $I_{погр}$ должно быть возможно ближе к номинальному. При токах, близких к пограничному, температура плавкой вставки должна приближаться к температуре плавления.

В связи с тем, что время плавления вставки при пограничном токе велико (более 1 ч) и температура плавления ее материала составляет много сотен градусов Цельсия, все детали предохранителя нагреваются до высоких температур. Происходит тепловое старение плавкой вставки.

Для снижения температуры плавления вставки при ее изготовлении применяются легкоплавкие металлы и сплавы. Материалы плавких вставок и их свойства даны в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Металл вставки	Удельное сопротивление ρ_0 , мкОм·м	Температура, °С		A' , $A^2 \cdot c / мм^2$	A'' , $A^2 \cdot c / мм^2$	$A' + A''$
		$\theta_{доп}$	$\theta_{пл}$			
Медь	0,0153	250	1083	80000	11600	91600
Серебро	0,0147	-	961	62000	8000	70000
Цинк	0,06	200	419	9000	3000	12000
Свинец	0,21	150	327	1200	400	1600

Примечание: $\theta_{доп}$ — допустимая температура плавкой вставки при длительном протекании тока; $\theta_{пл}$ — температура плавления вставки; A' и A'' — коэффициенты, определяющие время плавления при КЗ. Вре-

мя нагрева плавкой вставки от начальной температуры до полного ее разрушения определяется суммой коэффициентов $A' + A''$.

Наименьшую температуру плавления имеет свинец. Но удельное сопротивление свинца в 12 раз выше, чем у меди. Для того чтобы при прохождении данного тока вставка нагрелась до допустимой температуры (150°C), ее сечение должно быть значительно больше, чем сечение вставки из меди.

При плавлении вставки пары металла ионизируются в возникающей дуге благодаря высокой температуре. Из-за большого объема вставки количество паров металла в дуге велико, что затрудняет ее гашение и уменьшает предельный ток, отключаемый предохранителем. Из-за этих особенностей вставок из легкоплавких металлов широкое распространение получили медные и серебряные плавкие вставки с металлургическим эффектом, который объясняется ниже. На тонкую медную проволоку (диаметром менее $0,001\text{ м}$) наносится шарик из олова. При нагреве вставки сначала плавится олово, имеющее низкую температуру плавления (232°C). В месте контакта олова с проволокой начинается растворение меди и уменьшение ее сечения. Это вызывает увеличение сопротивления и повышение потерь в этой точке. Процесс длится до тех пор, пока медная проволока не расплавится в точке расположения оловянного шарика. Возникшая при этом дуга расплавляет проволоку на всей длине. Применение оловянного шарика снижает среднюю температуру плавления вставки до 280°C .

Отношение $I_{\text{погр}} / I_{\text{ном}}$ уменьшается до 1,2, что дает улучшение времятоковой характеристики.

Стабильность времятоковой характеристики в значительной степени зависит от окисления плавкой вставки. Свинец и цинк образуют на воздухе пленку оксида, которая предохраняет вставку от изменения сечения. Медная вставка при длительной работе и высокой температуре интенсивно окисляется. Пленка оксида при изменении температурного режима отслаивается, и сечение вставки постепенно уменьшается. В результате плавкая вставка перегорает при номинальном токе, если ее температура при токе, близком к пограничному, выбрана высокой. В таблице 5.1 приведены рекомендуемые допустимые температуры $\Theta_{\text{доп}}$ вставок при номинальном токе. Температура медной вставки при токе, близком к номинальному, должна быть значительно ниже температуры плавления. Поэтому приходится завышать сечение вставки и тем самым увеличивать отношение $I_{\text{погр}} / I_{\text{ном}}$ примерно до 1,8, что ухудшает защитные свойства предохранителя.

Серебряные плавкие вставки не подвержены тепловому старению, и для них отношение $I_{\text{погр}} / I_{\text{ном}}$ определяется только нагревом.

У вставок из легкоплавких материалов эксплуатационная температура ближе к температуре плавления, что позволяет снизить отношение $I_{\text{погр}} / I_{\text{ном}}$ до 1,2—1,4.

В настоящее время в качестве материала плавкой вставки начали применять алюминий. Пленка оксида на поверхности вставки защищает алюминий от коррозии и делает характеристику предохранителя стабильной. Большее удельное сопротивление материала компенсируется увеличением сечения вставки. Алюминий имеет температуру плавления ниже, чем у меди (658 против 1083 °С).

Времятоковые характеристики предохранителей со вставками постоянного сечения из легкоплавкого металла хорошо согласуются с характеристиками силовых трансформаторов и других подобных объектов. Это объясняется низкой температурой плавления, стойкостью против коррозии и малой теплопроводностью материала таких вставок.

Медная вставка из-за высокой теплопроводности, высокой температуры плавления и большого отношения $I_{\text{погр}} / I_{\text{ном}}$ в области малых перегрузок не обеспечивает защиту объекта (область А, рис. 5.1).

Нагрев плавкой вставки при коротком замыкании

Если ток, проходящий через вставку, в 3—4 раза больше номинального, то практически процесс нагрева идет адиабатически, т.е. все тепло, выделяемое плавкой вставкой, идет на ее нагрев.

Время нагрева вставки до температуры плавления

$$t_{\text{пл}} = A' \frac{q^2}{I_{\text{к}}^2} = A' / J_{\text{к}}^2,$$

где A' — постоянная, определяемая только свойствами материала и от размера вставки не зависящая; q — поперечное сечение вставки; $I_{\text{к}}$ — ток, протекающий по вставке при КЗ защищаемой цепи; $J_{\text{к}}$ — плотность тока во вставке.

После того как температура плавкой вставки достигла температуры плавления, для перехода вставки из твердого состояния в жидкое ей необходимо сообщить тепло, равное скрытой теплоте плавления.

По мере того как часть плавкой вставки из твердого состояния перейдет в жидкое, ее удельное сопротивление резко увеличится (в десятки раз). Время перехода из твердого состояния в жидкое

$$t_{\text{перех}} = \frac{\gamma L}{\rho_2 - \rho_1} \left(\ln \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \frac{q^2}{I_{\text{к}}^2} = A'' \frac{q^2}{I_{\text{к}}^2},$$

Где ρ_1 , — удельное сопротивление материала вставки при температуре плавления; ρ_2 — удельное сопротивление материала вставки в жид-

ком состоянии; γ — плотность материала вставки; L — скрытая теплота плавления на единицу массы материала вставки.

Значения постоянных A' и A'' для наиболее часто применяемых металлов даны в табл. 5.1. В действительности процесс плавления идет более сложно. Как только появится жидкий участок вставки, электродинамические силы, сжимающие проводник, образуют суженные участки. В этих участках возрастает плотность тока и повышается температура. Уменьшение сечения вставки создает разрывающие усилия, аналогичные силам в контактах при КЗ. Таким образом, как правило, дуга загорается раньше, чем вставка полностью перейдет в жидкое состояние.

Основным параметром предохранителя при КЗ является предельный ток отключения — ток, который он может отключить при возвращающемся напряжении, равном наибольшему рабочему напряжению.

Время существования дуги зависит от конструкции предохранителя. Полное время отключения цепи предохранителем

$$t_{\text{пр}} = t_{\text{пл}} + t_{\text{перех}} + t_{\text{дуги}}.$$

Для предохранителя со вставкой, находящейся в воздухе,

$$t_{\text{пр}} = \left(A' + \frac{A''}{n} \right) \frac{q^2}{I_{\text{к}}^2} k_0,$$

где коэффициенты $n = 3$ учитывает преждевременное разрушение вставки, а $k_0 = 1,2-1,3$ учитывает длительность горения дуги.

В предохранителях с наполнителем (закрытого типа) разрушение вставки до полного ее плавления менее вероятно. Время отключения цепи предохранителем

$$t_{\text{пр}} = (A' + A'') \frac{q^2}{I_{\text{к}}^2} + t_{\text{д}} \approx (A' + A'') \frac{q^2}{I_{\text{к}}^2} k_{\text{д}}.$$

Коэффициент $k_{\text{д}} = 1,7-2$ учитывает длительность горения дуги.

Плавление вставки переменного сечения происходит в перешейках с наименьшим сечением. Процесс нагрева перешейка протекает так быстро, что тепло почти не успевает отводиться на участки повышенного сечения. Наличие перешейков уменьшенного сечения позволяет резко снизить время с момента начала КЗ до появления дуги. Процесс гашения дуги начинается до момента достижения током КЗ установившегося или даже амплитудного значения. Дуга образуется через время t_1 после начала КЗ, когда ток в цепи значительно меньше установившегося значения $I_{\text{к, уст}}$.

Средства дугогашения позволяют погасить дугу за миллисекунды. При этом проявляется эффект токоограничения, показанный на рисунке 5.2. При отключении поврежденной цепи с токоограничением облегчается

гашение дуги, так как отключается не установившийся ток КЗ, а ток, определяемый временем плавления вставки.

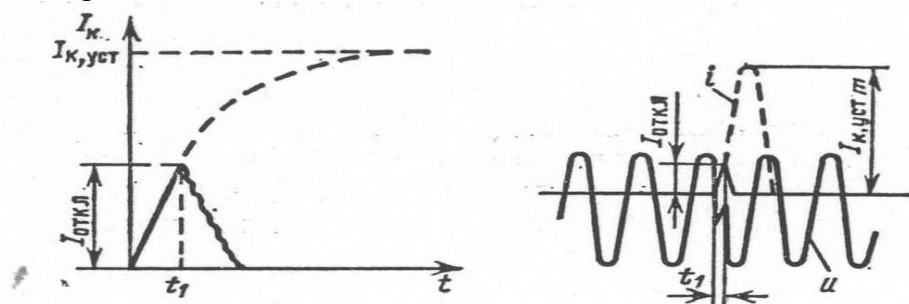


Рисунок 5.2. Отключение постоянного и переменного тока предохранителем с токоограничением.

С ростом номинального тока возрастает, естественно и минимальное сечение вставки. Увеличение этого сечения приводит к возрастанию длительности плавления вставки и уменьшению эффекта токоограничения. Интенсивный отвод тепла от вставки при номинальном режиме позволяя! выбрать уменьшенное сечение вставки и повысить эффект токоограничения.

Конструкция предохранителей низкого напряжения

Предохранители с гашением дуги в закрытом объеме.

Предохранители на токи от 15 до 60 А имеют упрощенную конструкцию. Плавкая вставка 1 прижимается к латунной обойме 4 колпачком 5, который является выходным контактом (рисунок 5.3, а). Плавкая вставка 1 штампуется из цинка, являющегося легкоплавким и стойким к коррозии материалом. Указанная форма вставки позволяет получить благоприятную времятоковую (защитную) характеристику. В предохранителях на токи более 60 А плавкая вставка 1 присоединяется к контактным ножам 2 с помощью болтов (рисунок 5.3, б).

Вставка располагается в герметичном трубчатом патроне, который состоит из фибрового цилиндра 3, латунной обоймы 4 и латунного колпачка 5.

При отключении сгорают суженные перешейки плавкой вставки, после чего возникает дуга. Под действием температуры дуги фибровые стенки патрона выделяют газ, в результате чего давление в патроне за доли полупериода поднимается до 4—8 МПа. За счет увеличения давления поднимается вольт-амперная характеристика дуги, что способствует ее быстрому гашению.

Плавкая вставка может иметь от одного до четырех сужений (рисунки 5.3, в) в зависимости от номинального напряжения. Суженные участки вставки способствуют быстрому ее плавлению при КЗ и создают эффект токоограничения.

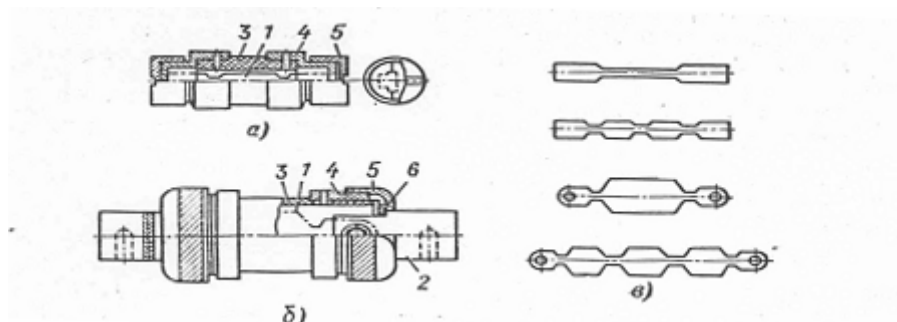


Рис. 5.3. Предохранитель типа ПР-2

Поскольку гашение дуги происходит очень быстро (0,002 с), можно считать, что уширенные части вставки в процессе гашения остаются неподвижными. Рассмотрим вставку с четырьмя перешейками. После их перегорания образуются четыре разрыва. На каждом катоде разрыва восстанавливается электрическая прочность около 200 В, а суммарная прочность предохранителей достигает 800 В. Это явление наряду с высоким давлением позволяет надежно гасить дугу при напряжении источника до 500 В.

Давление внутри патрона пропорционально квадрату тока в момент плавления вставки и может достигать больших значений. Поэтому фибровый цилиндр должен обладать высокой механической прочностью, для чего на его концах установлены латунные обоймы 4. Диски 6, жестко связанные с контактными ножами 2, крепятся к обойме патрона 4 с помощью колпачков 5.

Предохранители работают бесшумно, практически без выброса пламени и газов, что позволяет устанавливать их на близком расстоянии друг от друга.

Предохранители выпускаются двух осевых размеров – короткие и длинные. Короткие предназначены для работы на переменном напряжении, не выше 380 В. Они имеют меньшую отключающую способность, чем длинные, рассчитанные на работу в сети с напряжением до 500 В.

В зависимости от номинального тока выпускается шесть габаритов патронов различных диаметров. В патроне каждого габарита могут устанавливаться вставки на различные номинальные токи. Так, в патроне на номинальный ток 15 А могут быть установлены вставки на ток 6, 10 и 15 А.

В таблице 5.2 приведены значения испытательных токов для предохранителя типа ПР-2.

Таблица 5.2

Номинальный ток вставки, А	Длительность прохождения испытательного тока, ч	Кратность испытательного тока по отношению к номинальному	
		Нижнее значение	Верхнее значение
6, 10	1	1,5	2,1
15, 20, 25	1	1,4	1,75
35 – 350	1	1,3	1,6
430 – 1000	2	1,3	1,6

Различают нижнее и верхнее значения испытательного тока. Нижнее значение испытательного тока — это максимальный ток, который, протекая в течение 1 ч, не приводит к перегоранию предохранителя. Верхнее значение испытательного тока — это минимальный ток, который, проходя в течение 1 ч, плавит вставку предохранителя. С достаточной точностью можно принять пограничный ток равным среднеарифметическому испытательных токов.

Предохранители типа ПР-2 обладают токоограничением. Так, в цепи с током КЗ 50 000 А плавкая вставка на номинальный ток 6 А перегорает при токе всего 400 А. Однако чем больше номинальный ток, тем меньше эффект токоограничения. При номинальном токе 600 А токоограничение отсутствует, так как дуга горит весь полупериод.

Предохранители с мелкозернистым наполнителем.

Эти предохранители более совершенны, чем предохранители ПР-2. Корпус квадратного сечения 1 предохранителя типа ПН-2 (рисунок 5.4) изготавливается из прочного фарфора или стеатита. Внутри корпуса расположены ленточные плавкие вставки 2 с наполнителем — кварцевый песок 3. Плавкие вставки привариваются к диску 4, который крепится к пластинам 5, связанным с ножевыми контактами 9. Пластины 5 крепятся к корпусу винтами.

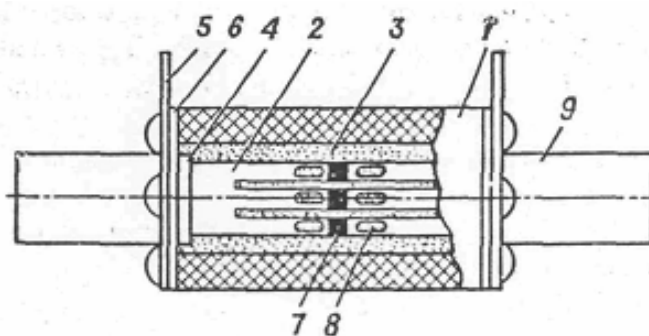


Рисунок 5.4. Предохранитель типа ПН-2.

В качестве наполнителя используется кварцевый песок с содержанием SiO_2 не менее 98 %, с зернами размером $(0,2-0,4) \cdot 10^{-3}$ м и влажностью не выше 3 %. Перед засыпкой песок тщательно просушивается при температуре 120—180 °С. Зерна кварцевого песка имеют высокую теплопроводность и хорошо развитую охлаждающую поверхность.

Плавкая вставка выполняется из медной ленты толщиной 0,1—0,2 мм. Для получения токоограничения вставка имеет суженные сечения 8. Плавкая вставка разделена на три параллельных ветви для более полного использования наполнителя. Применение тонкой ленты, эффективный теплоотвод от суженных участков позволяют выбрать небольшое минимальное сечение вставки для данного номинального тока, что обеспечивает высокую токоограничивающую способность. Соединение нескольких суженных участков последовательно способствует замедлению роста тока после плавления вставки, так как возрастает напряжение на дуге предохранителя. Для снижения температуры плавления на вставки наносятся оловянные полоски 7 (металлургический эффект).

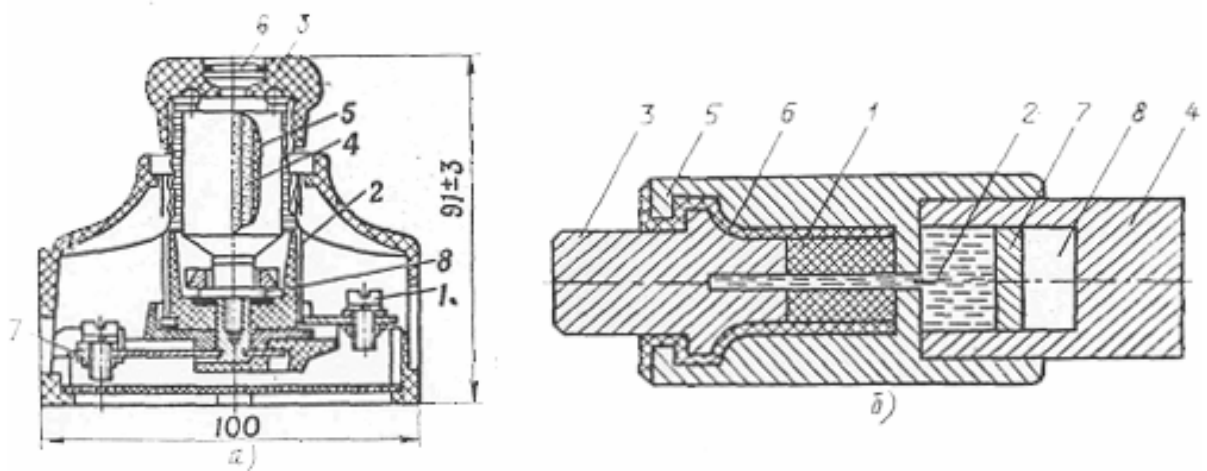
При КЗ плавкая вставка сгорает и дуга горит в канале, образованном зернами наполнителя. Из-за горения в узкой щели при токах выше 100 А дуга имеет возрастающую вольт-амперную характеристику. Градиент напряжения на дуге очень высок и достигает $(2-6) \cdot 10^4$ В/м. Этим обеспечивается гашение дуги за несколько миллисекунд.

После срабатывания предохранителя плавкие вставки вместе с диском 4 заменяются, после чего патрон засыпается песком. Для герметизации патрона под пластины 5 кладется асбестовая прокладка 6, что предохраняет песок от увлажнения. При номинальном токе 40 А и ниже предохранитель имеет более простую конструкцию.

Предохранители ПН-2 выпускаются на номинальный ток до 630 А. Предельный отключаемый ток КЗ, который может отключаться предохранителем, достигает 50 кА (действующее значение тока металлического КЗ сети, в которой устанавливается предохранитель).

Малые габариты, незначительная затрата дефицитных материалов, высокая токоограничивающая способность являются достоинствами этого предохранителя.

В малогабаритных распределительных устройствах применяются резьбовые предохранители типа ПРС (рисунок 5.5, а). Один конец цепи по-



двоякся к контакту 1, который связан с контактной гильзой 2, соединенной резьбой с контактом съемной головки 3. Плавкая вставка 4 располагается в фарфоровом цилиндре 5, заполненном кварцевым песком. На торцах цилиндра 5 укреплены контактные колпачки, с которыми соединена плавкая вставка 4. Второй конец цепи через контакт 7 соединяется с контактным винтом 8. Предохранитель имеет указатель срабатывания. При сгорании плавкой вставки освобождается специальная пружина, которая выбрасывает глазок в застекленное отверстие 6. После срабатывания предохранителя заменяется цилиндр 5 со сгоревшей плавкой вставкой и сигнализирующим устройством.

Рисунок 5.5. Предохранитель типа ПРС (а), жидкометаллический предохранитель (б).

Предохранители этого типа выпускаются на токи до 100 А, напряжение до 440 В постоянного тока и до 500 В переменного тока частотой 50 Гц. Предельно отключаемый ток составляет 60 кА.

Эти предохранители более сложны в производстве и более дороги, чем предохранители ПН-2. Поэтому их применение целесообразно при малых габаритах распределительного устройства и ограниченном времени обслуживания (после сгорания плавкой вставки).

Предохранители с жидкометаллическим контактом.

В таком предохранителе (рис. 5.5, б) электроизоляционная трубка / имеет капилляр, заполненный жидким металлом 2. Капилляр с жидким металлом герметично закрыт электродами 3, 4 и корпусом 5 с уплотнением 6 и имеет специальное демпфирующее устройство 7, 8. При протекании большого тока жидкий металл в нем испаряется, образуется паровая пробка и электрическая цепь размыкается. После определенного времени пары металла конденсируются и контакт восстанавливается. Предельный отключаемый ток таких предохранителей достигает 250 кА при напряжении 450 В переменного тока. Предохранители работают многократно с большим токоограничением.

Быстродействующие предохранители для защиты полупроводниковых приборов.

Малая тепловая инерция, быстрый прогрев полупроводникового перехода крайне затрудняют защиту мощных диодов, тиристоров и транзисторов при токовых перегрузках. Обычные типы предохранителей и автоматических выключателей из-за относительно большого времени срабатывания не обеспечивают защиту полупроводниковых приборов при КЗ. Для

выполнения этой задачи разработаны специальные быстродействующие предохранители.

При времени протекания тока $t < 0,02$ с можно считать, что процесс нагрева прибора протекает по адиабатическому закону. Для удобства согласования характеристик прибора и предохранителя вводится понятие интеграла Джоуля, $G = \int_t^0 i^2 dt$ где t — длительность протекания тока через прибор.

Для эффективной защиты необходимо, чтобы полный джоулев интеграл предохранителя был меньше джоулевого интеграла защищаемого прибора. Джоулев интеграл предохранителя состоит из джоулевого интеграла нагрева до температуры плавления вставки $G_{пл}$ и джоулевого интеграла гашения образовавшейся дуги $G_{гаш}$. С целью сокращения первой составляющей предохранитель должен работать с большим токоограничением. Для достижения этой цели плавкая вставка выполняется из серебра, имеет перешеек с минимальным сечением и охлаждается кварцевым наполнителем.

С целью улучшения охлаждения при больших номинальных токах плавкая вставка выполняется из ленты толщиной 0,05—0,2 мм. При больших токах вставка имеет несколько параллельных ветвей. Помогает также заполнение кварцевым песком под большим давлением. В некоторых случаях для дальнейшего уменьшения перешейка предохранитель имеет искусственное водяное охлаждение.

Для уменьшения времени горения дуги плавкая вставка имеет большое число перешейков. После плавления вставки образуется ряд последовательно включенных дуг, благодаря чему вольт-амперная характеристика предохранителя поднимается. Число перешейков ограничивается перенапряжением, которое возникает при отключении цепи.

При постоянном токе гашение дуги осложняется тем, что ток не проходит через нуль и вся электромагнитная энергия отключаемой цепи рассеивается в предохранителе. Решающим фактором при постоянном токе является постоянная времени цепи $T = L/R$. С увеличением постоянной времени T условия работы предохранителя утяжеляются. Необходимо выбирать предохранитель на более высокое номинальное напряжение, чем при переменном токе. Время плавления вставки при постоянном токе

$$t_{пл} = \sqrt[3]{3Bq_0^2 \left(\frac{T}{I_{к,уст}} \right)^2},$$

$$t_{пл} = \sqrt[3]{3Bq_0^2 / (\omega I_{к,уст}^2)},$$

при переменном токе

где B — постоянная, зависящая от удельной теплоты плавления и испарения материала. Для серебра $B=8 \cdot 10^4 \text{ А}^2 \cdot \text{с}/\text{мм}^4$, для меди $B=10^5 \text{ А}^2 \cdot \text{с}/\text{мм}^4$, для алюминия $B=3,4 \cdot 10^4 \text{ А}^2 \cdot \text{с}/\text{мм}^4$, q_0 — сечение перешейка, мм^2 ; T — постоянная времени цепи, с; $I_{к, \text{уст}}$ — установившееся значение тока КЗ цепи.

При $f \geq 50 \text{ Гц}$ и $T \geq 2 \text{ мс}$ время плавления на постоянном токе больше, чем на переменном. Максимальный пропускаемый предохранителем постоянный ток

$$i_0 = \sqrt[3]{\frac{3Bq_0^2 I_{к, \text{уст}}}{T}}.$$

Обычно предохранители рассчитывают для работы в цепях с постоянной времени $T \leq 35 \text{ мс}$.

Конструктивно быстродействующий предохранитель представляет собой корпус из прочного фарфора, внутри которого расположены плавкие вставки и кварцевый песок. Контакты укрепляются к корпусу винтами и могут иметь различное исполнение.

В современных преобразовательных установках каждый полупроводниковый прибор имеет предохранитель. Токи, протекающие через предохранитель, могут достигать 100—200 кА. При разрушении предохранителя может произойти авария преобразовательной установки. В связи с этим быстродействующие предохранители должны иметь большую механическую прочность и обладать высокой надежностью.

В СССР Выпускается серия быстродействующих предохранителей ПП-57 на номинальные токи 40—800 А и готовится к выпуску серия ПП-59 на номинальные токи 250—2000 А. Номинальные напряжения составляют до 1250В переменного и до 1050В постоянного тока. Предохранитель ПП-59 на ток 400 А и напряжение 660 В имеет джоулев интеграл отключения $320 \cdot 10^3 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$.

Быстродействующие предохранители предназначены только для защиты от КЗ. Защита от перегрузок должна выполняться другими аппаратами.

Блоки предохранитель — выключатель.

Для уменьшения габаритных размеров распределительного устройства выпускаются блоки предохранитель—выключатель (БПВ), обеспечивающие отключение номинальных токов и защиту цепей от токовых перегрузок и КЗ. В БПВ (рисунок 5.6) при вращении рукоятки 1 траверса 2 с установленными на ней; предохранителями 3 перемещается и контакты 4 аппарата раз-

мыкаются. Наличие двух разрывов на полюс обеспечивает отключение номинальных токов до 350 А при переменном напряжении до 550 В. Для отключения номинального постоянного тока 350 А при напряжении до 440 В разрывы снабжаются дугогасительными деионными решетками.

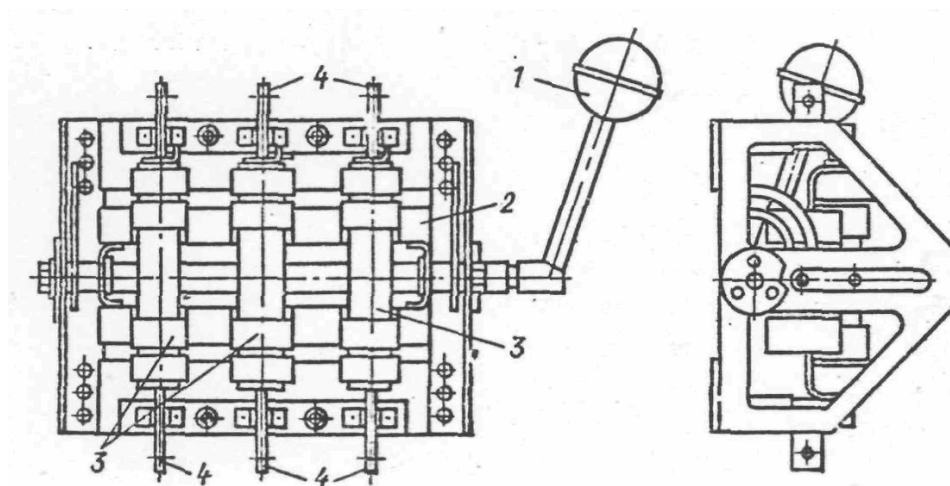


Рисунок 5.6. Блок предохранитель — выключатель

Съем патрона с перегоревшей вставкой возможен только в отключенном положении БПВ после освобождения специальной защелки. Электрическая износостойкость аппарата 2500, механическая — 5000 циклов.

Выбор предохранителей

Выбор по условиям длительной эксплуатации и пуска.

В процессе длительной эксплуатации температура нагрева предохранителя не должна превосходить допустимых значений. В этом случае обеспечивается стабильность времятоковых характеристик предохранителя. Для выполнения этого требования необходимо, чтобы патрон и плавкая вставка выбирались на номинальный ток, равный или несколько больший номинального тока защищаемой установки.

Предохранитель не должен отключать установку при перегрузках, которые являются эксплуатационными. Так, пусковой ток асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором может достигать $7 I_{ном}$. По мере разгона пусковой ток падает до значения, равного номинальному току двигателя. Длительность пуска зависит от характера нагрузки. Например, для привода металлорежущих станков с относительно небольшой инерцией механизма время разгона двигателя составляет 1 с. Процесс разгона центрифуги происходит значительно медленней из-за большой инерции

механизма и длительность пуска может достигать 10 с и более. Предохранитель должен не перегорать при воздействии пусковых токов, а в плавких вставках не должно происходить старения под действием этих токов. Экспериментально установлено, что старение плавкой вставки не происходит при токах, равных половине тока плавления. Согласно рисунку 5.7 вставка предохранителя ПН-2 при времени 1 с плавится при токе, равном $5I_{\text{ном}}$. Вследствие производственных допусков времятоковая характеристика имеет разброс (штриховые кривые). Если пуск длится 1 с, то среднее значение пускового тока за этот период должно быть не более 0,5 тока плавления вставки за это же время. Таким образом пусковой ток $I_{\text{п}}$ связан с током вставки соотношением $I_{\text{ц}} = 0,5I_{\text{пл}} = 0,5 \cdot 5I_{\text{в,ном}}$ и, следовательно,

$$I_{\text{ном}} = 0,4 I_{\text{п}},$$

т.е. номинальный ток вставки выбирается по пусковому току нагрузки.

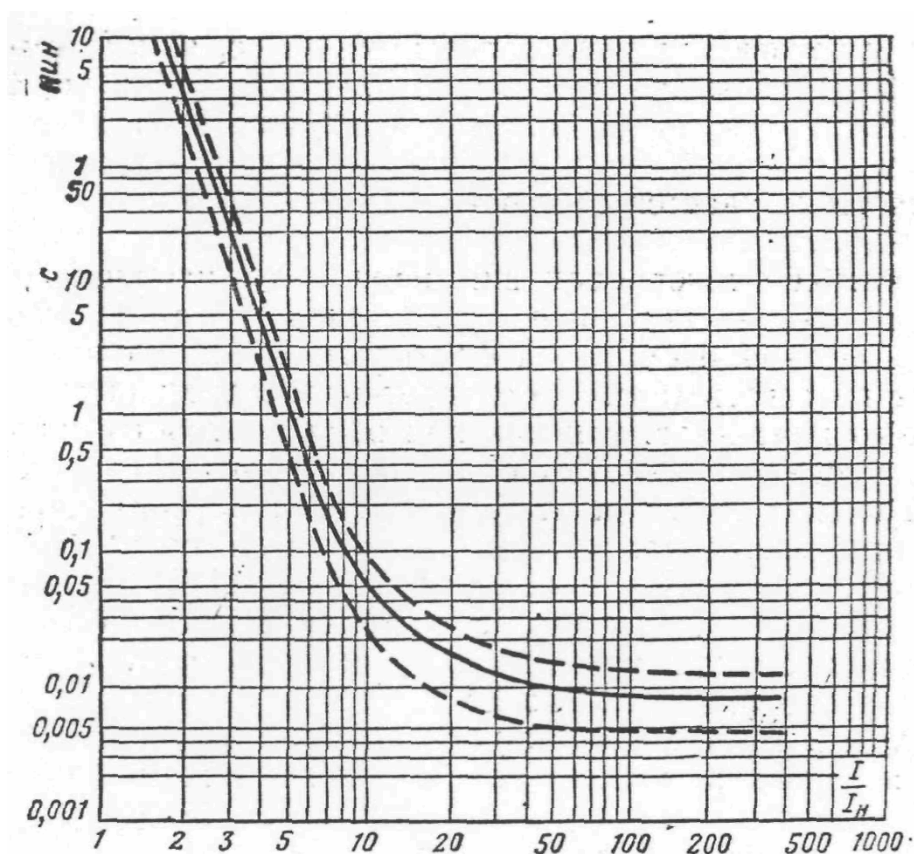


Рис. 5.7. Времятоковая характеристика предохранителя ПН-2

Для тяжелых условий пуска, когда двигатель медленно разворачивается (привод центрифуги), или в повторно-кратковременном режиме, когда пуски происходят с большой частотой, вставки выбирают с еще большим запасом: $I_{\text{в,ном}} = (0,5-0,6) I_{\text{п}}$. Если предохранитель стоит в „линии, питаю-

щей несколько двигателей, плавкую вставку рекомендуется выбирать по формуле

$$I_{в,ном} = 0,4[I_p + (I_p - I_{ном,двиг})]$$

где I_p — расчетный номинальный ток линии, равный $\sum I_{ном,дв}$. Разность $I_p - I_{ном,двиг}$ берется для двигателя, у которого она наибольшая.

Для двигателя с фазным ротором, если $I_p < 2 I_{ном,двиг}$, плавкую вставку можно выбирать по условию $I_{в,ном} > (1-1,25) I_{ном,дв}$ - Для двигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме, за номинальный принимается ток в режиме ПВ = 25%.

Наряду с проверкой вставки по условиям пуска или кратковременной перегрузки необходимо проводить проверку по условиям КЗ. При $I_k / I_{в, ном}$ время перегорания вставки не превышает 0,15—0,2 с, и на этом времени мало сказывается разброс характеристик вставок. При таком времени сваривание контактов контактора или магнитного пускателя маловероятно. Однако это требование часто не удается соблюсти, так как кратность $I_k / I_{в, ном}$ определяется мощностью питающего трансформатора и сопротивлением токопроводящих проводов и кабелей. Допускается применение предохранителей при кратностях $I_k / I_{в, ном} \geq 3-4$. При такой кратности время отключения может достигать 15 с, что создает опасность для обслуживающего персонала, так как при этой кратности напряжение прикосновения может оказаться опасно большим. При такой низкой кратности $I_k / I_{в, ном}$ нагрев провода при небольших перегрузках (1,6—2) может быть очень большим и может приводить к выгоранию изоляции. Поэтому установка плавких вставок с большим запасом может допускаться только в крайних случаях, когда выгорание изоляции проводников не грозит пожаром (провода уложены в стальных трубах и имеют огнестойкую изоляцию).

В заключение следует указать, что номинальное напряжение предохранителя $U_{ном, пр}$ должно быть равно номинальному напряжению сети $U_{ном, с}$

В качестве примера рассмотрим выбор предохранителей для ряда двигателей, питающихся от общего распределительного щита РЩ (рисунок 5.8). Один из вариантов параметров двигателей дан в таблице 5.3.

Таблица 5.3

Обозначение на схеме	Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Кратность пускового тока	Пусковой ток, А	Номинальный ток плавкой вставки, А		Номинальный ток предохранителя, А
						Расчетный	Выбранный	

M1	A32-2	1,7	3,7	6	22,2	8,9	10	15
M2	A41-2	2,8	5,8	5,5	31,9	12,8	15	15
M3	A62-2	20	38	6	228	91,2	100	200
M4	A51-4	4,5	9,4	6	56,5	22,6	25	60
M5	A62-6	10	21,5	4,5	96,8	38,7	60	60

Выбор плавкой вставки для каждого предохранителя проводится, как указывалось выше. Если условия пуска легкие, то для предохранителя *FU1*

$$I_{в, номFU1} = 0,4 I_{п} = 0,4 \cdot 22,2 = 8,9 \text{ А.}$$

Принимаем вставку с номинальным током 10 А,

Аналогично находят номинальные токи вставок *FU2—FU5*.

По условиям задачи во включенном состоянии могут одновременно находиться четыре двигателя. Если производится пуск, то могут запускаться сразу два двигателя. Для длительного режима

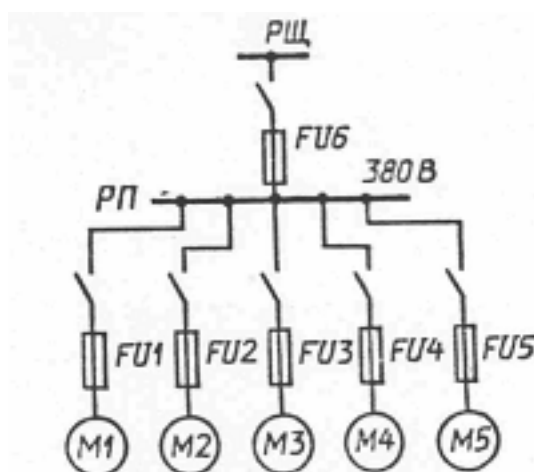
$$I_{в, номFU6} \geq I_{номM1} + I_{номM3} + I_{номM4} + I_{номM5}.$$

Самый тяжелый случай одновременного пуска двигателей *M3* и *M5*

$$I_{в, номFU6} \geq 0,4 [\Sigma I_{ном, дв} + (I_{п} - I_{ном, дв})'],$$

где $\Sigma I_{ном, дв}$ — сумма номинальных токов всех двигателей; $I_{п}$ — пусковой ток запускаемого двигателя; $(I_{п} - I_{ном, дв})'$ — разность между пусковым током запускаемого двигателя и номинальным током;

$$I_{в, номFU6} \geq 0,4 \{74,7 + [(228 - 38) + (96,8 - 21,5)]\} = 136 \text{ А.}$$



Можно принять вставку на 160 А.
Рисунок 5.8. Схема защиты плавкими предохранителями группы короткозамкнутых асинхронных двигателей

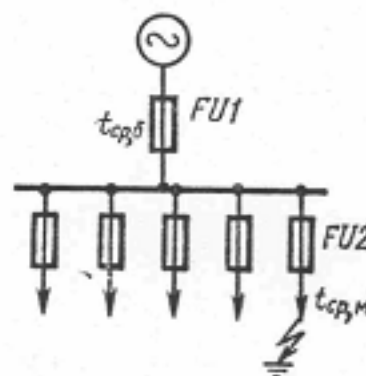


Рисунок 5.9. К расчету селективности предохранителей

Выбранные предохранители надо проверить на КЗ непосредственно у двигателя. Берется двухфазное КЗ при изолированной нейтрали и однофазное КЗ на землю, если нейтраль заземлена. Для правильной работы необходимо, чтобы

$$I_K / I_{B, \text{ном}} \geq 3 \div 4,$$

где I_K — ток КЗ у двигателя; $I_{B, \text{ном}}$ — номинальный ток плавкой вставки у двигателя.

Значение I_K зависит от активного и реактивного сопротивления источника питания (трансформатора) и питающих линий. Для двухфазного КЗ $I_{K(2)} = U_{\text{ном}} / (2Z_\Phi)$. для однофазного КЗ $I_{K(1)} = U_{\text{ном}} / \sqrt{3} Z_{\Phi 0}$ и для трехфазного КЗ $I_{K(3)} = U_{\text{ном}} / \sqrt{3} Z_\Phi$

Сопротивления фаз Z_Φ и $Z_{\Phi 0}$ определяются уравнениями

$$Z_\Phi = \sqrt{(\Sigma R_\Phi + R_T)^2 + (\Sigma X_\Phi + X_T)^2};$$

$$Z_{\Phi 0} \approx \sqrt{(\Sigma R_\Phi + R_{\Phi 0})^2 + (\Sigma X_\Phi + X_{\Phi 0})^2} + Z_{T1},$$

где R_Φ , X_Φ — активное и индуктивное сопротивления проводников фаз; $R_{\Phi 0}$, $X_{\Phi 0}$ — то же нулевого провода; R_T , X_T — то же фазы трансформатора; Z_{T1} — полное расчетное сопротивление трансформатора при замыкании на землю.

Выбранные предохранители проверяют на кратность тока КЗ и отключающую способность. Так, например, при КЗ на землю у двигателя МЗ

$$I_{K(1)} = U_{\text{ном}} / \sqrt{3} Z_{\Phi 0}.$$

$$Z_{\Phi 0} = 0,851 \text{ Ом, тогда}$$

$$I_K = 380 / I_{K(1)} = \sqrt{3} \cdot 0,851 = 258 \text{ А;}$$

$$I_K / I_{B, \text{ном}} = 258 / 60 = 4,3.$$

Предельный ток отключения предохранителя ПР2-60 равен 3500 А.

Полученное отношение больше трех, что необходимо для надежной работы предохранителей. Наибольший ток должен отключать предохранитель *FU6* при КЗ на распределительной панели РП.

$$I_{K(3)} = U_{\text{ном}} / \sqrt{3} Z_\Phi.$$

Сопротивление 2ф включает сопротивление силового трансформатора Z_T и сопротивление линии Z_L от щита РЩ до РП.

б) Выбор предохранителей по условию селективности.

Между источником энергии и потребителем обычно устанавливается несколько предохранителей (рисунок 5.9), которые должны отключать поврежденные участки по возможности селективно.

Предохранитель $FU1$, пропускающий больший номинальный ток, имеет вставку большего сечения, чем предохранитель $FU2$, установленный у одного из потребителей. При КЗ необходимо, чтобы повреждение отключалось предохранителем, расположенным у места повреждения. Все остальные предохранители, расположенные ближе к источнику, должны остаться работоспособными. Такая согласованность работы предохранителей называется избирательностью или селективностью.

Для обеспечения селективности полное время t_{p2} работы предохранителя $FU2$ должно быть меньше времени нагрева предохранителя $FU1$ до температуры плавления его вставки, т. е.

$$t_{пл1} \geq t_{p2}.$$

Для предохранителей закрытого типа (ПН-2)

$$A' \frac{q_1^2}{I_K^2} > (A'_2 + A''_2) \frac{q_2^2}{I_K^2} k_d.$$

После простейших преобразований получим условие селективности для предохранителей с гашением дуги в закрытом объеме

$$\frac{q_1}{q_2} > \sqrt{\frac{A'_2 + A''_2}{A'_1} k_d}.$$

Для закрытых предохранителей с мелкозернистым наполнителем и медной вставкой селективность соблюдается при $q_1/q_2 > 1,55$. Указанные соотношения справедливы и для случая токоограничивающих предохранителей, когда ток КЗ длится только долю полупериода.

Рассмотренный расчет носит приближенный характер, так как не учитывает конкретные характеристики данной конструкции предохранителя и отклонения реальных характеристик от номинальных из-за производственных допусков.

Для обеспечения селективности наименьшее фактическое время срабатывания предохранителя $FU1$ (на больший ток) должно быть больше наибольшего времени срабатывания предохранителя $FU2$ (на меньший номинальный ток):

$$t_{ср,б} > t_{ср,м},$$

где $t_{ср,б}$, $t_{ср,м}$ — времена срабатывания предохранителя на больший и меньший номинальные токи, соответствующие номинальной характеристике.

Время срабатывания предохранителя из-за производственных допусков может отклоняться от номинального на $\pm 50\%$. Тогда приведенное неравенство можно записать в виде

$$0,5t_{\text{ср},\text{в}} > 1,5t_{\text{ср},\text{м}}.$$

Множители 0,5 и 1,5 учитывают, что предохранитель *FU1* взят с отрицательным допуском по времени срабатывания, а предохранитель *FU2* — с положительным. В результате получим необходимое условие селективности

$$t_{\text{ср},\text{в}} > 3t_{\text{ср},\text{м}},$$

т.е. для селективной работы время срабатывания предохранителя на больший ток должно быть в 3 раза больше, чем у предохранителя на меньший ток.

Неравенство учитывает крайний случай, когда время работы предохранителя на больший номинальный ток имеет наименьшее значение, а у предохранителя на меньший номинальный ток — наибольшее значение. На основании неравенства составлена табл. 5.4. Для данной вставки

Номинальный ток вставки большего сечения предохранителя ПН-2, требующийся для строгого обеспечения селективности с током $I_{\text{ном},\text{м}}$ вставка на больший ток берется в зависимости от кратности тока. Так, при $I_{\text{к}}/I_{\text{ном},\text{м}}=10$ при токе $I_{\text{ном},\text{м}} = 30$ А вставка предохранителя на больший ток должна быть выбрана на 50 А.

Таблица 5.4

Номинальный ток вставки меньшего сечения предохранителя ПН-2, А	Номинальный ток вставки большего сечения, А, при кратности тока КЗ по отношению к номинальному току вставки меньшего сечения $I_{\text{к}}/I_{\text{ном}}$				
	10	20	50	100	150 и более
30	50	60	120	150	200
40	60	80	120	200	200
50	80	100	120	250	250
60	100	120	150	250	250
80	120	120	200	250	250
100	120	120-150	250	250	250
120	150	200	300	300	300
150	200	250	300	300	300
200	150	300	400	400	400
250	300	400	600	600	600
300	400	500	600	-	-
400	600	600	-	-	-

Если нарушение селективности не ведет к серьезным нарушениям работы защищаемой установки, то при выборе вставок отклонение характеристик предохранителей от номинальных можно принимать $\pm 25\%$.

в) Выбор быстродействующих предохранителей для защиты полупроводниковых приборов.

1. Полный джоулев интеграл при отключении предохранителя $(I^2t)_{\text{откл, пред}}$ должен быть меньше допустимого джоулевого интеграла полупроводникового прибора $(I^2t)_{\text{приб}}$. На рисунке 5.10 представлена схема мощной выпрямительной установки. В каждом плече моста установлено по пять диодов, каждый из которых защищен предохранителем FU . При пробое диода VD_k ток КЗ I_k обозначенная пунктиром, замыкается через VD_k в обратном направлении и закорачивает две фазы.

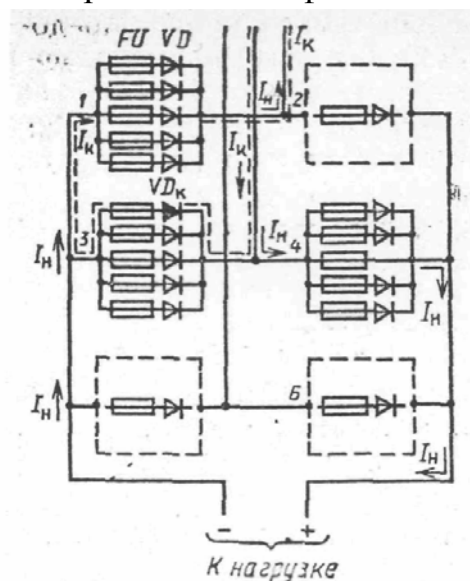


Рисунок 5.10. Защита полупроводниковых диодов в мощной выпрямительной схеме

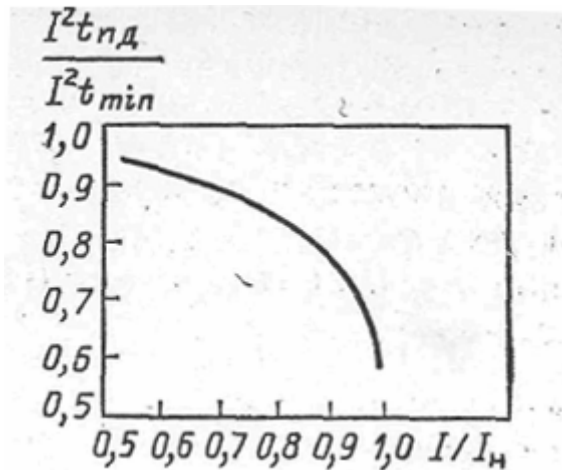


Рисунок 5.11. Зависимость преддуговых интегралов от тока предварительной нагрузки

Предохранитель FU срабатывает, поврежденный диод отключается, и схема продолжает нормальную работу с некоторой перегрузкой диодов. Для защиты диодов должно соблюдаться условие

$$(I^2 t)_{\text{отк, пред}} \leq [n(1 - c) + c]^2 (I^2 t)_{\text{приб}},$$

где n — число параллельных ветвей преобразователя; c — коэффициент неравномерности деления тока по ветвям. При равномерном распределении тока $c=0$ и

$$(I^2 t)_{\text{отк, пред}} \leq n^2 (I^2 t),$$

. Значение $(I^2 t)_{\text{приб}}$ для прибора берется из каталога или (при синусоидальном токе) по уравнению

$$(I^2 t)_{\text{приб}} = I_m^2 T / 4,$$

где I_m — допустимое значение ударного неповторяющегося тока в прямом направлении; T — период переменного тока.

2. Наибольшее значение тока, протекающего через предохранитель, должно быть

3. При срабатывании предохранителя в поврежденной ветви характеристики предохранителей в неповрежденных ветвях не должны изменяться

$$(I^2 t)_{\text{отк, пред}} \leq [n(1 - c) + c]^2 (I^2 t)_{\text{нд, пред}},$$

где $(I^2 t)_{\text{нд, пред}}$ — преддуговой джоулев интеграл плавления) в неповрежденных ветвях. Наименьшее значение $\text{пр} \times \text{С-}$ дугового интеграла можно найти по формуле

$$I^2 t_{\text{min}} = B^2 q_0,$$

4. Джоулев интеграл предохранителя зависит от напряжения

$$(I^2 t)_{\text{отк, пред}} = I^2 t_{\text{min}} \left[1 + a \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) \right]^b.$$

Значения $I^2 t_{\text{min}}$, a , b даются в технических условиях на поставку предохранителей. Для предохранителя ПП-68 $a=4,56$; $b=0,8$; $I^2 t_{\text{min}}=3,8 \cdot 10^4 \text{ А} \cdot \text{с}$.

5. Значение джоулевого интеграла для предохранителя зависит от коэффициента мощности цепи $\cos \varphi$. В технических условиях данные предохранителей приводятся для $\cos \varphi=0,1$. С повышением $\cos \varphi$ джоулев интеграл уменьшается из-за облегчения условий гашения дуги. По опытным данным, при $\cos \varphi=0,95$ джоулев интеграл уменьшается на 57%.

6. Мгновенное значение тока, при котором начинается токоограничение,

$$i_0 = \sqrt[3]{3\omega \sqrt{2} I B q_0},$$

где ω — частота переменного тока; I — действующее значение периодической составляющей отключаемого тока; B и q_0

Преддуговой интеграл предохранителя зависит от тока, который протекал до начала КЗ ($I_{\text{нач}}$). Для предохранителя ПП-58 эта зависимость представлена на рисунке 5.11, где $I^2 t_{\text{зд}}$ — преддуговой интеграл при токе нагрузки I ; $I^2 t_{\text{min}}$ — джоулев интеграл, указываемый для предохранителя ($I_{\text{нач}} = 0$).

Высоковольтные предохранители. Назначение, предъявляемые требования.

При напряжении выше 3 кВ и частоте 50 Гц применяются высоковольтные предохранители. Процесс нагрева плавкой вставки в высоковольтных предохранителях протекает так же, как и в предохранителях низкого напряжения. -

В отношении времени плавления к высоковольтным предохранителям предъявляется следующее общее требование: длительность плавления вставки должна быть менее 2 ч при токе перегрузки, равном $2I_{\text{ном}}$, и более 1 ч при токе перегрузки, равном $1,3 I_{\text{ном}}$.

Высоковольтные предохранители часто применяются для защиты трансформаторов напряжения от КЗ. Ток, текущий через предохранитель в номинальном режиме, не превышает доли ампера. В таких предохранителях время плавления вставки равно 1 мин при токе 1,25—2,5 А.

В связи с высоким значением восстанавливающегося напряжения процесс гашения дуги усложняется. В связи с этим изменяются габаритные размеры и конструкция высоковольтных предохранителей. Наибольшее

распространение получили предохранители с мелкозернистым наполнителем и стреляющего типа.

Предохранители с мелкозернистым наполнителем.

Размер зерен и материал такие же, как и в низковольтных предохранителях. Длина плавкой вставки, м, таких предохранителей может быть определена по эмпирической формуле

$$l = 0,16 + 0,07U_{\text{ном}}$$

где $U_{\text{ном}}$ номинальное напряжение предохранителя, кВ.

Для эффективного гашения дуги плавкая вставка берется малого диаметра.

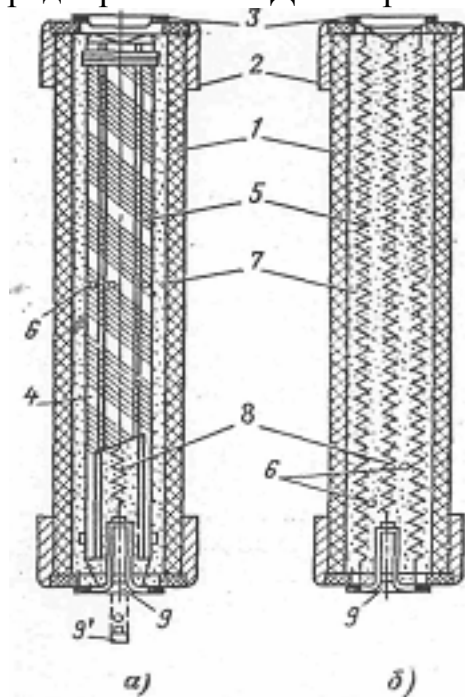
Предохранители типа ПК на напряжение 6—10 кВ (рисунок 5.12, а) содержат фарфоровый цилиндр 1, армированный по торцам латунными колпаками 2. Наполнитель 7 в виде песка засыпается через отверстие в колпаке, которое после засыпки запаивается крышкой 3. В предохранителях на ток до 7,5 А медная плавкая вставка 5 наматывается на керамический рифленый каркас 4. Это позволяет увеличить длину плавкой вставки и эффект токоограничения, а следовательно, повысить отключаемый ток. Однако при перегрузках, меньших 3 Ом, возможно образование гокопроводящего канала из материала каркаса и расплавившейся вставки. В результате наступает тепловое разрушение предохранителя. Поэтому предохранители с каркасом следует применять только для защиты от КЗ.

При номинальных токах, превышающих 7,5 А, плавкая вставка выполняется в виде параллельных спиралей (рисунок 5.12,б). Применение параллельных вставок позволяет увеличить номинальный ток до 100 А при $U_{\text{ном}}=3$ кВ. При напряжении 10 кВ номинальный ток предохранителя равен 50 А. При токе 200 А приходится устанавливать четыре параллельных предохранителя. Применение параллельных вставок позволяет изготавливать их из медной или серебряной проволоки малого диаметра и сохранять эффект узкой щели в процессе дугогашения. Для снижения температуры предохранителя при небольших длительных перегрузках плавкие вставки имеют оловянные шарики 6.

Предохранитель имеет указатель срабатывания 9. На указатель 9 действует пружина, которая удерживается во втянутом состоянии специальной плавкой вставкой 8. Эта вставка перегорает после перегорания основных вставок 5. При этом указатель освобождается и выбрасывается в положение 9' с силой, определяемой пружиной. Этот указатель можно использовать для автоматического отключения выключателя нагрузки после отключения КЗ предохранителем. Указатель 9 может быть использован также в предохранителях с автоматическим повторным включением. В этом

случае срабатывание указателя в первом предохранителе ведет к параллельному подключению к нему другого предохранителя с исправной плавкой вставкой.

При КЗ плавкая вставка испаряется по всей длине и в цепь вводится длинная дуга, горящая в узкой щели и имеющая высокое сопротивление, особенно в начальной стадии, когда пары металла недостаточно ионизированы. Все это приводит к возникновению больших перенапряжений – до $4,5U_{ном}$ на контактах предохранителя. Для ограничения перенапряжений



применяются вставки переменного сечения. Вначале сгорает участок меньшего сечения, а затем большего. В результате длина дуги растет медленней.

Рисунок 5.12. Предохранитель типа ПК.

Предохранители с мелкозернистым наполнителем обладают токоограничением, особенно при больших токах КЗ. В длительном режиме интенсивное охлаждение гонких плавких вставок позволяет выполнять их с минимальным сечением и снизить ток плавления. С ростом номинального тока эффект токоограничения падает. Номинальный ток отключения предохранителей достигает 20 кА при напряжении до 10 кВ.

Предохранители серии ПКТН на напряжение до 35 кВ имеют внутри керамический каркас с тонкой плавкой вставкой. Так как номинальный ток вставок менее 1 А, то их сечение мало и токоограничивающий эффект особенно велик. Плавкая вставка выполняется из константановой проволоки с четырехступенчатым сечением для ограничения перенапряжений. Плавление вставки происходит последовательно по ступеням. предохра-

нитель обеспечивает защиту высоковольтных шин от повреждения трансформатора напряжения при любой мощности источника питания (ток ограничивается предохранителем).

Предохранители серий ПК и ПКТН работают бесшумно, без выброса пламени и раскаленных газов.

Для нормальной работы предохранителей особо важное значение имеет герметизация. При проникновении влаги в предохранитель он теряет свойство дугогашения. Поэтому места пайки и цементирующая замазка, крепящая колпачки, окрашиваются специальной влагозащитной эмалью. Перезарядка предохранителя в эксплуатации не допускается.

Как правило, установки напряжением 35 кВ и выше работают на открытом воздухе и подвержены воздействию атмосферы. В этих условиях трудно обеспечить надежную работу предохранителя ПК из-за увлажнения наполнителя. Перспективы дальнейшего развития предохранителей на напряжение выше 35 кВ осложняются технологическими трудностями изготовления и ростом их габаритов.

Стреляющие предохранители.

Для работы на открытом воздухе при напряжении 10 и 35 кВ и отключаемом токе до 15 кА применяются так называемые стреляющие предохранители типов ПСН-10 и ПСН-35. На рис. 16.13 показан патрон предохранителя ПСН-35. В корпусе 1 установлены две винипластовые трубки 2 и 3, соединенные стальным патрубком 4. Плавкая вставка 5 присоединяется к токоведущему стержню 6 и гибкому проводнику 7, соединенному с наконечником 8. Патрон, установленный на изоляторах, показан на рис. 16.14. Изоляторы 1 крепятся к стальному цоколю 2. Цепь присоединяется к выводам 3 и 4. Вращающийся контакт 5 действует на наконечник 8 (рисунок 5.13) и с помощью своей пружины стремится вытащить гибкий проводник 7 из трубки 3. При перегорании плавкой вставки образуется дуга, которая, соприкасаясь со стенками трубки, разлагает их, и образующийся газ поднимает давление в трубке. При вытягивании наконечника из трубки длина дуги увеличивается, давление возрастает. При больших токах мембрана 9 в патрубке 4 разрывается и дуга гасится поперечным дутьем. Если ток невелик, то дуга гасится продольным потоком газа, который вырывается из трубки после выброса гибкого контакта 7 из трубки. Длительность горения падает при увеличении тока. При больших токах дуга гаснет за 0,04 с. При малых токах (800—1000 А) время горения возрастает до 0,3 с.

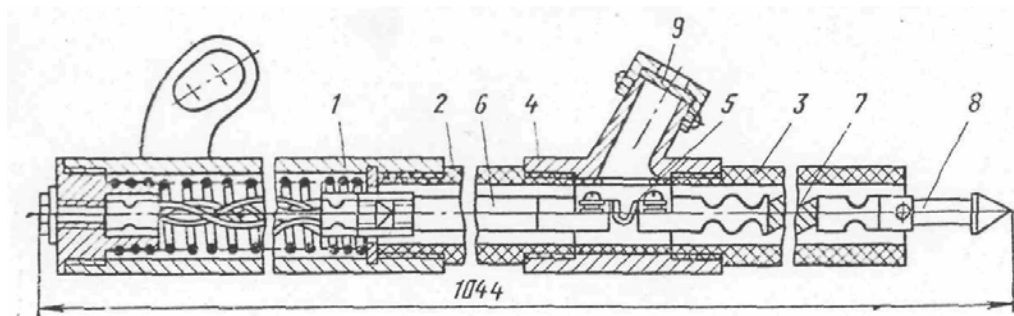


Рис. 5.13. Патрон стреляющего предохранителя типа ПСН-35

Процесс отключения сопровождается сильным выбросом пламени, газов и стреляющим звуковым эффектом. Поэтому стреляющие предохранители соседних фаз должны быть на значительном удалении друг от друга.

В процессе гашения дуга сначала имеет небольшую длину, а затем длина ее увеличивается по мере выброса гибкого проводника. Это ограничивает скорость роста сопротивления дугового промежутка и устраняет перенапряжения.

Выбор предохранителей.

При определении номинального тока вставки необходимо исходить из условия максимальной длительной перегрузки.

Очень часто обмотка высшего напряжения трансформатора присоединяется через предохранитель. При подаче напряжения на трансформатор возникают пики намагничивающего тока, среднее значение амплитуды которых достигает $10 I_{\text{ном}}$, а длительность прохождения примерно равна 0,1 с. Выбранный по номинальному току предохранитель должен быть проверен на прохождение в течение 0,1 с начального намагничивающего тока.

В заключение необходимо проверить селективность работы предохранителя с выключателями, установленными на стороне высокого и низкого напряжения.

При КЗ в самом трансформаторе время отключения предохранителя должно быть меньше, чем выдержка времени выключателя, установленного на стороне высокого напряжения и ближайшего к предохранителю. При КЗ на стороне низкого напряжения предохранитель должен иметь время плавления больше, чем уставка защиты выключателей на стороне низкого напряжения. При выборе предохранителя необходимо соблюсти также соотношение

$$U_{\text{ном, пред}} = U_{\text{ном, уст}}; I_{\text{отк, пред}} \geq I_{\text{к, уст}}$$

ГЛАВА 6. ЗАЩИТНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ И ЗАНУЛЕНИЕ.

Защитное заземление. 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.). 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 провала. Рабочее заземление предназначено для обеспечения надлежащей работы электроустановки в нормальных или аварийных условиях и осуществляется непосредственно 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, а также путем выравнивания потенциалов основания, на котором стоит человек, и 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 (рисунок 6.1).

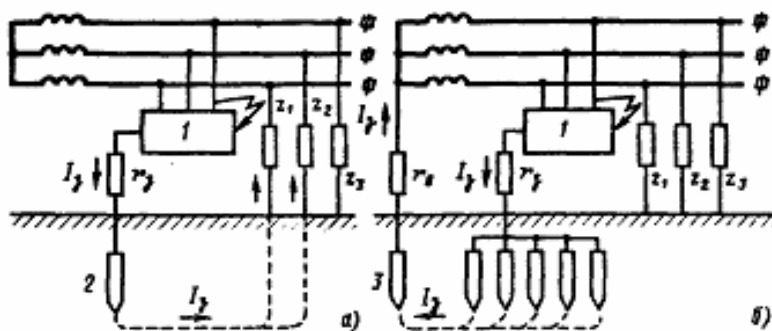


Рисунок 6.1. Принципиальные схемы защитного заземления в сетях трехфазного тока: а – в сети с изолированной нейтралью до 1000 В и выше; б – сети с заземленной нейтралью выше 1000 В ; 1 – заземленное оборудование ; 2 – заземлитель защитного заземления ; 3 – заземлитель рабочего заземления; r_0 , r_z – сопротивление рабочего 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.

Типы заземляющих устройств

Заземляющим устройством называется совокупность 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 (сосредоточенное) заземляющее устройство (рисунок 6.2) характеризуется тем, что заземлитель его вынесен за пределы площадки, на которой размещено заземляемое оборудование, или сосредоточен на некоторой части этой площадки.

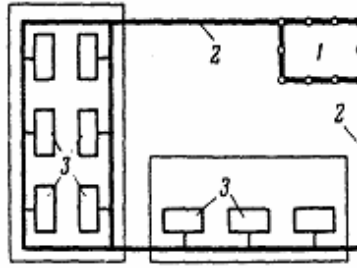


Рисунок 6.2. Выносное заземляющее устройство: 1 – заземлитель, 2 – заземляющие проводники (магистраль), 3 – заземляемое оборудование.

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 $U_{пр, доп}$, В (с учетом коэффициента напряжения прикосновения, учитывающего падение напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек α_2):

$$\varphi_3 = I_3 r_3 \leq U_{пр, доп} / \alpha_2.$$

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 оборудование, 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 прикосновения и шага не превышали допустимых.

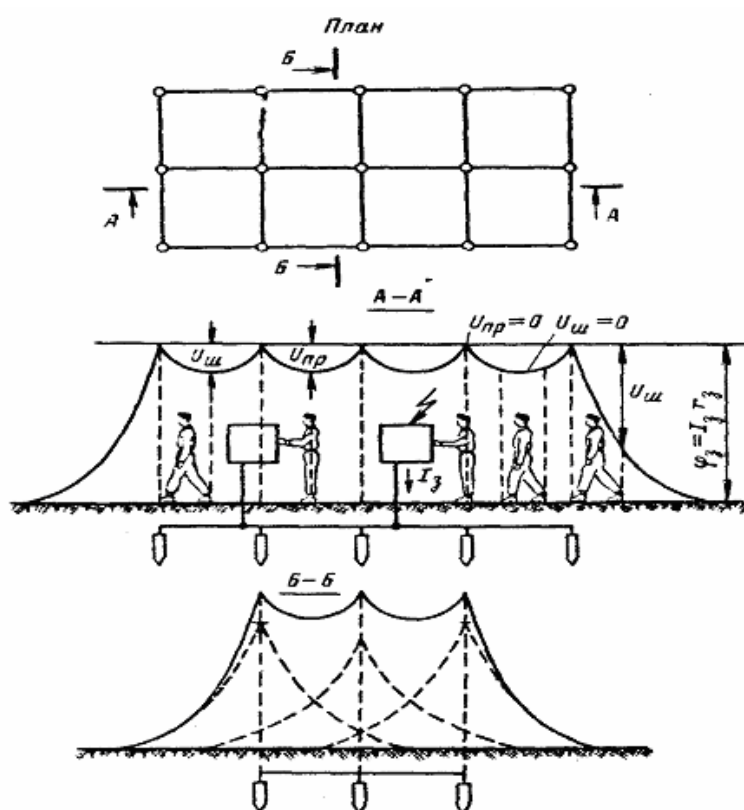
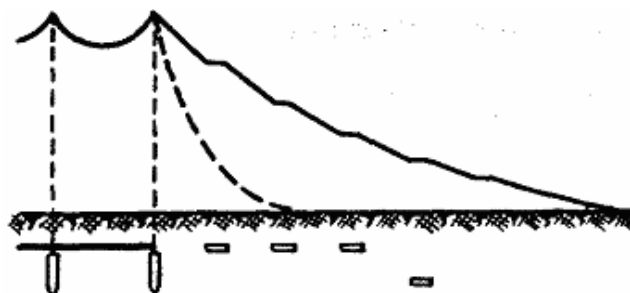


Рисунок 6.3. Контурное заземляющее устройство: $U_{пр}$, $U_{ш}$ – напряжения прикосновения и шага; φ_z – потенциал заземлителя; I_z – ток, стекающий в



землю через заземлитель; r_z — сопротивление заземлителя растеканию тока

Рисунок 6.4. Пример размещения дополнительных стальных полос в земле у края контура заземлителя за его пределами для снижения напряжения шага.

Это достигается путем соответствующего размещения одиночных заземлителей на защищаемой территории.

В качестве примера на рисунке 6.3 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_{np} и напряжение шага $U_{ш}$ имеют небольшие значения по сравнению с потенциалом заземлителя ϕ_z . 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 (рисунок 6.4).

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.

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 и менее 3,5 мм и угловую сталь с толщиной полок не менее 4 мм (обычно это угловая сталь размером от 40 х 40 до 60 х 60 мм) отрезками длиной 2,5 — 3,0 м. Широкое применение находит 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 полосу стали сечением не менее 4x12 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.

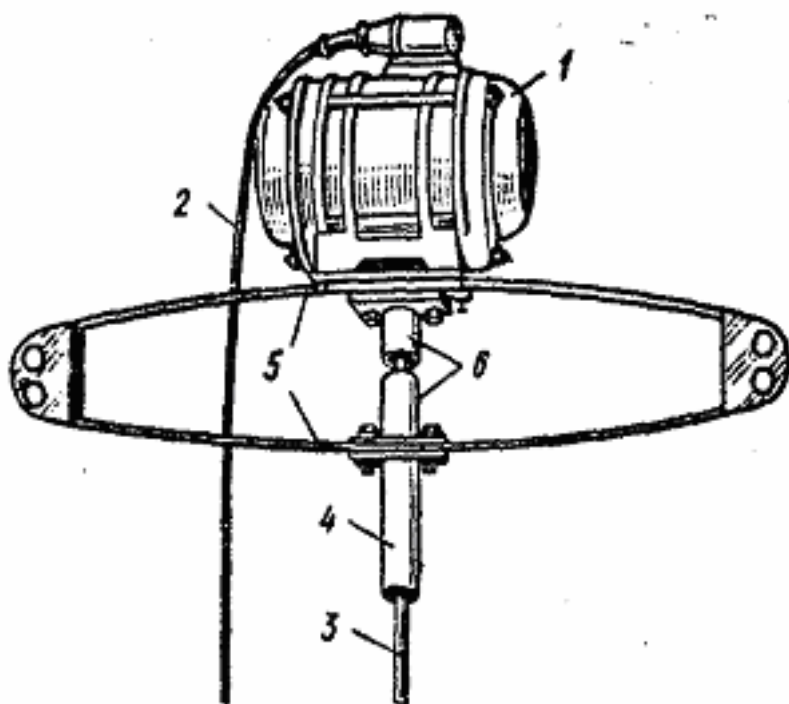
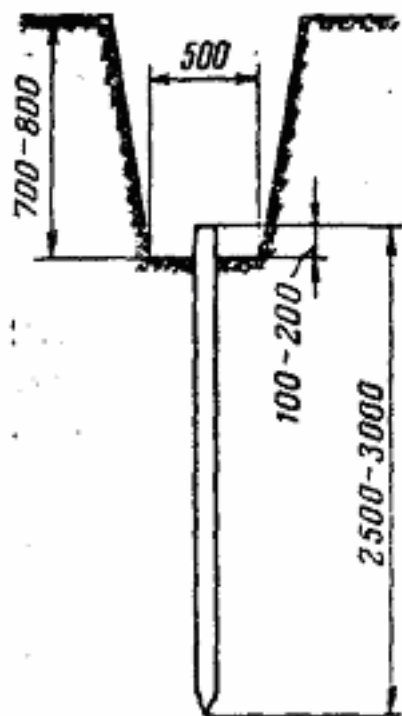
В случае опасности усиленной коррозии заземлителей необходимо применять электроды увеличенного сечения либо оцинкованные или омедненные. В некоторых (довольно редких) случаях целесообразно выполнить электрическую защиту заземлителей от коррозии.

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. (рисунок 6.5). Стальные стержни диаметром 10—12 мм, длиной 4 — 4,5 м ввертывают в землю с помощью специальных приспособлений, а более длинные заглубляют вибраторами (рисунок 6.6).

Верхние концы погруженных в землю вертикальных электродов соединяют стальной полосой на сварке. При этом полосу устанавливают на ребро, так как в таком положении 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.



*Рисунок 6.5. Установка
стержневого электрода
Б.С.Гаврилова:
в траншее*

*Рисунок 6.6. Вибрационный
электродозаглубитель
системы*

*1-электровибратор; 2-электропровод;
3-заглубляемый электрод; 4-держатель элек-
трода; 5-рессоры стальные, вибрирующие
при работе вибратора; 6-верхний и нижний
молотки, соударяющиеся при вибрации рес-
сор 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 подстанции 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.

Зануление. 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 рисунке 6.7.

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.

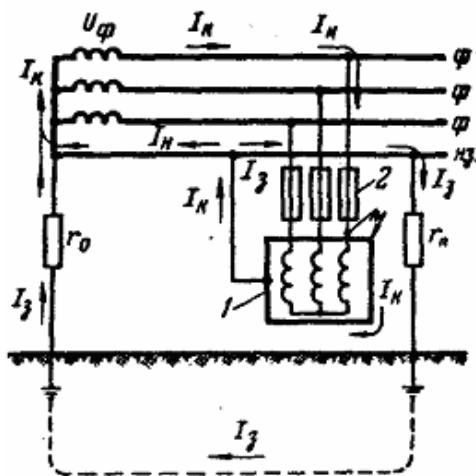


Рисунок 6.7. Принципиальная схема зануления в трехфазной сети до 1000 В: 1 – корпус электроустановки, 2 – аппараты защиты от токов КЗ

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 обес-

печить 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.

Таким образом, зануление осуществляет два защитных действия — быстрое автоматическое отключение поврежденной установки от питающей сети и снижение напряжения зануленных металлических нетоковедущих 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 нетоковедущих частях, в том числе при замыкании на корпус, электростатическом и электромагнитном влияниях соседних цепей, выносе 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.

Назначение отдельных элементов схемы зануления

Из рисунка 6.7 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.

Назначение нулевого защитного проводника

Пусть мы имеем схему без нулевого защитного проводника, роль которого выполняет земля (рисунок 6.8). 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.

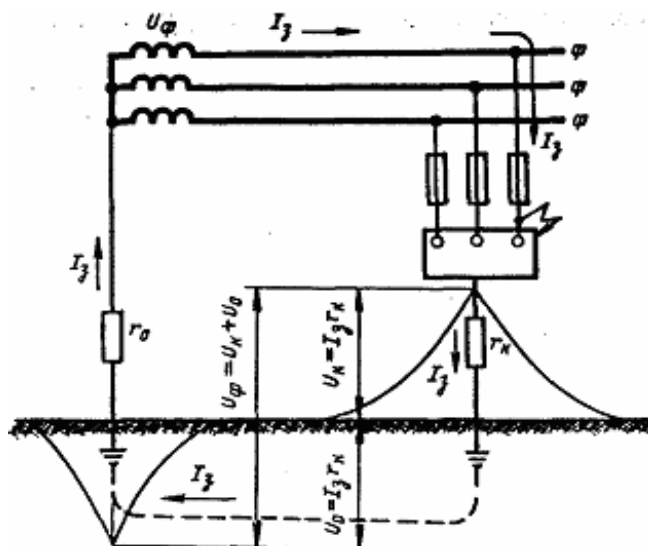


Рисунок 6.8. К вопросу о необходимости нулевого защитного проводника в трехфазной сети до 1000 В с заземленной нейтралью.

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 $r_0 = r_k = 4 Ом$

$$I_3 = 220 / (4 + 4) = 27,5 А.$$

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

$$U_k = 220 * 4 / (4 + 4) = 110 В$$

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 быстрое 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 1000В с заземленной нейтралью без нулевого защитного проводника невозможно обеспечить безопасность при замыкании фазы на корпус, поэтому такая сеть применяться не должна.

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 (рисунок 6.9, 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 положение. В этом случае U_ϕ , В, разделится пропорционально сопротивлениям замыкания фазы на землю $r_{зм}$, Ом, и заземления нейтрали r_0 , Ом (рисунок 6.9,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.

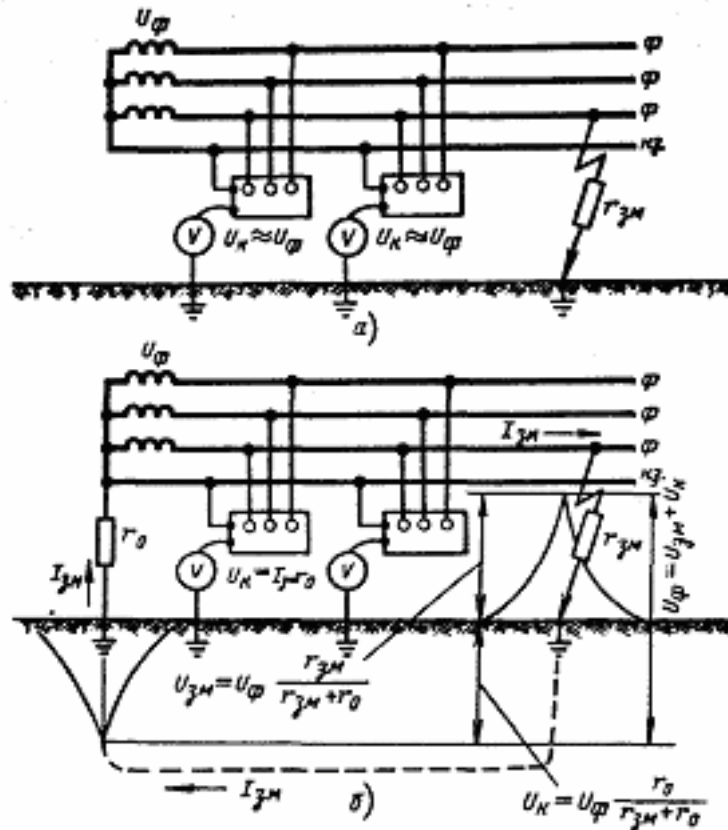


Рисунок 6.9. Случай замыкания фазы на землю в трехфазной четырехпроводной сети с изолированной (а) и заземленной (б) нейтралью обмоток источника тока.

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 $U_\phi = 220\text{ В}$, $r_0 = 4\text{ Ом}$ и $r_{3M} = 100\text{ Ом}$,

$$U_K = 220 \cdot 4 / (4 + 100) = 8,5\text{ В}.$$

Таким образом, назначение заземления нейтрали обмоток источника тока, питающего сеть до 1000В,— 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 1000В 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 ответить, 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.

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 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.

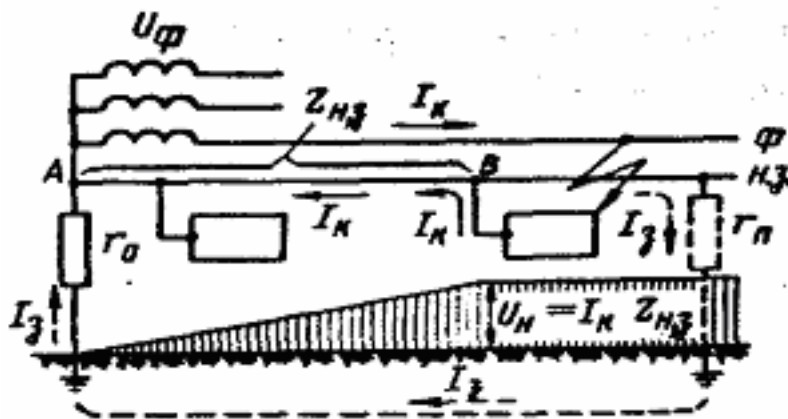


Рисунок 6.10. Замыкание на корпус в сети, не имеющей повторных заземлений нулевого защитного проводника.

При замыкании фазы на корпус в сети, не имеющей повторного заземления нулевого защитного проводника (рисунок 6.10), участок нулевого защитного проводника, находящийся за местом замыкания, и все присоединенные к нему корпуса окажутся под напряжением относительно земли U_H , В, равным:

$$U_H = I_K Z_{H,3}, \quad (6.1)$$

где I_K — ток КЗ, проходящий по петле фаза — нуль, А; $Z_{H,3}$ — полное сопротивление участка нулевого защитного проводника, обтекаемого током I_K , Ом (т. е. участка АВ):

$$Z_{H,3} = \sqrt{R_{H,3}^2 + X_{H,3}^2}$$

$R_{H,3}$ и $X_{H,3}$ — активное и внутреннее индуктивное сопротивления нулевого защитного проводника (участка АВ), Ом.

На другом участке нулевого защитного проводника (ближе к источнику энергии) напряжение будет изменяться от U_H до 0 по прямой линии (рисунок 6.10).

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 проводники обладают лишь активными сопротивлениями R_ϕ , $R_{H,3}$, Ом, то (6.1) примет вид

$$U_H = I_K R_{H,3} = \frac{U_\phi}{R_\phi + R_{H,3}} R_{H,3}. \quad (6.2)$$

Если принять $R_{H,3} \leq 2R_\phi$ (что обычно имеет место в практических условиях), то $U_H \leq (2/3)U_\phi$. Например, в сети 380/220В при $R_{H,3} = 2R_\phi$ напряжение относительно земли участка нулевого защитного проводника, находящегося за местом замыкания, и всех присоединенных к нему (т. е. зануленных) металлических частей составит $U_H = (2/3) * 220 = 147 В$. Очевидно, что при этом создается реальная угроза поражения людей электрическим током.

Чтобы уменьшить это напряжение, надо снизить $R_{H,3}$, т. е. увеличить сечение нулевого защитного проводника. Например, чтобы снизить U_H до 40В при $U_\phi = 220$ и 380В, 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 рисунке 6.10. это заземление показано пунктиром), то U_H снизится до значения, В,

$$U_H = I_3 r_n = \frac{U_{AB}}{r_n + r_0} r_n,$$

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 $R_{H,3}$, причем $R_{H,3} = 2R_\phi$, и допустить, что по нулевому защитному проводнику на участке AB проходит такой же ток I_K , как и по фазному проводнику) падение напряжения в фазном проводнике составит $U_\phi/3$, а в нулевом защитном $2U_\phi/3$.

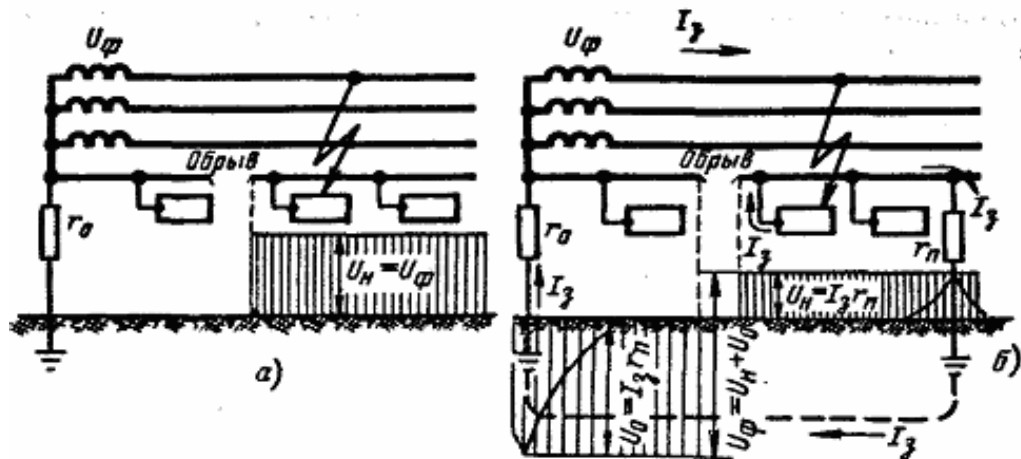


Рисунок 6.11. Замыкание на корпус при обрыве нулевого защитного проводника: а — в сети без повторного заземления нулевого защитного проводника; б — в сети с повторным заземлением нулевого защитного проводника

Тогда последнее выражение имеет 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 $U_\phi = 220В$ $U_H = 74В$. 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 зонуленых 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. 6.11, 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. 6.11, б) благодаря чему напряжение зануленных корпусов, В, находящихся за местом обрыва, снизится до

$$U_H = I_3 r_n = U_\phi r_n / (r_0 + r_n).$$

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,

$$U_H = U_0 = 0,5 U_\phi.$$

Во всех случаях $U_H + U_0 = U_\phi$ 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 по-

вторного 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 200м, а также на вводах воздушных линий в электроустановки, которые подлежат занулению.

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).

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 (отсечку), т. е. срабатывающим без выдержки времени, то k принимается в пределах 1,25—1,4.

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 $Z_{H,3}$, внешнего индуктивного сопротивления петли (контура) фазный проводник — нулевой защитный проводник (петли фаза - нуль) X_Π , а также от активных сопротивлений заземлений нейтрали обмоток источника тока (трансформатора) r_0 и повторного заземления нулевого защитного проводника r_n (рисунок 6.12, 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 (рисунок 6.12, б), а выражение для тока КЗ I_K , А, в комплексной форме будет

$$\dot{i}_* = \frac{U_\phi}{\underline{Z}_T/3 + \underline{Z}_\phi + \underline{Z}_{H,3} + jX_\Pi} \quad (6.4)$$

или

$$i_k = \frac{U_\phi}{\underline{Z}_T/3 + \underline{Z}_\Pi}, \quad (6.5)$$

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; $\underline{Z}_{H,3} = R_{H,3} + jX_{H,3}$ — комплекс полного сопротивления нулевого защитного проводника, Ом; R_ϕ и $R_{H,3}$ — активные сопротивления фазного и нулевого защитного проводников, Ом; X_ϕ и $X_{H,3}$ — внутренние индуктивные сопротивления фазного и нулевого защитного проводников, Ом; $\underline{Z}_\Pi = \underline{Z}_\phi + \underline{Z}_{H,3} + jX_\Pi$ — комплекс полного сопротивления петли фаза — нуль, Ом.

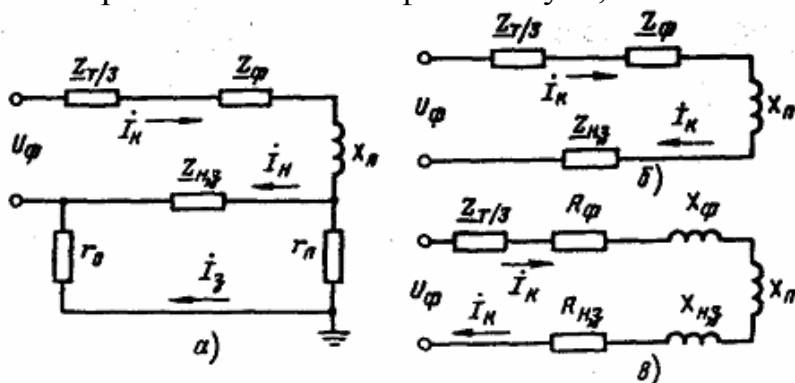


Рисунок 6.12. Расчетная схема зануления в сети переменного тока и отключающая способность: а — полная, б, в — упрощенные.

При расчете зануления допустимо применять приближенную формулу для вычисления действительного значения (модуля) тока короткого замыкания I_k А, в которой модули сопротивлений трансформатора и петли фаза — нуль z_T и z_n , складываются арифметически. Некоторая неточность (около 5%) этой формулы ужесточает требования безопасности и поэтому считается допустимой.

$$I_k = \frac{U_\phi}{z_T/3 + z_n}. \quad (6.6)$$

Полное сопротивление петли фаза — нуль в действительной форме (модуль) равно, Ом.

$$z_n = \sqrt{(R_\phi + R_{H,3})^2 + (X_\phi + X_{H,3} + X_n)^2}. \quad (6.7)$$

Расчетная формула вытекает из (6.3), (6.6) и (6.7) и имеет следующий вид:

$$kI_{ном} \leq \frac{U_\phi}{z_T/3 + \sqrt{(R_\phi + R_{H,3})^2 + (X_\phi + X_{H,3} + X_n)^2}}. \quad (6.8)$$

Здесь неизвестными являются лишь сопротивления нулевого защитного проводника $R_{H,3}$ и $X_{H,3}$, которые могут быть определены соответствующими вычислениями по этой же формуле. Однако эти вычисления обычно не производятся, поскольку 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. $1/Z_{H,3} \geq 1/2Z_\phi$ или $Z_{H,3} \leq 2Z_\phi$. 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 поверочным 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, таблица 6.1).

Значения R_ϕ и $R_{H.3}$, 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 $R_{H.3}$ определяется с помощью таблиц.

Таблица 6.1.

Приближенные значения расчетных полных сопротивлений обмоток масляных трехфазных трансформаторов.

Мощность трансформатора, кВт · А	Номинальное напряжение обмоток высшего напряжения, кВ	z _T , Ом, при схеме соединения обмоток		Мощность трансформатора, кВт · А	Номинальное напряжение обмоток высшего напряжения, кВ	z _T , Ом, при схеме соединения обмоток	
		у/у _Н	Д/у _Н и у/з _Н			у/у _Н	Д/у _Н и у/з _Н
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.

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: 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 $I_{к \geq kI_{ном}} = 125 \times 3 = 375$ А, ожидаемая плотность тока в стальной полосе

$$J = I_k / s = 375 / (40 \times 4) = 2 \text{ А/мм}^2.$$

По таблице 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 и внутренние индуктивные 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	2,5	3,0	3,5	4,0

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 таблицы 6.2. В этом случае также необходимо знать профиль и сечение проводника, его длину и ожидаемое значение тока I_k .

Пример: 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 таблице 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 $X_{п}$, Ом, может быть определено по известной из теоретических основ электротехники формуле для индуктивного сопротивления двухпроводной линии с проводами круглого сечения одинакового диаметра d , м,

$$X_{п} = \omega L = \omega \frac{\mu_r \mu_0}{\pi} l \ln \frac{2D}{d}, \quad (6.10)$$

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,

$$x_{п} = 314 \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{\pi} 10^3 \ln \frac{2D}{d} = 0,1256 \ln \frac{2D}{d}. \quad (6.11)$$

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, $x_{п}$ 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: определить внешнее индуктивное сопротивление x_n петли фазы — 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:

$$1) \text{ при } D = 1 \text{ см } x_n = 0,1256 \times \ln \frac{2}{1,4} = 0,038 \text{ Ом/км};$$

$$2) \text{ при } D = 60 \text{ см } x_n = 0,1256 \times \ln \frac{120}{1,4} = 0,56 \text{ Ом/км};$$

$$3) \text{ при } D = 300 \text{ см } x_n = 0,1256 \times \ln \frac{600}{1,4} = 0,74 \text{ Ом/км};$$

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: 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 $3 \times 25 \text{ мм}^2$ 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 $k = 3$.

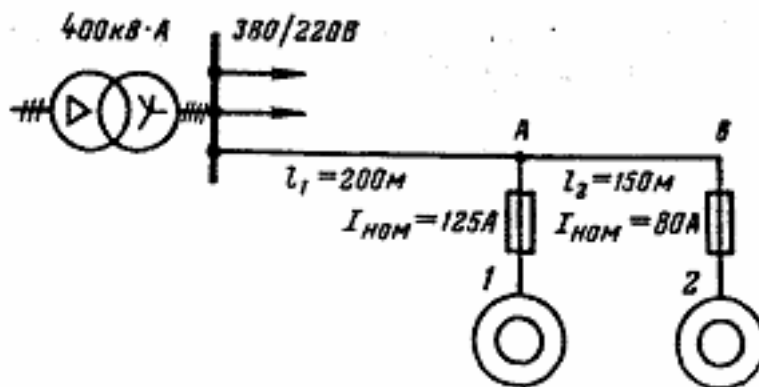


Рисунок 6.13. Схема к примеру.

Решение сводится к проверке соблюдения условия срабатывания защиты по (6.3). Для этого необходимо 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 таблицы 6.1 находим полное сопротивление трансформатора $z_T = 0,056$ Ом.

3. Определяем сопротивления фазного и нулевого защитного проводников $R_\phi, X_\phi, R_{н.з.}, X_{н.з.}, X_\Pi$ на участке линии $l_1 = 200$ м (см. рисунок 6.13).

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 $x_\Pi = 0,6$ Ом/км, значит, $X_\Pi = 0,6 \cdot 0,2 = 0,12$ 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 таблицы 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 $x_\Pi = 0,6$ Ом/км, тогда $X_\Pi = 0,6 \cdot 0,25 = 0,15$ 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 (рисунок 6.13)

$$I_K = \frac{220}{0,056/3 + \sqrt{(0,144 + 0,308)^2 + (0,184 + 0,12)^2}} = 390 \text{ А};$$

б) при замыкании фазы на корпус двигателя 2

$$I_K = \frac{220}{0,056/3 + \sqrt{(0,18 + 0,452)^2 + (0,272 + 0,15)^2}} = 282 \text{ А};$$

5. Вывод: поскольку действительные (вычисленные) значения токов однофазного КЗ (390 и 28,2 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.

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 $r_{з.м.}$ Ом (см. рисунок 6.9,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. рисунок 6.9,б). Тогда:

$$U_{пр.доп.} \geq I_3 r_0 = U_\phi \frac{r_0}{r_0 + r_{зм}},$$

$$r_0 \leq r_{зм} \frac{U_{пр.доп.}}{U_\phi - U_{пр.доп.}}. \quad (6.12)$$

По условиям безопасности прикосновения к зануленным корпусам в период существования замыкания фазы на землю $r_{з.м.}$ и $U_{пр.доп.}$ должны быть возможно меньшего значения. Поэтому принимаем $r_{з.м.} = 20$ 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 $U_{пр.доп.} = 36$ 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 электропередачи 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 (рисунок 6.14) нулевой защитный проводник на участке за ближайшим к месту замыкания повторным заземлением (т. е. за точкой A на рисунок 6.14), а также зануленное оборудование, присоединенное к этому участку проводника, оказываются под некоторым напряжением относительно земли U_n . Наибольшее значение этого напряжения U_n .

$$U_{n,max} = I_z r_n / n, \quad (6,13)$$

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 заземлители обладают одинаковыми сопротивлениями), Ом.

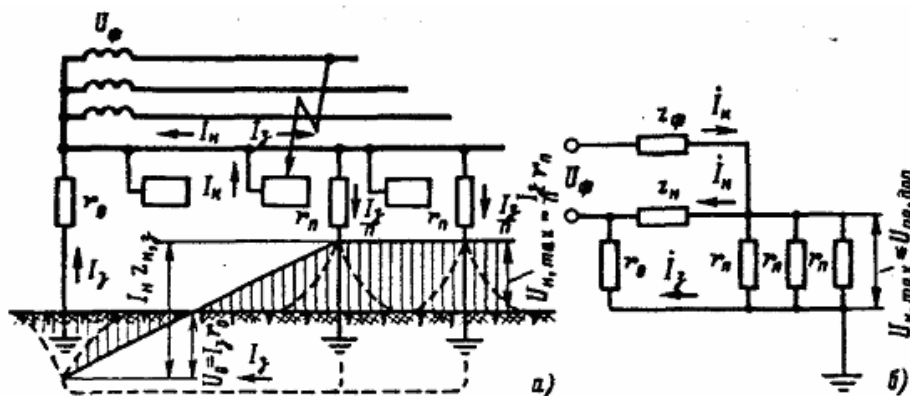


Рисунок 6.14. К расчету сопротивления повторного заземления нулевого защитного проводника: а - замыкание фазы на корпус; б - схема замыкания

Это напряжение существует до момента отключения защитой поврежденной установки, т. е. кратковременно. Однако значение $U_{н, max}$ может быть достаточно большим и представляет опасность для людей даже при кратковременном его существовании. Кроме того, при отказе или задержке защиты (из-за не исправности 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 $U_{пр, доп}$, В. 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 (рисунок 6.14.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

$$r_n \leq n r_0 \frac{U_{пр. доп}}{I_n z_{н.з} - U_{пр. доп}}, \quad (6.14)$$

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

$$r_n \leq nr_0 \frac{U_{пр, доп}}{I_k z_{н.з.} - U_{пр, доп}}. \quad (6.16)$$

В простейшем случае, когда $X_{н.з.} = \hat{X}_n = 0$, и с учетом того, что $I_k z_{н.з.} = 2U_\phi/3$, уравнение (6.16) примет вид

$$r_n \leq nr_0 \frac{U_{пр, доп}}{2U_\phi/3 - U_{пр, доп}}. \quad (6.17)$$

Пример: На линии, рассмотренной нами в предыдущем примере, повторные заземления нулевого провода выполнены в точка А и В (см. рисунок 6.13). 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 1

$$r_n \leq 2 \cdot 4 \frac{65}{390 \cdot 0,394 - 65} = 5,9 \text{ Ом};$$

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.

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 напряжении 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, в том числе корпуса электрических машин, трансформаторов, аппаратов, светильников 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 (рисунок 6.15). Нейтраль присоединяется к заземлителю специальным проводником, который называется заземляющим. Обычно это полосовая сталь, сечение которой зави-

сит от мощности генератора (трансформатора), но должно быть не меньше 24 мм^2 при прокладке в здании и 48 мм^2 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, 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). 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.

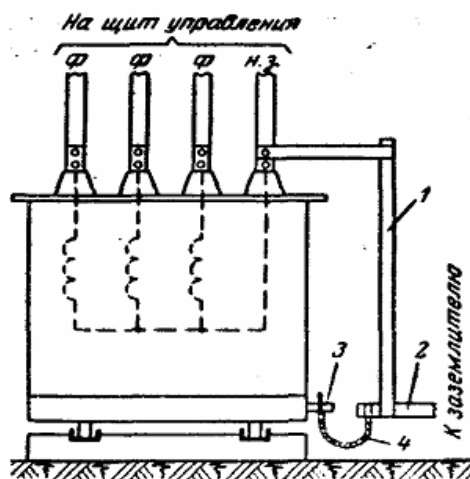


Рисунок 6.15. Заземление нейтральной точки обмотки трансформатора на стороне до 1000 В: 1 — заземляющий проводник, 2 — магистраль заземления, 3 — заземляющий болт на баке трансформатора, 4 — гибкая перемычка для заземления бака трансформатора.

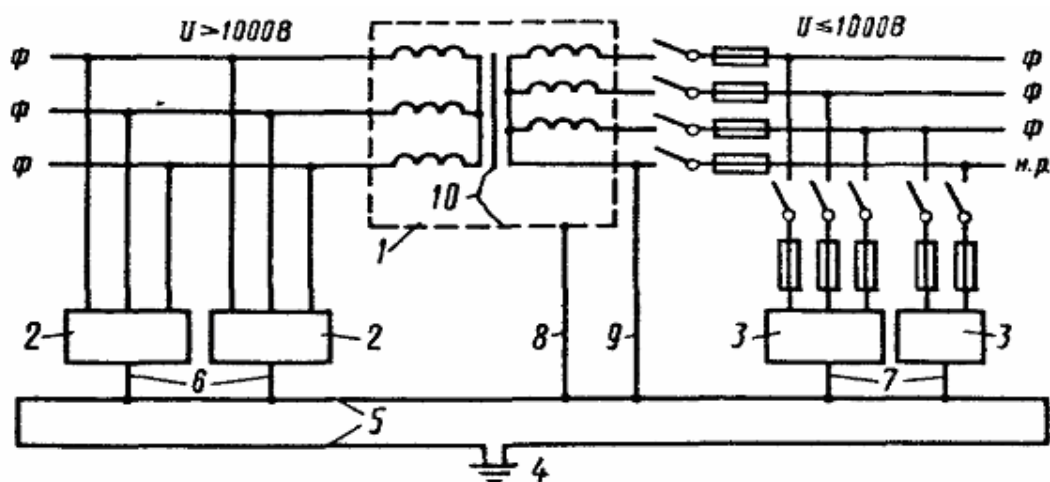


Рисунок 6.16. Схема использования заземлителя системы защитного заземления на стороне высшего напряжения трансформатора выше 1000 В в качестве заземлителя нейтральной точки обмотки низшего напряжения трансформатора до 1000 В, а также использования магистрали заземления на стороне высшего напряжения а качестве магистрали зануления на стороне низшего напряжения: 1 - трансформатор; 2 - потребители энергии напряжением выше 1000 В; 3 - потребителя 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 (рисунок 6.16).

Вывод заземленной нейтрали, т. е. нулевой точки обмотки источника тока, на щит управленя 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 проводниками), 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 мм^2 при прокладке в зданиях и 48 мм^2 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; 2) в местах, где 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.

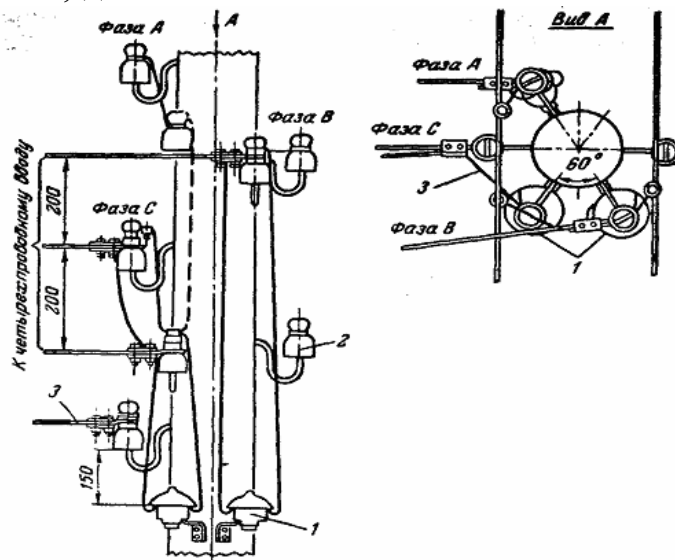
В качестве нулевого защитного проводника рекомендуется использовать алюминиевые оболочки кабелей, металлические конструкции зданий (фермы, колонны и т. п.) и производственных установок (подкрановые пути, шахты лифтов, подъемников, обрамления каналов и т. п.), стальные трубы электропроводок, металлические 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 труб, 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 выполняет 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.

Рисунок 6.17. Размещение проводов и столбовых предохранителей на опоре ВЛ до 1000 В: 1 – столбовые грибообразные предохранители, 2 – провод наружного освещения, 3 – нулевой провод.

Ниже нулевого провода должны быть размещены устанавливаемые на опоре плавкие предохранители, а также защитные, секционирующие и другие устройства (рисунок 6.17)

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 одно-проволочные 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 (рисунок 6.18, а). Присоединять корпуса переносных электроприемников к нулевому рабочему проводу линии недопустимо, потому что в случае его обрыва (перегорания предохранителя) все корпуса, присоединенные к нему, окажутся под фазным напряжением относительно земли (рис. 6.18,б).

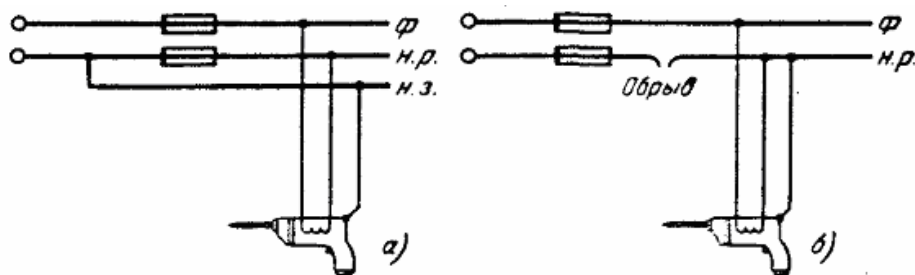
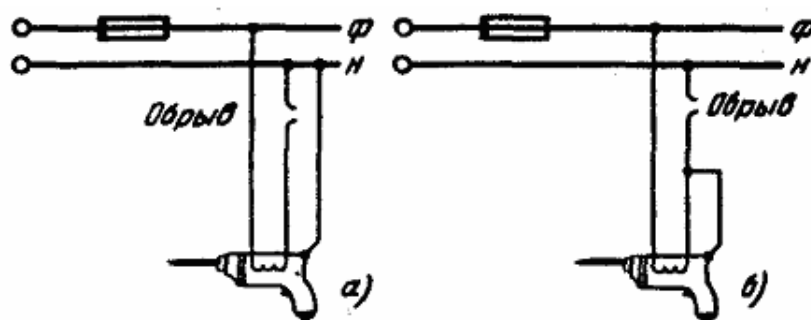


Рисунок 6.18. Зануление переносного однофазного электроприемника, включенного между фазным и нулевым рабочим проводами: а — правильно;



б – неправильно

Рисунок 6.19. Зануление переносного однофазного электроприемника, включенного между фазным проводом и нулевым рабочим, являющимся одновременно нулевым защитным проводником.

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 (рисунок 6.19, а). Нельзя использовать для этой цели нулевой рабочий провод, идущий в электроприемник, так как при случайном его обрыве корпус окажется под фазным напряжением (рисунок 6.19,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 (рисунок 6.20) 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 фазного напряжения. Например, в сети 380/220 В напряжение между каждым корпусом и землей будет равно 110 В.

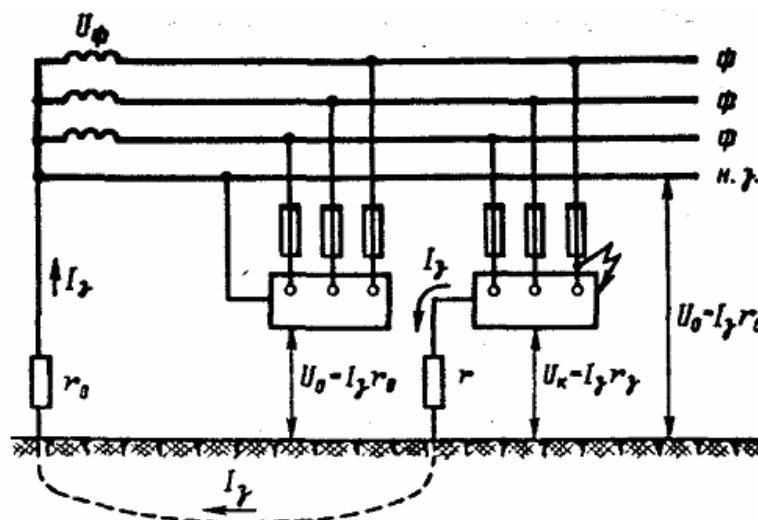


Рисунок 6.20. Схема, иллюстрирующая недопустимость заземления и зануления разных корпусов электрооборудования в одной сети.

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 запущенного корпуса, не только не опасно, а наоборот улучшает условия безопасности*, так как создает дополнительное заземление нулевого защитного проводника.

Контроль исправности зануления

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 повторных 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.

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 рисунке 6.21 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 12В, 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 $P2$, который при этом должен быть отключен. Фазный проводник и корпус электроприемника соединяют надежной перемычкой, имитирующей замыкание фазы на корпус.

После включения рубильника $P2$ 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:

$$z_{\Pi} = U_{изм} / I_{изм} \quad (6.18)$$

Следует отметить, что при измерении по схеме рис. 6.15, *а* не учитывается сопротивление фазного проводника на участке AB .

Зато в результат измерения входит сопротивление вспомогательных проводов, соединяющих вторичную обмотку понижающего трансформатора с сетью.

При большом расстоянии между точками A и B эта ошибка может быть заметной. В таких случаях целесообразно применять схему, приведенную на рисунке 6.21, *б* при которой, однако, требуется отключение всей сети от силового трансформатора.

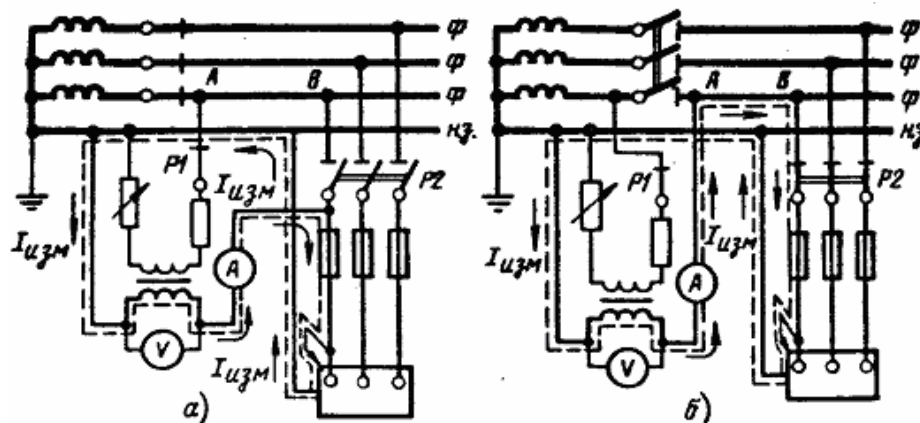


Рисунок 6.21. Схема измерения сопротивления петли фаза-нуль.

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. СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ

В электроустановках требуется применение специальных средств защиты, служащих для защиты персонала. Эти средства не являются конструктивными частями электроустановок. Они дополняют ограждения, блокировки, сигнализации, заземление, зануление и другие стационарные защитные устройства.

Средства защиты можно условно разделить на 4 группы:

- изолирующие;
- ограждающие;
- экранирующие;
- предохранительные.

Первые три группы предназначены для защиты персонала от поражения электрическим током и вредного воздействия электрического поля и называются электрозащитными средствами.

Изолирующие электрозащитные средства.



Основные электрозащитные средства обладают изоляцией, способной длительно выдерживать рабочее напряжение электроустановки и ими разрешается касаться токоведущих частей под напряжением.

В электроустановках до 1000 В это: диэлектрические перчатки, изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками, указатели напряжения.

В электроустановках выше 1000 В это: изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, указатели напряжения.

Дополнительные изолирующие электрозащитные средства не обладают изоляцией. Способной выдержать рабочее напряжение электроустановки. Их назначение – усилить защитное действие основных изолирующих средств, вместе с которыми они должны применяться (достаточно одного дополнительного электрозащитного средства).

К дополнительным изолирующим электрозащитным средствам относятся:

в электроустановках до 1000 В – диэлектрические галоши, ковры, изолирующие подставки;

в электроустановках выше 1000 В – диэлектрические перчатки, боты, ковры, 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, изолирующие накладки, временные переносные заземления и предупреждающие плакаты.

Экранирующие электрозащитные средства.

Для исключения вредного воздействия на рабочих электрических полей промышленной частоты. К ним относятся индивидуальные экранирующие комплекты (костюмы с головными уборами, обувью, переносные экраны).

Предохранительные средства защиты.

Для индивидуальной защиты работающего от вредных воздействий неэлектротехнических факторов: световых, тепловых, механических, а также от продуктов горения и падения с высоты.

К ним относятся защитные очки и щитки, защитные каски, противогазы, предохранительные монтерские пояса, страховочные канаты, монтерские когти.

Назначение, конструкция и правила применения.

Изолирующие штанги.

Изолирующая штанга – стержень, изготовленный из изоляционного материала, которым человек может касаться частей электроустановки, находящихся под напряжением, без опасности поражения током.

В зависимости от назначения штанги делятся на 4 вида:

а) оперативные, применяемые для операций с однополюсными разъединителями и наложение временных переносных защитных заземлений;

б) измерительные, предназначенные для измерений в электроустановках, находящихся в работе (проверка распределения напряжения по изоляторам гирлянды, определение сопротивления контактных соединений на проводах и ошиновке и 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 и др.;

г) универсальные, конструкция которых позволяет выполнять различные операции.

Изолирующие клещи.

Назначение изолирующих клещей – выполнение операций под напряжением с предохранителями, снятие изолирующих накладок, перегородок и тому подобные работы. Применяют клещи в установках до 35 кВ включительно.

Конструкции клещей различны, но во всех случаях они имеют три основные части: рабочую часть, или губки, изолирующую часть и рукоятки.

Электроизмерительные клещи.

Электроизмерительные клещи – прибор, предназначенный для измерения электрических величин – тока, напряжения, мощности, фазового угла и др. – без разрыва токовой цепи и нарушения ее работы.

Указатели напряжения.

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, отыскания повреждений в электроустановке и т. п.

Указатели бывают для электроустановок до 1000 В и выше. Указатели, предназначенные для электроустановок до 1000 В, делятся на двухполюсные и однополюсные.

Защита от воздействия электромагнитного поля промышленной частоты в электроустановках сверхвысокого напряжения

Влияние поля на здоровье людей. В процессе эксплуатации электроэнергетических установок — открытых распределительных устройств (ОРУ) и воздушных линий (ВЛ) электропередачи напряжением выше 330 кВ 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 330 кВ и меньше 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 системы, сердечно-сосудистой системы и периферической крови. При этом наблюдаются 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 состоящим из двух полей: электрического и магнитного. Можно также считать, что в электроустановках электрическое поле возникает при наличии напряжения на токоведущих частях, а магнитное — при прохождении тока по этим частям.

При малых частотах, в том числе при 50 Гц, электрическое и магнитное поля практически не связаны между собой, поэтому их допустимо рассматривать отдельно друг от друга и также раздельно рассматривать влияние, оказываемое ими 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 20—25 А/м, в то время как вредное действие магнитного поля на биологический объект проявляется при напряженности 150—200 А/м.

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), несущими заряды разных знаков и на которых начинаются и оканчиваются силовые линии.

Поле электроустановок является неравномерным, 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 является, 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 организма обусловлено воздействием поля на различные отделы нервной системы. При этом повышение возбудимости центральной нервной системы происходит за счет рефлекторного действия поля, а тормозной эффект—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 и в значительно меньшей мере — само электрическое поле.

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 прикосновение 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 через человека может достигать значений, опасных для жизни.

Напряженность электрического поля

В различных 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.

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.

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 через человека, измеренных в разных местах ОРУ 500 кВ.

Максимальное значение этого тока в ОРУ 500 кВ составляет 25,0, а среднее 130 мкА; в ОРУ 750 кВ максимальный ток достигает 350 мкА, а среднее значение 180 мкА.

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 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 значение протекающего через него тока достигает на линии 500 кВ 100—150 мкА.

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, 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, более удобной величиной является напряженность поля в месте нахождения человека, поскольку в производственных условиях напряженность поля значительно проще измерить, чем ток, проходящий через человека. Длительное воздействие электрического поля на организм человека, 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 в электрическом поле электроустановок сверхвысокого напряжения промышленной частоты установлены действующими правилами в зависимости от напряженности поля в зоне нахождения человека, т. е. на рабочем месте.

Эти нормы обязательны для персонала обслуживающего электроустановки 50 Гц напряжением 400 кВ и выше.

Если напряженность поля на рабочем месте превышает 25 кВ/м или если требуется большая продолжительность пребывания человека в поле, чем указано в таблице 7.2, работы должны производиться с применением защитных средств—экранирующих устройств или экранирующих костюмов.

Определение напряженности электрического поля в электроустановках на рабочих местах производится измерением с помощью специального прибора—измерителя напряженности.

Измерение напряженности на рабочих местах производится 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.

Зона влияния. Пространство, в котором напряженность электрического поля равна 5 кВ/м и больше, принято называть опасной зоной или зоной влияния. Приблизительно можно считать, что эта зона лежит в пределах круга с центром в точке расположения ближайшей токоведущей части, находящейся под напряжением, и радиусом $K=20$ м для электроустановок 400—500 кВ и $K=30$ м для электроустановок 750 кВ.

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.

Защитный принцип

Защитные свойства костюма основаны на принципе электростатического экранирования. Как известно, в проводящем теле, внесенном в электростатическое поле, происходит перегруппировка, т. е. кратковременное движение электронов, в результате чего на поверхности тела, а также в очень тонком молекулярном слое этой поверхности возникают заряды, причем на стороне тела, обращенной к внешнему заряду, создавшему поле, возникший 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, независимо от того, сплошное оно или полое, отсутствует. Таким образом, чтобы оградить какое-либо тело от воздействия на него электрического поля, достаточно поместить его в тонкую металлическую оболочку (экран).

Опытом установлено, что экран может быть не только сплошным, но и сетчатым; если плетенье 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.

Конструкция костюма

Экранирующий костюм 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 поверхность которой путем шоопирования нанесен тонкий слой металла.

Все предметы экранирующего костюма — брюки и обувь, а точнее их металлические элементы — должны иметь между собою надежную

электрическую связь, осуществляемую специальными проводниками связи.

Костюм надевается на белье, с тем чтобы человек был изолирован 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 самым 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.

Область и условия применения

Экранирующие костюмы как средства защиты от воздействия электрических полей должны применяться при работах, проводимых в ОРУ и на ВЛ электропередачи сверхвысокого напряжения в пределах зоны влияния и вне области стационарных и временных экранирующих устройств, если напряженность поля на рабочем месте превышает 25 кВ/м или если продолжительность работы больше установленных норм.

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 и т. п. Кроме того, экранирующие костюмы необходимо применять и при кратковременных работах (т. е. в пределах норм) в зоне влияния, требующих подъема на оборудование или на конструкции. Эта необходимость обусловлена тем, что при подъеме на оборудование или конструкцию без экранирующего костюма разрядный ток, стекающий с человека 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, не требующие подъема на вводы; эти работы могут выполняться без экранирующих костюмов и экранов, поскольку вблизи указанных аппаратов поле имеет незначительную напряженность.

Костюм, т. е. его токопроводящие элементы, при работе должны быть соединены с землей, т. е. 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 могут производиться без специально-

го заземления костюма. В этом случае достаточной оказывается связь костюма с землей за счет контактов токопроводящих подошв обуви с грунтом.

Работы, связанные с прикосновением человека к заземленным предметам, например ремонт оборудования и т. п., могут производиться 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.

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 электрофицированным инструментом; при электрических испытаниях оборудования; при электросварочных работах и пр. Во всех 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. Так, необходимо проверять наличие надежной электрической связи между всеми элементами костюма; у комбинезонов, выполненных из ткани с изолированным микропроводом, следует проверять с помощью омметра наличие гальванической связи между верхними и нижними накладками из ткани с серебряной мишурой; у ботинок связь проверяется между металлической подошвой и выводом. Если подошва из проводящей резины, то проверка производится мегаомметром 2500 В; при этом сопротивление не должно превышать 50 кОм.

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 воз-

действия электрического поля при работах в действующих электроустановках промышленной частоты сверхвысокого напряжения.

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 отекание в землю заряда одного знака (соответствующего знаку заряда проводника, создавшему поле). Оставшийся на предмете заряд распределится по всей его поверхности, но крайне неравномерно.

В результате вблизи внесенного предмета произойдет резкое искажение электрического поля. При этом на стороне предмета, обращенной к индуцирующему проводнику, произойдет значительное возрастание напряженности поля, а на противоположной стороне, как и в пространстве, которое как бы огораживается или экранируется внесенным предметом, напряженность поля резко ослабится.

При соответствующих размерах, форме и размещении экранирующего устройства защищенное пространство может иметь незначительную напряженность электрического поля и достаточно большие размеры с тем, чтобы в нем безопасно и удобно могли выполняться 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. 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.

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 значения менее 5 кВ/м.

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 выполнении текущих и капитальных ремонтов выключателей и некоторых других работ. Они изготавливаются из металла в виде плоских щитов — козырьков, навесов и перегородок.

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. Они изготавливаются 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 могут изготавливаться также из специальной металлизированной ткани или обычной ткани, например брезента, покрытой алюминиевой краской.

Условия применения

Установка экранов как временных, так и постоянных должна выполняться с соблюдением следующих допустимых изоляционных расстояний до токоведущих частей.

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 является исключительно важным для создания защитной зоны, поэтому оно должно выполняться особенно надежно. Каждый экран заземляется присоединением его не менее чем в двух точках к контуру заземления электроустановки или к заземленным металлическим конструкциям. При этом стационарные экраны присоединяются к заземляющему устройству стальными проводниками с

помощью сварки или болтов, а временные— с помощью специальных проводников, для чего на них предусматриваются заземляющие зажимы.

Сопротивление заземления не должно превышать 100 Ом.

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 должны выполняться и другие меры защиты и соблюдаться 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.

Кроме того, 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 при помощи 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.

Баки и расширители трансформаторов и шунтирующих реакторов являются естественными экранами, вблизи которых постоянно существует зона с незначительной напряженностью электрического поля. Поэтому эксплуатационное обслуживание этих аппаратов, не требующее подъема на вводы (отбор пробы масла из баков и вводов; обслуживание системы охлаждения, цепей контрольно-измерительной аппаратуры и приборов; производство мелкого ремонта и т. п.), может производиться без экранирующих средств независимо от продолжительности работы.

В помещениях ОРУ—на пульте управления, в трансформаторной башне, компрессорной, мастерской и пр., имеющих заземленную металлическую кровлю или выполненных из 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 металл заземляется.

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 опускается до надежного соприкосновения с землей. При работе таких машин и механизмов в зоне влияния без их перемещения они должны быть заземлены путем соединения кузова или рамы с заземляющим устройством электроустановки специальным проводником.

Компьютерные технологии обеспечения безопасности производства

В настоящее время в любой отраслевой системе управления охраной труда сформировалось устойчивое отношение к компьютерным средствам, используемым при организации безопасного производства, как к необходимому инструментарию специалистов по охране труда (СОТ). Сегодня уже нельзя представить эффективную работу СОТ без персональной ЭВМ.

Вместе с тем качество работы СОТ, эффективность принимаемых решений во многом определяются качеством используемых компьютерных технологий обеспечения безопасности труда в организациях. Однако в современном производстве применяются лишь разрозненные элементы этих технологий, программные продукты, не отвечающие меняющимся информационным потребностям СОТ.

Фрагментарность автоматизируемых задач по принятию обоснованных решений при создании безопасных условий труда и обучении работников, затрудняющая целостное восприятие этих процессов, их полноты и степени необходимой детализации и снижающая надежность подготовки персонала, делает неэффективным применение в системе управления охраной труда даже передовой вычислительной техники.

Под передовой информационной технологией обеспечения безопасности производства (ИТ ОБП) будем понимать совокупность эффективных компьютерных технологий, взаимодействующих с автоматизированной средой сбора или получения, передачи, переработки и предъявления СОТ данных и знаний в виде информации, необходимой для принятия своевременных и рациональных решений и формирования устойчивых навыков и знаний по безопасности производства.

В качестве основных компонентов ИТ ОБИ могут быть выделены устройства, поддерживающие и обеспечивающие информационно-технологические процессы, автоматизированные рабочие места специали-

стов по охране труда (АРМ СОТ) и автоматизированные рабочие места ответственных за подготовку и аттестацию персонала по безопасности производства (АРМ ОПБП).

Новизна и практическая целесообразность компонентов информационной технологии подтверждена патентами и результатами производственного применения.

Автоматизация рабочего места СОТ позволяет повысить эффективность принимаемых специалистами профессиональных решений. Реализуется она с помощью устройства, содержащего связанные интерфейсом конечного пользователя блоки формирования базы данных, обработки и принятия решений, а также блок средств передачи сведений, соединенный с блоком формирования базы данных, и машиноориентированные информационные носители. Технический результат достигается благодаря тому, что информационные носители имеют определенную структуру с настраиваемым содержанием в соответствии с потребностями конкретного производства, согласованную с действующей утвержденной отчетностью, а блоки обработки и принятия решений снабжены программным средством для обеспечения автоматизированного учета сведений и знаний о состоянии безопасности и условий труда на рабочих местах. При этом блок обработки выполнен с возможностью формирования запросов на обработку соответствующих документов и проведения статистического анализа информации и обеспечивает применение результатов обработки блоком принятия решений в среде целевых экспертных систем, поддерживающим возможность трансформации принятых решений в управляющие воздействия на состояние условий труда на рабочих местах конкретного производства.

Автоматизированная система учета несчастных случаев на производстве позволяет получить технический результат и обеспечивает оперативный сбор достоверной информации для выработки решений по предупреждению производственного травматизма. Система содержит множество взаимосвязанных АРМ СОТ, каждое из которых имеет долговременную память и связано средствами передачи информации с множеством средств воспроизведения данных, установленных на конкретных производствах и предназначенных для воспроизведения данных с формализованных носителей информации. Последние снабжены взаимосвязанными и размещенными в заданном порядке разделами для заполнения стандартизованными символами в соответствии с заранее заданной системой кодирования. Технический результат достигается благодаря тому, что средства воспроизведения выполнены с возможностью воспроизводить стандартизованные символы из местоположений разделов, а каждое АРМ снабжено программным средством для предварительной логической проверки достоверности полученных данных путем сопоставления данных из разных разделов и

сравнения их с данными, полученными ранее и размещенными в долговременной памяти автоматизированного рабочего места.

Учетный лист несчастного случая (запатентованный образец относится к бланкам для учетного листа несчастного случая на производстве) предназначен для использования в автоматизированной системе учета несчастных случаев. Поскольку при этом необходимо обеспечить точное распознавание данных, в предлагаемом учетном листе поля для записей сведены к минимуму, а все указания фиксируются путем выделения нужных сведений, приведенных в определенных зонах.

Учетный лист в отличие от известных аналогов (например, медицинской карты стационарного больного) позволяет фиксировать сведения об имевшем место несчастном случае на любом производстве. Далее эти сведения могут быть воспроизведены с помощью устройства (оптического считывателя или персонального компьютера с программным средством для воспроизведения), воспринимающего информацию из тех мест этого учетного листа, в которых имеются графы или номера строк различных зон. При этом информация считывается только из заполненных граф и отмеченных строк в зонах.

Данный промышленный образец можно копировать или создавать самостоятельно. В любом случае он может воспроизводиться столько раз, сколько требуется для учета несчастных случаев на производстве.

Автоматизированное приобретение знаний по безопасности производства относится к средствам накопления информации. Его использование обеспечивает повышение достоверности и полноты формализуемых знаний по безопасности производства. Накопление знаний в виде целевых баз с заранее внесенными в них общими сведениями и знаниями по безопасности производства согласно литературным источникам осуществляется на базе персональных ЭВМ с использованием модели пользователя, содержащей традиционные формы вопросов и сообщений, характерных для определенной профессиональной группы СОТ. При этом специалисту предъявляются примерные ситуации в виде интерактивного шаблона с сохранением в целевых базах данных получаемой в процессе этого диалога информации по стратегии принятия решения. Технический результат достигается благодаря тому, что в процессе диалога интерактивные шаблоны применяют в зависимости от поэтапной оценки результатов сопоставления содержания знаний, выявленного в процессе диалога, и текущего наполнения целевых баз знаний и используют получаемую в процессе диалога информацию при корректировании модели пользователя.

Способ автоматизированной подготовки и аттестации работников по безопасности производства обеспечивает повышение эффективности обучения и контроля знаний. Он включает в себя применение пе-

персональных ЭВМ для систематизации и обработки знаний в вычислительной среде экспертных систем с помощью интеллектуального интерфейса и диалогового режима и основан на адаптируемых автоматизированных циклах обучения и контроля знаний с использованием формализованных знаний и опыта квалифицированных специалистов с применением тексто-графических процедур и моделей логики принятия решений специалистами. Технический результат достигается благодаря тому, что в процессе подготовки работников целевые базы пополняются знаниями, полученными от них, которые затем используются для совершенствования подготовки и аттестации с построением незамкнутых развивающихся моделей обучения и контроля знаний. При этом в процессе подготовки и аттестации накапливаются знания о работниках для уточнения программ обучения и контроля знаний обучаемого и аттестуемого.

Производственный прототип АРМ СОТ (рисунок 7.1) представляет собой совокупность программных средств на ПЭВМ, насыщенных информационными ресурсами и взаимодействующих с устройствами информационного обеспечения. Они устанавливаются на рабочем месте СОТ для автоматизации в режиме диалога его профессиональных и производственных функций, связанных главным образом с обеспечением безопасности отраслевых технологических процессов и оборудования, производственных сооружений, с оценкой состояния безопасности и условий труда, планированием профилактических мероприятий и мероприятий по нормализации условий труда с привлечением сетевых распределенных информационных ресурсов, включая распределенные базы знаний, при сетевом размещении АРМ СОТ.



Рисунок 7.1. Блок-схема АРМ СОТ.

Машиноориентированные информационные носители, применяемые при организации информационного обеспечения АРМ СОТ, имеют определенную структуру с настраиваемым содержанием в соответствии с потребностями конкретного производства. Они согласованы с действующей утвержденной отчетностью, оформляются работниками, ответственными за регистрацию несчастных случаев и состояния условий труда на производстве, и включают в себя в качестве основных носителей учетный лист несчастного случая, карту нетрудоспособности (карточку дополнительных сведений к учетному листу), карту контроля условий труда. Эти носители гарантируют объективную комплексную оценку состояния безопасности и условий труда в организациях взаимосвязанным своевременным учетом и анализом данных о производственном травматизме, заболеваемости и условиях труда, реализуют модульный принцип построения носителей и организации сбора данных, поддерживают однократный ввод и многократное использование данных на любом уровне в иерархии управления безопасностью производства для реализации как общих, так и специфических информационных потребностей специалистов по охране труда.

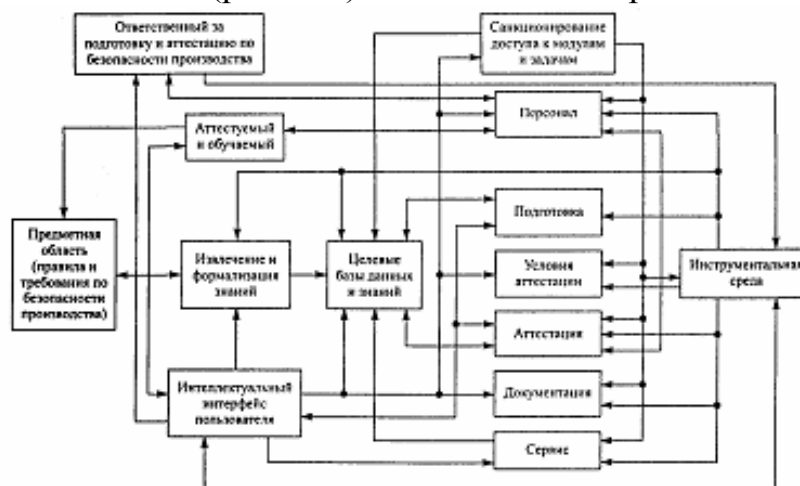
Применяемые средства воспроизведения данных (оптические считыватели или персональные компьютеры) позволяют точно воспроизвести стандартизованные символы из заполненных разделов информационных носителей. Каждое АРМ СОТ снабжено программным средством для предварительной логической проверки достоверности полученных данных из разных взаимосвязанных разделов воспроизведенного носителя информации и сравнения с данными, полученными ранее, в том числе, с применением других информационных носителей, и размещенными в долговременной памяти данного или иного АРМ СОТ.

Работа на конкретном АРМ СОТ в информационно-вычислительной сети персональных ЭВМ с применением пользователями режимов сопоставимых циклов принятия решений позволяет эффективно учитывать помимо распределенных знаний оперативные знания профессионалов, размещаемые на других АРМ.

Совокупность АРМ СОТ рассматривается как многофункциональное средство реализации основных информационно-технологических процессов в рамках ИТ ОБП. Создание и внедрение АРМ СОТ позволяют достичь необходимого уровня децентрализации управленческих решений, обеспечивают накопление и широкое своевременное применение в производстве опыта и знаний высококвалифицированных специалистов, что резко повышает качество и эффективность контроля за реализацией принимаемых решений.

Автоматизированные рабочие места АРМ ОПБП как программные комплексы реализуются в составе АРМ СОТ или в виде независимых программных продуктов. Они включают в себя технологию экспертных систем и процедуры автоформализации знаний квалифицированных специалистов, поддерживающие в режиме диалога автоматизированные циклы обучения и контроля знаний работников по различным аспектам безопасности производства, и позволяют обеспечить необходимое качество процедур подготовки и аттестации работников.

На АРМ ОПБП реализуется модульный принцип с применением самостоятельно работающих блоков персонала, базы знаний, подготовки, условий аттестации, аттестации, документации, сервиса, выделяемых по типам локализованных в них знаний, обладающих соответствующими знаниями, способностью рационально выполнять свои функции и позволяющих быстро изменять их набор в системе, не нарушая ее структуры в целом, причем допускается внесение изменений в отдельные блоки в процессе эксплуатации системы (рис. 7.2). Необходимая простота и доступность



эксплуатации системы достигаются разделением работы с блоками на работу специалиста, ответственного за подготовку и аттестацию по безопасности производства (преподавателя, экзаменатора), и аттестуемого или обучаемого.

Рисунок 7.2. Блок-схема АРМ ответственного за подготовку и аттестацию по безопасности производства.

Средства АРМ ОПБП обеспечивают формализацию знаний и опыта высококвалифицированных специалистов с применением текстографических процедур, развитие системы непрограммирующим профессионалом, адаптацию ее пользователем к изменению внешних знаний, применение средств из арсенала имеющихся в необходимых для конкретного пользователя сочетаниях, построение дружественного интеллектуального

интерфейса, приобретение устойчивых профессиональных навыков обучаемыми и аттестуемыми.

С учетом профессионального уровня аттестуемого или обучаемого работника предусматривается настройка АРМ ОПБП на выполнение отдельных задач или их набора в требуемом сочетании.

Инструментарием системы поддерживаются функции:

- ведения базы профессиональных сведений о персонале, проходящем подготовку и аттестацию, и о персонале, организующем их;

- ввода новых вопросов и комментариев к ним по любой проблемной области, в том числе со сложной конструкцией ответов;

- формирования программ подготовки и аттестации с использованием системных признаков, ключевых слов и словосочетаний;

- подготовки по документу (в полном объеме) или сформированной программе (по выделенной группе описаний) в полном соответствии с порядком аттестации либо в режиме просмотра вопросов и ответов или контроля знаний по желанию обучаемого;

- контроля знаний с оценкой только правильности ответа;

- аттестации с возможностью получения пояснений к неправильным ответам;

- формирования и печати ведомостей и протоколов подготовки и аттестации с учетом дополнительно вводимых пользователем информационных полей;

- формирования и печати отчетной выходной документации, включая журнал регистрации инструктажа на рабочем месте, журнал проверки знаний по охране труда, протоколы заседания комиссии по проверке знаний.

Создаваемое АРМ ОПБП гибкое информационное пространство содержит знания и навыки квалифицированных работников, систематизированные в виде баз данных и баз знаний, и организует необходимую среду для достижения требуемого уровня профессиональной подготовки, соответствия приобретаемых во время обучения стереотипов условиям реальной работы, а также для эффективного использования системы в различных производственных структурах при самостоятельном удовлетворении пользователями (ответственными за подготовку и аттестацию, обучаемыми) потребностей в сведениях, необходимых для подготовки и контроля знаний специалистов.

Рассмотренные компьютерные технологии позволят существенно снизить трудоемкость многоплановых профессиональных обязанностей специалистов по охране труда, привлечь в сферу обеспечения безопасности производства творческих работников и, главное, радикально изменить рычаги воздействия на формирование безопасных условий труда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Долин П.А.* Основы техники безопасности в электроустановках. – М.: Энергоатомиздат, 1884. – 408 с.
2. *Долин П.А.* Справочник по технике безопасности. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 252 с.
3. *Князевский Б.А., Марусова Т.П.* Охрана труда в электроустановках. – М.: Энергия, 1977. – 320 с.
4. Техника безопасности в электроэнергетических установках: Справочное пособие. / Под ред. *Долина П.А.* – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 272 с.
5. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. / Под ред. *Дьякова А.Ф.* – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 288 с.
6. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. / Под ред. *Дьякова А.Ф.* – М.: АО “Энергосервис”, 1996. – 285 с.
7. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2001. – 210 с.
8. *Долин П.А., Медведев В.Т., Корочков В.В.* Электробезопасность: задачник. – М.: Гардарики, 2003. – 215 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА	5
Виды поражений электрическим током.	5
Два вида электрических травм.....	6
Местные электротравмы.	6
Электрический ожог.	7
Электрические знаки.....	7
Металлизация кожи.	7
Механические повреждения.	8
Электроофтальмия.	8
Электрический удар.....	8
Фибрилляция.	9
Электрический шок.....	9
Возможные схемы включения человека в цепь тока	9
Двухполюсное (двухфазное) прикосновение	9
Возможные последствия двухполюсного прикосновения.....	10
Состав защитных мероприятий.	10
Однополюсное (однофазное) прикосновение	11
Схема включения человека в цепь.	11
Условия формирования цепи.....	11
Возможные последствия однофазного прикосновения.	11
Состав технических средств защиты.	12
Остаточный заряд.....	12
Схема включения человека в цепь	12
Условия формирования цепи.....	12
Возможные последствия действия остаточного заряда	13
Защитные мероприятия	14

Наведенный заряд	14
Схема включения человека в цепь	14
Условия формирования цепи	14
Возможные последствия воздействия наведенного заряда	15
Заряд статического электричества	15
Схема включения человека в цепь	15
Условия формирования цепи	15
Возможные последствия действия статического электричества	16
Основные виды разрядов статического электричества:	16
Защитные мероприятия	17
Напряжение шага	17
Схема включения человека в цепь	17
Условия формирования цепи	17
Возможные последствия действия напряжения шага	18
Электрический пробой воздушного промежутка	18
Схема включения человека в цепь	18
Условия формирования цепи	19
Возможные последствия электрического пробоя воздушного промежутка	19
Защитные мероприятия	19
Электрическое сопротивление тела человека.	19
Характер воздействия на человека токов разного значения.	20
Влияние пути тока на исход поражения.	20
Вероятностная модель полного сопротивления тела человека.....	21
ГЛАВА 2. ПЕРВАЯ ПОМОЩЬ	27
Первая помощь пострадавшим от электрического тока.	27
Освобождение человека от действия тока.....	27
Межотраслевая инструкция по оказанию первой помощи при несчастных случаях на производстве.	28

Универсальная схема оказания первой помощи на месте	
происшествия	28
Внезапная смерть	29
Состояние комы	30
Артериальное кровотечение	31
Ранение конечностей	31
Проникающие ранения груди	32
Проникающие ранения живота.....	32
Термические ожоги.....	32
Травмы глаз	33
Переломы костей конечностей	33
Первая помощь в случаях поражения электрическим током	34
Схема действий в случаях поражения электрическим током.	34
Падение с высоты.....	35
Схема действий при автодорожном происшествии	36
Утопление	36
Переохлаждение и обморожение	37
Обморок	38
Сдавливание конечностей; укусы змей и насекомых	39
Химические ожоги и отравления газами	39
Показания к проведению основных манипуляций	40
Признаки опасных повреждений и состояний	41
Аптечка для оказания первой помощи	44
ГЛАВА 3. ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК.....	45
Термины и определения	45
Виды электрических сетей переменного тока	45
Параметры цепей связи токоведущих частей с землей, влияющие	
на безопасность электрических сетей	47
Сопротивление изоляции электротехнических изделий.....	48

Сопротивление изоляции сети	49
Емкость относительно земли	50
Как правильно измерить сопротивление изоляции электроустановок	52
Измерения при снятом рабочем напряжении.....	52
Измерения в сетях постоянного тока	54
Метод уравнивающего моста.	55
Метод трех отсчетов вольтметра.....	55
Измерения в сетях переменного тока.....	61
Измерения в сетях двойного рода тока.....	62
Электрооборудование как источник пожара.....	66
Принципы горения вещества	66
Электрооборудование – пожароопасный фактор	68
Опасность пожаров в трассах кабелей.....	69
Нераспространение самостоятельного горения пучков кабелей	70
Защита трасс кабелей от пожаров	71
ГЛАВА 4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ	
ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК	73
Общие требования к низковольтным аппаратам	73
Общие вопросы испытания НВА	78
Систематизация видов испытаний по основным признакам.....	80
Определение потери напряжения в неполнофазных сетях.....	81
Определение сечений проводов и кабелей по заданной величине потери напряжения при постоянном сечении вдоль линии	85
Методы определения сечений проводов и кабелей по заданной величине потери напряжения при убывающей величине сечения вдоль линии.....	89
Определение сечения по условию наименьшей затраты цветного металла	90

Определение сечения по условию постоянства плотности тока	92
Область применения рассмотренных методов	93
Расчеты сетей без учета индуктивного сопротивления	97
Расчет сетей местного значения с применением продольной компенсации	100
Токи утечки в электроустановках зданий	103
Магнитные поля промышленной частоты.....	104
Влияние электромагнитных полей на здоровье людей.....	105
Влияние ЭМП на компьютерное оборудование	105
Влияние токов утечки на выполнение современных требований по обеспечению пожаро- и электробезопасности в зданиях	106
Коррозионное действие токов утечки.....	107
Расчет распределения тока однофазного замыкания по элементам сложной заземляющей сети	108
Сравнительный анализ безопасности электрических сетей TN и TT ¹	112
Типы электрических сетей напряжением до 1 кВ	112
Электрическая сеть TN-C	115
Электрическая сеть TN-S	116
Электрическая сеть TN-C-S	117
Электрическая сеть TT	118
Сравнительный анализ сетей при различных режимах нейтрали	119
ГЛАВА 5. ЭЛЕМЕНТЫ ЗАЩИТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	124
Предохранители. Общие сведения	124
Нагрев плавкой вставки при длительной нагрузке.....	124
Нагрев плавкой вставки при коротком замыкании	127
Конструкция предохранителей низкого напряжения.....	129
Предохранители с гашением дуги в закрытом объеме.	129
Предохранители с мелкозернистым наполнителем.	131

Предохранители с жидкометаллическим контактом.	133
Быстродействующие предохранители для защиты полупроводниковых приборов.	133
Блоки предохранитель — выключатель.	135
Выбор предохранителей.	136
Выбор по условиям длительной эксплуатации и пуска.	136
Высоковольтные предохранители. Назначение, предъявляемые требования.	145
Предохранители с мелкозернистым наполнителем.	146
Стреляющие предохранители.	148
Выбор предохранителей.	149
ГЛАВА 6. ЗАЩИТНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ И ЗАНУЛЕНИЕ.	150
Защитное заземление. Назначение, принцип действия и область применения.	150
Типы заземляющих устройств.	151
Заземлители.	154
Зануление. Назначение, принцип действия и область применения.	156
Назначение отдельных элементов схемы зануления.	158
Назначение нулевого защитного проводника.	158
Назначение заземления нейтрали обмоток источника тока.	160
Назначение повторного заземления нулевого защитного проводника.	162
Расчет зануления.	166
Расчет на отключающую способность.	166
Расчет сопротивления заземления нейтрали.	174
Выполнение системы зануления.	178
Контроль исправности зануления.	185
Измерение сопротивления петли фаза—нуль.	185
ГЛАВА 7. СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ.	187

Ограждающие электрозащитные средства.....	188
Экранирующие электрозащитные средства.....	188
Предохранительные средства защиты.....	188
Назначение, конструкция и правила применения.....	188
Изолирующие штанги.....	188
Изолирующие клещи.....	189
Указатели напряжения.....	189
Защита от воздействия электромагнитного поля промышленной частоты в электроустановках сверхвысокого напряжения.....	189
Напряженность электрического поля.....	192
Ток, проходящий через человека в землю.....	192
Гигиенические нормативы.....	193
Экранирующий костюм.....	194
Защитный принцип.....	195
Конструкция костюма.....	195
Область и условия применения.....	196
Экранирующие устройства.....	197
Защитный принцип.....	198
Конструкция и размещение.....	198
Условия применения.....	199
Некоторые особенности производства работ в зоне влияния.....	200
Компьютерные технологии обеспечения безопасности производства.....	201
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	208