

Федеральное агентство по образованию

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет “ЛЭТИ”

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ**

Учебное пособие

Санкт-Петербург
Издательство СПбГЭТУ “ЛЭТИ”
2007

УДК 504.75.055:614.825 (075.8)
ББК 31.29ня73
Т 382

Авторы: **Буканин В. А., Ковбасин А. А., Павлов В. Н., Трусов А. О.**
Т 382 Технические средства обеспечения электробезопасности: Учеб. пособие – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2007. – 84 с.

ISBN 5–7629–0854–2

Рассматриваются вопросы опасного воздействия на человека электрического тока. Приводятся критерии нормирования и основные нормативные требования по ограничению воздействия электрического тока на человека, регламентированные государственными стандартами, а также принципы технической защиты от поражения электрическим током и практические рекомендации по расчёту параметров средств обеспечения электробезопасности.

Предназначено для студентов всех специальностей СПбГЭТУ “ЛЭТИ”.

УДК 504.75.055:614.825 (075.8)
ББК 31.29ня73

Рецензенты: кафедра безопасности жизнедеятельности СПбГТУ;
д-р техн. наук О. Н. Русак (СПбЛТА).

Утверждено
редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

ISBN 5–7629–0854–2

© СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2007

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

f , Гц (герц) – частота (промышленная частота $f = 50$ Гц)
 ω , с^{-1} – круговая частота ($\omega = 2\pi f$)
 C , Ф (фарада) – ёмкость
 L , Гн (генри) – индуктивность
 I , А (ампер) – электрический ток
 U , В (вольт) – электрическое напряжение
 R , Ом (Ом) – активное электрическое сопротивление
 Y , См (сименс) – полная электрическая проводимость
 g ($g = 1/R$), См – активная электрическая проводимость
 Z , Ом – полное электрическое сопротивление
 ρ , Ом·м – удельное электрическое сопротивление
 μ – относительная магнитная проницаемость
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная
 ε – относительная диэлектрическая проницаемость
 $\varepsilon_0 = 8.855 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная
БСНН (SELV) – безопасное сверхнизкое напряжение
ЗСНН (PELV) – защитное сверхнизкое напряжение
МОТ – Международная организация труда
ПДУ – предельно допустимый уровень
СИЗ – средство индивидуальной защиты
СИН – сеть с изолированной нейтралью
СГЗН – сеть с глухозаземлённой нейтралью
СКЗ – средство коллективной защиты
CENELEC – Европейская комиссия по стандартизации в электротехнике
ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (Международная комиссия по защите от неионизирующих излучений)
IP – International Protection (международная защита).
IT – система с изолированной нейтралью и заземлением корпуса приёмника
PE – защитный проводник
PEN – совмещённые нулевой и защитный проводники
TT – система с заземлённой нейтралью и заземлением корпуса приёмника
TN – система с заземлённой нейтралью и занулением корпуса приёмника
TN-C – система, в которой корпус приёмника соединяется с общим нулевым проводом
TN-S – система, в которой корпус приёмника соединяется с отдельным нулевым проводом

ВВЕДЕНИЕ

С момента открытия электричества мир, окружающий человека, сильно изменился. В любом доме, на работе, на улице, за пределами городов и населённых мест деятельность людей так или иначе связана с электрическими установками. Однако научно-технический прогресс в области использования электроэнергии наряду с положительным эффектом принёс много и нежелательных проблем. Электрический ток способен вызвать различные электрические травмы, включая смерть человека. По данным МОТ, приблизительно половину несчастных случаев, связанных с электричеством, по своему происхождению можно назвать профессиональными, тогда как другая их половина происходит в домах или во время проведения досуга.

В технической литературе много пишут об опасности электрического тока и методах защиты от него: разработаны специальные нормативные документы: “Правила устройства электроустановок” (ПУЭ), “Межотраслевые правила охраны труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок” ПОТ РМ-016-2001, “Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей” (ПТЭЭП) и государственные стандарты (ГОСТ), в которых казалось бы можно найти ответы на все возникающие вопросы, однако иногда понять и объяснить “сухие” технические формулировки и положения не удаётся не только техническому специалисту, но и лицам, специально изучающим данные вопросы.

Уже при появлении первых электрических источников питания и устройств, потребляющих электроэнергию для различных целей, специалисты начали использовать технические средства защиты, а в дисциплине БЖД вопросам защиты от воздействия электрического тока как одного из опасных факторов среды обитания человека уделяется особое внимание. Безопасность эксплуатации электроустановок должна обеспечиваться организационными и техническими мерами, проводимыми для всех форм взаимодействия человека и технических средств.

Организационными мерами безопасного выполнения работ в электроустановках является проведение ряда мероприятий по овладению работниками безопасных методов работы и контролю их соблюдения:

- обучение работников и населения правилам безопасной эксплуатации электроустановок, внедрение в сознание людей норм безопасного поведения при их использовании;

- аттестация – проверка у работников наличия необходимых знаний, практического опыта, заканчивающаяся присвоением соответствующей квалификационной группы по электробезопасности (I – V);

- инструктаж (вводный, текущий, повторный) – доведение до персонала содержания основных требований к организации безопасного труда и соблюдению правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок, разбор происшедших или возможных ошибок на рабочих местах инструктируемых, углубление знаний и навыков безопасного производства работ, поддержание и расширение знаний по правилам безопасности;

- проверка соблюдения правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок (плановые, контрольные);

- оформление работ повышенной опасности нарядом на производство работ или распоряжением, допуск к работе, надзор во время работы и др.;

- недопущение к самостоятельной работе в электроустановке лиц, не достигших 18-летнего возраста, имеющих ряд заболеваний, и т. д.

Для осуществления указанных функций организуются службы техники безопасности на предприятиях, устанавливается ответственность должностных лиц по обеспечению правильной организации и производства работ.

Технические защитные мероприятия направлены на предотвращение опасного соприкосновения человека с токоведущими или токопроводящими частями, которые могут находиться под напряжением, и на снижение риска поражения электрическим током. Они закладываются в конструкцию электроустановки и отдельных электротехнических изделий и реализуются на этапе их изготовления, а также проводятся во время монтажа электроустановки и при дальнейшей её эксплуатации. Необходимость применения конкретного вида технических средств защиты при эксплуатации электроустановок указана в ГОСТ, ПУЭ и ПТЭЭП.

Основными задачами предлагаемого учебного пособия являются:

- систематизация известных, а также дополненных авторами учебного пособия, материалов по техническим средствам обеспечения электробезопасности;

- рассмотрение основных способов и методов уменьшения опасности поражения человека электрическим током, оценка эффективности технических мероприятий по защите от них, а также проблемных вопросов проектирования устройств такой защиты.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Блокировка электротехнического изделия – часть электротехнического изделия, предназначенная для предотвращения или ограничения выполнения операций одними частями изделия при определённых состояниях или положениях других частей изделия в целях предупреждения возникновения в нём недопустимых состояний или исключения доступа к его частям, находящимся под напряжением (по ГОСТ 18311-80).

Выравнивание потенциалов – снижение разности потенциалов (шагового напряжения) на поверхности земли или пола при помощи защитных проводников, проложенных в земле, в полу или на их поверхности и присоединённых к заземляющему устройству, или путём применения специальных покрытий земли.

Двойная изоляция – электрическая изоляция, состоящая из рабочей и дополнительной изоляций.

Дополнительная изоляция – электрическая изоляция, предусмотренная дополнительно к рабочей изоляции для защиты от поражения электрическим током в случае повреждения рабочей изоляции.

Заземлитель – проводник или совокупность металлически соединённых проводников, находящихся в соприкосновении с землёй или с её эквивалентом.

Заземлённая нейтраль – нейтраль генератора (трансформатора), присоединённая к заземляющему устройству непосредственно или через малое сопротивление.

Зануление (недопустимый термин – *защитное зануление*) – преднамеренное электрическое соединение с нулевым защитным проводником металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением.

Защита от прикосновения к токоведущим частям (защита от прикосновения) – устройство, предотвращающее прикосновение или приближение на опасное расстояние к токоведущим частям.

Защита при наличии неисправности – защита от поражения электрическим током при наличии повреждения (например, повреждения основной изоляции).

Защитная оболочка – мероприятие для защиты от прикосновения к токоведущим частям, основанное на покрытии токоведущих частей приспособлениями, обеспечивающими полную защиту от прикосновения.

Защитное отключение – быстродействующая защита, обеспечивающая автоматическое отключение электроустановки при возникновении в ней опасности поражения током.

Защитное уравнивание потенциалов – электрическое соединение проводящих частей для достижения равенства их потенциалов, выполняемое в целях электробезопасности.

Защитный проводник (РЕ-проводник) – проводник, предназначенный для защитного присоединения к открытым проводящим частям электрооборудования.

Защитное заземление – преднамеренное электрическое соединение с землей или с её эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением.

Изолированная нейтраль – нейтраль генератора (трансформатора), не присоединённая к заземляющему устройству или присоединенная к нему через большое сопротивление.

Изоляция нетоковедущих частей (защитная изоляция) – мероприятие для защиты от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции. Принцип её действия основан на покрытии нетоковедущих частей в отдельных обоснованных случаях изоляционным материалом или изоляции их от токоведущих частей.

Изоляция рабочего места – способ защиты, основанный на изолировании рабочего места (пола, площадки, настила и т. п.) от токопроводящих частей в области рабочего места, потенциал которых отличается от потенциала токоведущих частей и прикосновение к которым является предусмотренным или возможным.

Изоляция токоведущих частей (защитное изолирование) – способ защиты от прикосновения к токоведущим частям. Принцип его действия основан на покрытии токоведущих частей изоляционным материалом.

Косвенное прикосновение – электрический контакт людей или животных с открытыми проводящими частями, оказавшимися под напряжением при повреждении изоляции.

Малое напряжение (недопустимый термин – *безопасное напряжение*) – номинальное напряжение не более 50 В переменного тока 50 Гц или 120 В постоянного тока (ранее этот уровень составлял, соответственно, 42 и 110 В).

Нулевой защитный проводник (PEN-проводник) – проводник, соединяющий открытые проводящие части электроприёмника с глухозаземлённой нейтральной точкой обмотки (глухозаземленной нейтрали) источника питания или с её эквивалентом. Применяется в электроустановках до 1 кВ.

Основная защита – защита от поражения электрическим током в условиях отсутствия повреждения.

Открытая проводящая часть – доступная прикосновению проводящая часть электроустановки, нормально не находящаяся под напряжением, но которая может оказаться под напряжением при повреждении основной изоляции.

Пороговый неотпускающий ток – минимальное значение тока, при котором возникает судорожное сокращение мышц.

Пороговый ощутимый ток – минимальное значение тока, который начинает ощущать человек.

Прямое прикосновение – электрический контакт людей или животных с токоведущими частями, находящимися под напряжением.

Рабочая изоляция – электрическая изоляция токоведущих частей электроустановки, обеспечивающая её нормальную работу и защиту людей и животных от поражения электрическим током.

Разделительный трансформатор – специальный трансформатор, предназначенный для отделения приёмника энергии от первичной электрической сети и от сети заземления.

Сеть двойного рода тока – электроустановка переменного тока, содержащая силовые или слаботочные цепи постоянного тока, получающие питание от полупроводниковых выпрямителей без трансформаторных развязок.

Токоведущая часть – проводящая часть электроустановки, находящаяся в процессе её работы под рабочим напряжением, в том числе нулевой рабочий проводник (но не PEN-проводник).

Усиленная изоляция – улучшенная рабочая изоляция, обеспечивающая такую же степень защиты от поражения электрическим током, как и двойная изоляция.

Электрическая сеть – это совокупность электроустановок для передачи и распределения электрической энергии, состоящая из подстанций, распределительных устройств, токопроводов, воздушных и кабельных линий электропередачи, работающих на определённой территории.

Электрическая травма – нарушение анатомических соотношений и функций тканей и органов, сопровождающееся реакцией организма в результате действия электрического тока или электрической дуги.

Электрическое разделение сети (разделение сети) – разделение электрической сети на отдельные электрически не связанные между собой участки с помощью разделительного трансформатора.

Электробезопасность – система организационных и технических методов и средств, обеспечивающих защиту от опасного действия электрического тока и электрической дуги.

Электроустановка – 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 её в другие виды энергии.

2. ОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА И ЕГО НОРМИРОВАНИЕ

Сторонний электрический ток, протекающий по телу человека, является вредным фактором при небольшой силе и большом времени воздействия и опасным при большой силе, вызывая электрический удар и электрические травмы. Тем не менее не всегда большой ток вызывает электрическую травму, тем более смертельную. Многие люди, попавшие под опасное напряжение, остались живы и не получили повреждений тканей и органов благодаря реакции своей нервной системы, позволяющей уйти от контакта с током и тем самым сохранить жизнь, или благодаря защитным техническим средствам, уменьшающим время действия тока. В данном случае это не относится к электрической травме, хотя нервная система человека после действия тока ещё некоторое время находится “под впечатлением” произошедшего события, а в памяти человека надолго остаётся информация о нём.

В настоящее время от действия электрического тока в разных странах за год погибают от трех до десяти человек из 1 млн. жителей, то есть индивидуальный риск гибели составляет $R_i = (3 \dots 10) \cdot 10^{-6}$. Из всех случаев гибели до 30 % приходится на производство, более 70 % поражений электрическим током отмечено в бытовых условиях при пользовании радиотехническими, телевизионными, электротехническими и другими электрическими установками и системами или (за пределами дома) от линий электропередач и т. д.

Можно выделить следующие виды электрического тока:

- постоянный (частота тока равна нулю);
- выпрямленный (однополупериодный, двухполупериодный);
- переменный, в том числе низкочастотный; промышленной частоты (50 или 60 Гц); средне- и высокочастотный.

Большое число случаев поражения электрическим током приходится на промышленную частоту (50 Гц) и напряжение ниже 1000 В (примерно половина от всех смертельных случаев) – в особенности 220 В или ниже. От электрического тока чаще всего страдают молодые люди (до 30 лет – около 85 %). Зафиксированы смертельные случаи от напряжения 12 В промышленной частоты, которое в соответствии с нормативными документами относится к сверхнизким (малым) и, казалось бы, безопасным напряжениям. Анализ подобных случаев показывает, что причиной поражения являлись чрезвычайно неблагоприятные условия (помещение повышенной опасности поражения электрическим током или наружные электроустановки), а также прохождение тока через акупунктурные зоны и нарушение мозгового кровообращения, сопровождающееся деструкцией центров управления системами дыхания и кровообращения. При воздействии тока акупунктурные зоны, имеющиеся на теле человека, считаются наиболее уязвимыми.

Прохождение тока может вызывать в теле многочисленные раздражения рецепторов, ухудшение работы и поражения различных тканей и органов человека. Некоторые из них являются временными и заканчиваются при прекращении его действия, а некоторые не прекращаются даже после того, как человек отключится от цепи тока. Электрический ток вызывает прямое действие на нервные клетки (шоковое состояние), на кровь и кровеносные сосуды, может вызвать нежелательное действие на сердечную систему (аритмия, инфаркт миокарда), на головной мозг (изменение энцефалограммы) и центральную нервную систему, нарушить нормальную работу слухового и зрительного органов и т. д. Возможными последствиями действия электрического тока являются судорожное сокращение мышц без потери или с потерей сознания; нарушение функции сердечной деятельности или дыхания; клиническая смерть. Наиболее важными эффектами, на действии которых основано нормирование тока, а также выбираются технические средства защиты, являются столбняк, прекращение дыхания, вентрикулярная фибрилляция и ожоги.

Различают следующие виды действия тока на живой организм:

- тепловое (термическое);
- механическое;
- химическое
- биологическое.

Тепловое действие электрического тока разнообразно. За счёт большой энергии, определяемой согласно закону Джоуля произведением квадрата тока на сопротивление, возможны объёмный нагрев тканей, нервных центров и кровеносных сосудов человека или поверхностное повреждение кожи. Благодаря тому, что поверхностное сопротивление кожи достаточно большое, её обугливание при плотности тока примерно 50 А/мм^2 происходит за несколько секунд. Наиболее тяжёлым случаем теплового действия является обугливание мышечной ткани и костей при очень большой силе тока (более 1 А) или при воздействии электрической дуги.

Источниками термического действия являются оголённые токоведущие части, токи высокой частоты, нагретые током металлические предметы и резисторы; электрическая дуга. Токовый (контактный) ожог кожи возникает в электроустановках относительно невысокого напряжения – до 2 кВ. Исключительно ожогами характеризуется и действие высокочастотного (около 1 МГц или более) электрического тока. “Электрические метки” могут возникнуть в местах контакта кожи с металлическими предметами, оказавшимися под напряжением. Внешне они чем то похожи на следы укуса пчелы или осы. Медикам-криминалистам электрические метки дают информацию о причине смерти (от электричества или от других причин). Электрическая дуга формируется при внезапном изменении стационарного режима работы электроустановки (короткое замыкание посторонними предметами токоведущих частей, повреждение электрической изоляции, разрыв электрической цепи под нагрузкой, электрический пробой воздушных зазоров и т. п.). Температура дуги может достигать 7000°C , что может вызвать тяжёлые ожоги и травмы.

Механическое действие электрического тока в основном связано с реакцией организма человека и выражается в разрыве мышц, в трещинах и надломах костей, в повреждении кровеносных сосудов. Часто человек получает механические вторичные травмы, пытаясь резко освободиться от воздействия электрического тока и ударяясь при этом об окружающие предметы.

Химическое действие заметно в цепях постоянного тока. Организм человека состоит из неполярных и полярных молекул и различных ионов (катионов и анионов). Все эти элементарные частицы находятся в непрерывном хаотическом тепловом движении, при котором обеспечивается жизнедеятельность организма. Электрический ток в теле человека в основном возникает в виде направленного, строго ориентированного перемещения ионов и поляризации крупных молекул, что нарушает химический баланс тканей, и при длительном его воздействии могут болеть желудок и другие внутренние органы (при действии переменного тока это явление менее заметно).

Биологическое действие затрагивает центральную нервную систему и сердечно-сосудистую системы. Эффект электрического раздражения складывается как из непосредственного влияния электрического тока на клетки, ткани и органы, так и опосредованного – через лежащие на его пути экстеро- и интерорецепторы. Человек не наделён специальными рецепторами, которые реагируют на электрический ток. Тем не менее при прохождении его по другим рецепторам, отвечающим за тактильный, вкусовой, кинестетический или мускульный анализаторы, последние посылают биосигналы в кору головного мозга, который анализирует их и после соответствующей обработки, в свою очередь, посылает органам команды на выполнение определённых действий (например, выделить слюну на кислый вкус, сократить мышцы и отдернуть руку, активизировать работу потовых желез и т. д.). Человек начинает чувствовать лёгкое покалывание при токе через кончики пальцев 0.5...1.5 мА на частоте 50 Гц, и нагрев при постоянном токе 5...10 мА. Самым чувствительным органом является язык: начало ощущений (кислый вкус при касании электродов батарейки) соответствует току примерно 45 мкА.

С увеличением силы тока количество возбуждаемых рецепторов и посылаемых в центральную нервную систему сигналов настолько увеличивается, что в результате ответных команд может произойти судорожное сокращение мышц. Судорога приводит к тому, что человек в неблагоприятных для себя или стеснённых условиях не может самостоятельно оторваться от токопроводящей части, находящейся под напряжением. В зависимости от пола и возраста людей можно выделить следующие пределы значений порогового неотпускающего тока: 6...16 мА на частоте 50 Гц, 112...224 мА на частоте 100 кГц, 100...300 мА на постоянном токе. Для женщин они составляют приблизительно 2/3 значения силы тока для мужчин, для детей – ещё меньше.

В результате протекания внешнего электрического тока через область сердца нарушается строгая последовательность сокращения групп сердечных мышц и синхронность сокращения их отдельных волокон (фибрилл). Наступает вентрикулярная фибрилляция, то есть частое несинхронное сокращение волокон сердечной мышцы, которая может продолжаться и после прекращения действия тока. Исследователями отмечено, что фибрилляция, как правило, наступает при переменном токе частотой 50/60 Гц более 90...100 мА, при постоянном токе более 300 мА, а при токе, большем 5 А, происходит остановка сердца без фибрилляции. Вероятность поражения током большой силы (около 100...200 мА) зависит от начала его действия в период кардиоцикла: при времени действия, превышающем 200 мс, возможно совпадение начала воздействия тока с фазой расслабления сердца, при которой опасность поражения резко возрастает и может составить 50...100 %.

На рис. 2.1 показаны кривые изменения порогового ощутимого и неотпускающего токов в зависимости от его частоты (для взрослого мужчины). Зона между кривыми 1 и 2 – зона разброса ощутимого тока для 0...99.5% тестируемых людей, между кривыми 3 и 4 – зона пороговых неотпускающих токов для 0...99.5 % тестируемых людей. На частоте 10 000 Гц сила неотпускающего тока в 5–7 раз больше, чем на $f=50$ Гц.

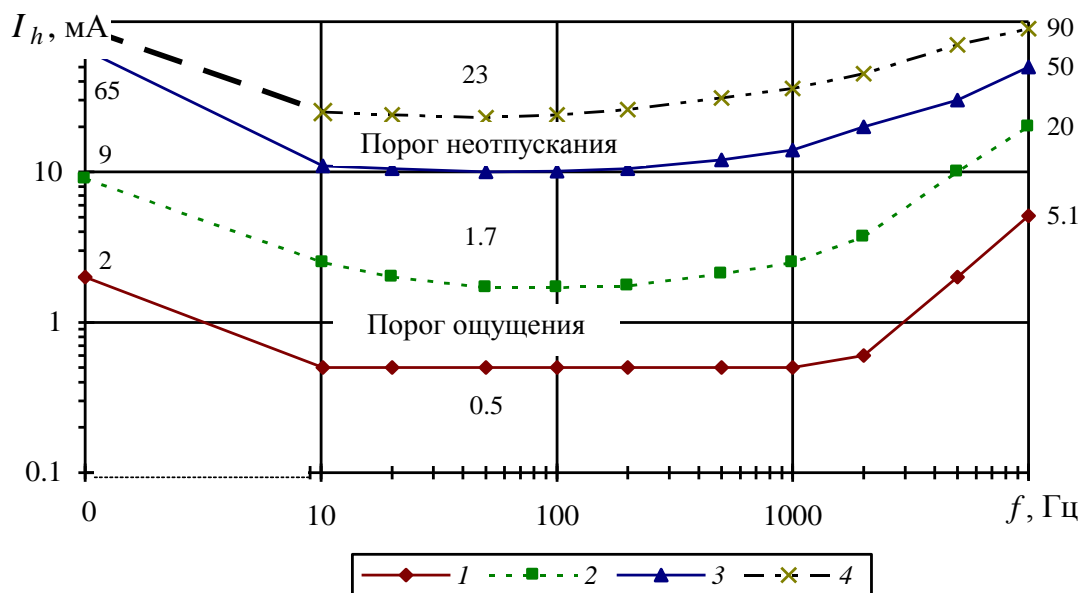


Рис. 2.1. Зависимость ощутимых и неотпускающих токов от частоты f

В табл. 2.1 приведены пороговые области тока различных частот согласно рекомендации ICNIRP.

Таблица 2.1

Эффект действия тока	Пороговый ток в миллиамперах от частоты			
	50/60 Гц	1 кГц	100 кГц	1 МГц
Начало ощущения	0.2...0.4	0.4...0.8	25...40	25...40
Боль при контакте пальцами рук	0.9...1.8	1.6...3.3	33...55	28...50
Болезненный удар/ порог неотпускания	8...16	12...24	112...224	-
Сильный удар/затруднение дыхания	12...23	21...41	160...320	-

Предельно допустимый ток через тело человека устанавливается по следующим основным принципам (требованиям):

- при возможном длительном воздействии тока (в течение минут) – не допустить заболевания внутренних органов;
- для короткого времени воздействия (от сотых долей секунды до одной секунды) – не допустить вентрикулярной фибрилляции сердца;
- для относительно короткого времени воздействия (от одной секунды до нескольких секунд) – не допустить судорог мышц и остановки дыхания.

Предельно допустимые значения напряжения прикосновения и силы тока согласно требованиям ГОСТ 12.1.038-82*, рекомендациям CENELEC и ICNIRP приведены на рис. 2.2 – 2.4.

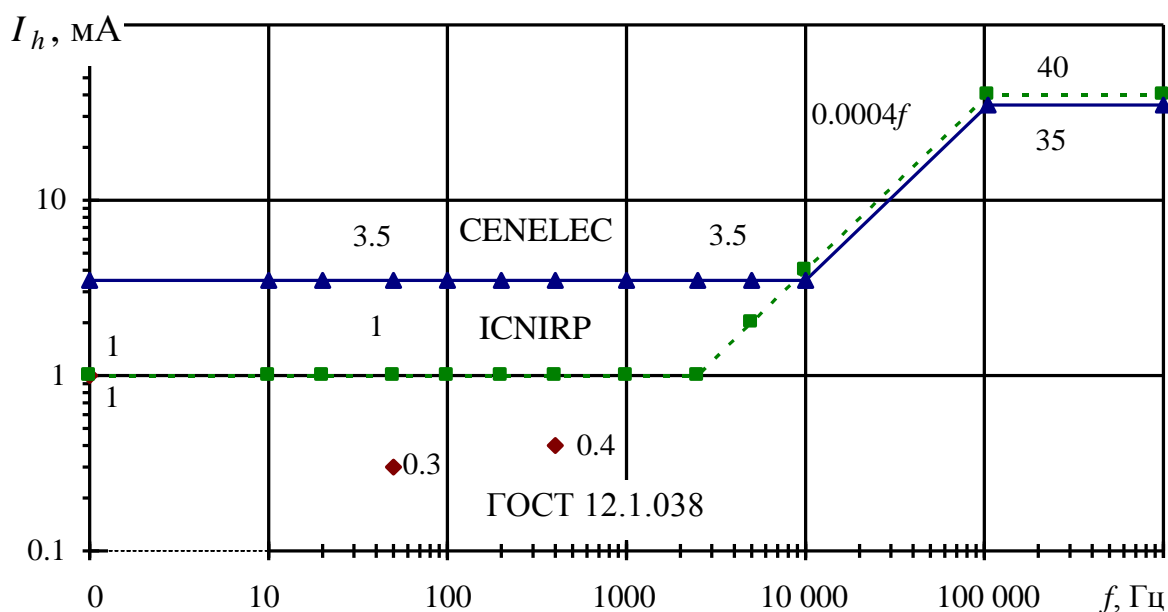


Рис. 2.2. Зависимости предельных длительных токов от частоты f

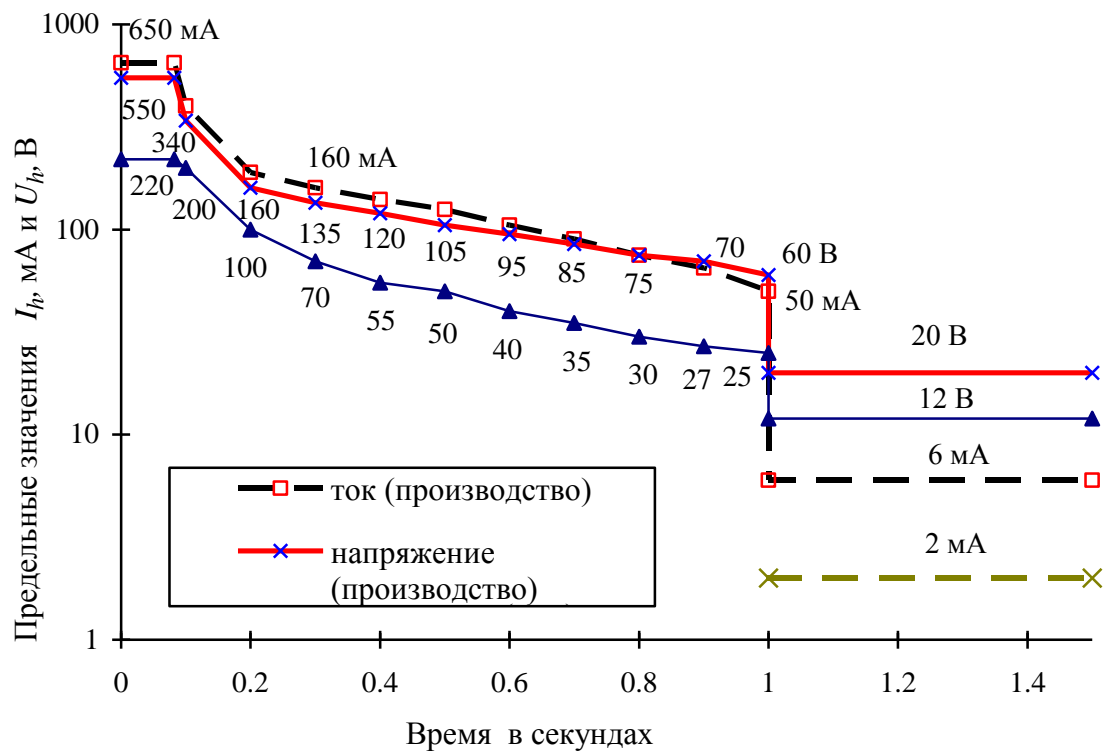


Рис. 2.3. Предельные напряжения прикосновения и токи частотой 50 Гц

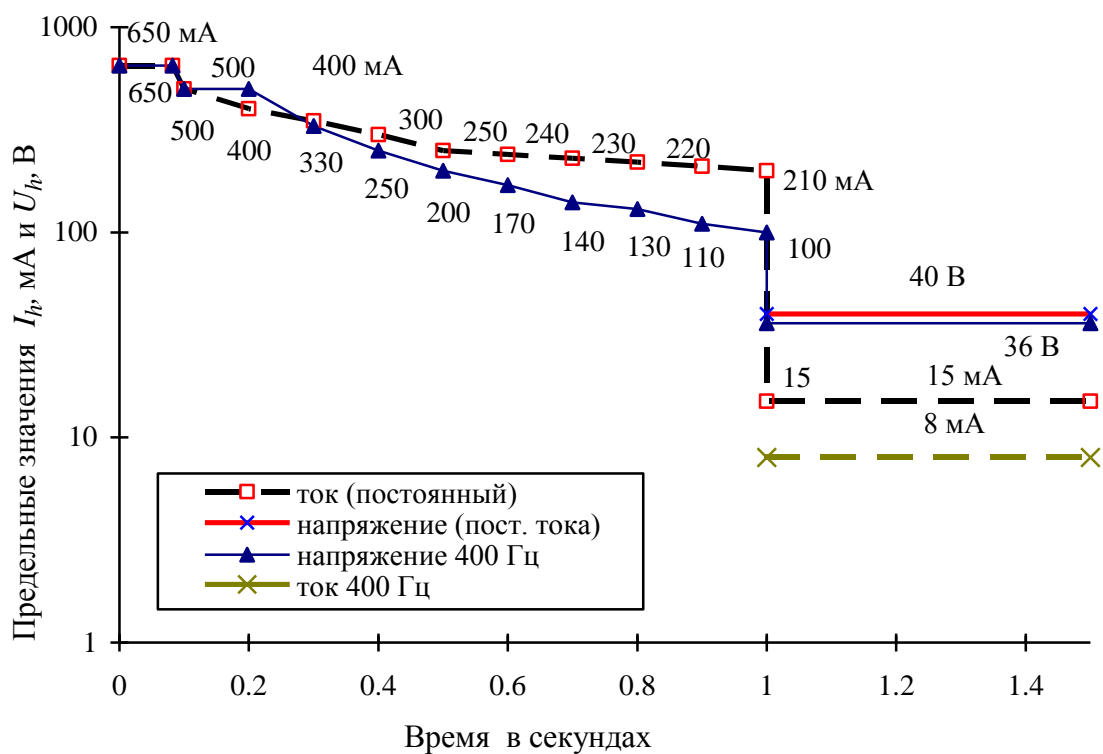


Рис. 2.4. Предельные напряжения прикосновения и токи частотой 0 и 400 Гц

В России сила длительного допустимого тока для нормального режима работы электроустановки меньше, чем пороговый ощутимый ток. Международные требования являются более мягкими, поскольку сила допустимого тока уже ощутима для всех людей. В отличие от России нормирование за рубежом проводится для всего диапазона частот.

Согласно ГОСТ 12.1.038-82* напряжение прикосновения и ток, протекающий через тело человека, при нормальном (неаварийном) режиме работы электроустановки при продолжительности воздействия до 10 мин в сутки не должны превышать 2 В и 0.3 мА для частоты 50 Гц, 3 В и 0.4 мА для 400 Гц, 8 В и 1 мА для постоянного тока. Если температура воздуха превышает 25 °С или относительная влажность превышает 75 %, эти значения должны быть уменьшены в три раза.

В аварийных условиях для производственных электроустановок напряжением до 1000 В с глухозаземлённой или изолированной нейтралью и выше 1000 В с изолированной нейтралью предельные значения не должны превышать для 50 Гц 20 В и 6 мА при продолжительности воздействия свыше 1 с. Это ощутимые, но отпускающие токи, и риск остановки дыхания в этом случае отсутствует.

Максимально допустимый контактный ток для производственных электроустановок частотой 50 Гц составляет 550 мА. При таком токе допустимое время нахождения составляет не более 80 мс, а с уменьшением тока допустимое время может быть увеличено. При этом выполняется некоторое зависимое от тока условие безопасности, а именно, “доза тока” $I_h t \approx 25 \text{ мА} \cdot \text{с}$ (для промежутка времени от $t = 0.1$ до $t = 1$ с). Если токи и напряжения не превышают значений, ограниченных кривой безопасности, у физически здорового работника с допустимым риском не произойдёт остановка сердца или дезорганизация его нормальной работы. Можно считать, что величина *допустимого индивидуального риска* составляет 10^{-6} год^{-1} , то есть в течение года может погибнуть 1 человек из 1 млн. людей, что в 3 – 10 раз меньше реально существующего риска на сегодняшний день.

Предельно допустимые значения напряжения прикосновения и токов при аварийном режиме бытовых электроустановок напряжением до 1000 В и частотой 50 Гц при продолжительности воздействия свыше 1 с не должны превышать 12 В и 2 мА. При больших их значениях время нахождения должно быть уменьшено, причём в большей степени, чем для производственных

условий. Одной из причин ужесточения нормирования является присутствие дома детей, людей пенсионного возраста, людей, страдающих нервными и сердечно-сосудистыми заболеваниями, или людей, не знакомых даже с основами электробезопасности. Другой причиной может служить более высокая величина риска получения травмы от домашнего электрооборудования либо сети из-за отсутствия должного контроля за их состоянием.

Рекомендации МЭК ограничивают для промышленной частоты максимальное напряжение прикосновения 310 В при времени воздействия до 30 мс и 50 В при времени около 5 с. Напряжение непродолжительного воздействия постоянного тока (около 5 с) составляет 120 В. Можно констатировать, что при относительно продолжительном времени воздействия тока в аварийном режиме работы электроустановки (1...10 с) международные нормы допускают бóльшие напряжения прикосновения и, следовательно, бóльший индивидуальный риск гибели, в то время как при времени, меньшем 1 с, напряжение прикосновения значительно меньше, чем регламентированное российским стандартом.

Вследствие гармонизации нормирования Россия пошла по пути смягчения требований, приняв концепцию МЭК и фактически повысив допустимое напряжение прикосновения при относительно длительном воздействии тока на человека, но не изменила требования при кратковременных его воздействиях. Нормы остались прежними, однако ограничения рабочих напряжений питания электроустановок 42 В переменного тока промышленной частоты и 110 В постоянного тока, при которых электрооборудование можно было бы отнести к III классу защиты от поражения электрическим током, изменились, увеличившись, соответственно, до 50 и 120 В.

Для некоторых видов электротехнических изделий или аппаратуры заданы свои предельные значения напряжений прикосновения (контактных токов). Так, согласно ГОСТ Р МЭК 60065–2002, для аудио-, видео- и аналогичной электронной аппаратуры (контакты клемм, соединителей или их частей) эти значения составляют:

- пиковые значения 0,35 В (0,7 мА) на промышленной частоте; 35 В (70 мА) для частоты, равной или более 100 кГц, и 1 В (2 мА) на постоянном токе – в нормальных условиях;
- пиковые значения 70 В на промышленной частоте и 120 В на постоянном токе (для контактов клемм при условии, что антенный штекер и ште-

кер заземления не могут быть вставлены в соединитель, 1.4; 70 и 4 В для промышленной частоты и частоты, равной или более 100 кГц, и на постоянном токе соответственно) – в условиях неисправностей.

Согласно ГОСТ Р 50829–95 электрически безопасными (не вызывающими электрический удар и высокочастотные ожоги кожи) элементами радиостанций, радиопередатчиков и другой радиоэлектронной аппаратуры, в том числе всей бытовой (радиотелефонов, противоугонных устройств, радиоохранной сигнализации и т. д.), являются такие элементы, при прикосновении к которым ток, протекающий через безындуктивное сопротивление 2 кОм, не превышает 2 мА (постоянный ток) и пиковых значений 0.7 мА (переменный ток частотой до 1 кГц), 70 мА (ток частотой свыше 100 кГц) и $0.7f$ (частота в килогерцах) при токах частотой f от 1 до 100 кГц. Предельным значением напряжения прикосновения является пиковое значение 72 В (действующее значение примерно 50 В).

3. ТРЕБОВАНИЯ К ВЫБОРУ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ

Следует различать следующие виды опасности для человека:

- опасность прикосновения к токоведущим частям, когда человек одновременно находится в контакте с потенциалом земли или с другой токоведущей частью отличного потенциала (прямое прикосновение). Такой опасности подвергаются электромонтёры при работе на электроустановке без снятия напряжения на токоведущих частях; люди в обычных бытовых условиях при ремонте своих электроустановок или при проведении ремонтов, когда затрагивается электропроводка; дети во время шалостей с электрической розеткой, засовывая шпильки в отверстия для подключения вилки, и т. д.;
- опасность прикосновения к открытой проводящей части электрического оборудования, которая находится под напряжением вследствие повреждения изоляции, а человек в такой момент находится в контакте с потенциалом земли или с другой проводящей частью отличного потенциала, например с другой открытой проводящей частью или со сторонней проводящей частью (косвенное прикосновение). Это наиболее распространённые на производстве или в быту контакты с металлическими частями и кожухами электрооборудования (холодильник, утюг, системный блок компьютера, электродвигатель и многое другое).

Выбор технических способов и средств защиты для обеспечения электробезопасности производится с учётом:

а) номинального напряжения, рода и частоты тока электроустановки. Малые напряжения (в настоящее время до 50 В переменного тока частотой 50 Гц и до 120 В постоянного тока) считаются относительно безопасными. При амплитудном значении переменного тока около 60 В и действующем напряжении 42 В происходит резкая потеря изоляционных свойств человеческой кожи. При этом ток силой $I_h = U_h / R_h = 42 / 5000 = 0.0084$ А, протекающий через тело человека, имевшего неповреждённую кожу, резко возрастает до силы $I_h = 42 / 1000 = 0.042$ А и становится неотпускающим;

б) способа электроснабжения (от стационарной сети или от автономного источника питания электроэнергией);

в) режима нейтрали (средней точки) источника питания электроэнергией (изолированная/заземлённая нейтраль). Согласно ПУЭ электроустановки в отношении мер электробезопасности разделяются:

- на электроустановки напряжением выше 1 кВ в сетях с глухозаземлённой или эффективно заземлённой нейтралью;
- на электроустановки напряжением выше 1 кВ в сетях с изолированной или заземлённой через дугогасящий реактор или резистор нейтралью;
- на электроустановки напряжением до 1 кВ в СГЗН;
- на электроустановки напряжением до 1 кВ в СИН;

г) вида исполнения (стационарные, передвижные, переносные);

д) условий внешней среды и характера используемого помещения. В зависимости от опасности поражения людей электрическим током все помещения, где находится электрооборудование, разделяются на три категории. Категория помещения определяется по наличию в нём признаков повышенной или особой опасности. К категории *помещений с повышенной опасностью* относятся помещения, имеющие один из следующих пяти признаков: 1) сырость (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %); 2) токопроводящая пыль (технологическая пыль может оседать на провода, проникать внутрь корпусов электротехнических изделий); 3) высокая температура (температура постоянно или периодически – более 1 сут – превышает 35 °С); 4) токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т. п.); 5) возможность прикосновения человека одновременно к металлическому корпусу прибора и к имеющим соединение с землей метал-

локонструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т. п. Первые три признака воздействуют на электрическую изоляцию, снижая её сопротивление. Два последних признака снижают сопротивление в контуре тока через тело человека в режиме однофазного прикосновения.

Для офисных, общественных и жилых помещений чаще всего имеется возможность одновременного прикосновения к корпусу электротехнического изделия (настольной лампы, персональной вычислительной машины) и к имеющим соединение с землёй металлоконструкциям (к батареям отопления, к водопроводным трубам).

Особо опасные помещения характеризуются наличием одного из следующих трёх условий: 1) особой сырости (относительная влажность воздуха близка к 100 % – влагой покрыты потолок, стены, пол и предметы, находящиеся в помещении); 2) химически активной или органической средой (постоянно или в течение длительного времени содержатся агрессивные пары, газы, жидкости, образуются отложения или плесень, разрушающие изоляцию и токоведущие части электрооборудования); 3) одновременным наличием двух и более признаков повышенной опасности.

К этой же категории помещений относятся наружные пространства и замкнутые объёмы (типа цистерн, туннелей, путепроводов и т. д.).

Помещения, не содержащие указанных признаков и условий, относятся к категории *помещений без повышенной опасности*;

е) уровня квалификации пользователей и лиц, эксплуатирующих электроустановку;

ж) характера возможного прикосновения человека к элементам цепи тока: прямые однофазное (однополюсное) или двухфазное (двухполюсное) прикосновения; косвенное прикосновение к нетоковедущим частям;

з) возможности приближения к токоведущим частям, находящимся под напряжением, на расстояние, меньшее допустимого, или попадания в зону растекания тока;

и) возможности (допустимости) снятия напряжения с токоведущих частей, зависящих от важности подключаемого к электрической сети оборудования;

к) экономических соображений.

В отличие от производственных помещений в бытовых и общественных помещениях, в которых электрическое оборудование доступно для насе-

ления, как правило, не обладающего даже минимальными знаниями по электробезопасности, возможны грубейшие нарушения людьми правил эксплуатации электрооборудования, а также вандалистские действия. Кроме того, бытовые электроустановки, как правило, не обеспечены квалифицированным надзором, позволяющим оперативно выявлять и устранять опасные повреждения. Поэтому в указанных случаях при минимуме возможных организационных мероприятий (типа инструкции по эксплуатации) основной объём мер по обеспечению электробезопасности переносится на технические защитные мероприятия (“защита от дурака”).

Правила доступности для населения могут отличаться от правил для квалифицированных работников и могут изменяться также и в зависимости от вида электрооборудования и его расположения.

Распределение усилий в сфере обеспечения электробезопасности между организационными и техническими мероприятиями обусловлено такими характеристиками электроустановки, как доступность её для окружающих, характер ухода за ней и квалификация обслуживающего персонала. В зависимости от этих характеристик принята следующая классификация помещений для размещения электрооборудования:

- замкнутые электротехнические помещения, в которые лишь кратковременно имеет доступ соответственно инструктированный электротехнический персонал; а в остальное время эти помещения закрыты (например, трансформаторные будки, помещения распределительных устройств и т. п.). Предполагается, что за короткое время пребывания в таком помещении внимание персонала не будет ослаблено, и поэтому электробезопасность в основном обеспечивается организационными мероприятиями, а требования к техническим средствам могут быть минимальными;
- электротехнические помещения, в которых электрооборудование доступно только для присутствующего обслуживающего персонала. Длительное присутствие может сопровождаться отвлечением его внимания, и как следствие, случайными неосторожными действиями. Поэтому дополнительно к организационным мероприятиям требуется предусмотреть ряд технических защитных мероприятий от поражения электрическим током;
- производственные помещения, в которых электрическое оборудование доступно для лиц, не имеющих специального электротехнического образования, но прошедших минимально необходимые обучение и инструктаж.

Предполагается, что вероятность грубых ошибочных действий и нарушений правил безопасности, совершаемых работниками, велика, но не в той степени, как, например, дома или на даче. Поэтому дополнительно к организационным мероприятиям предусматриваются комплексы технических защитных мероприятий от поражения электрическим током и в случае аварийных ситуаций, и в случае нарушений правил безопасности.

Технические средства обеспечения электробезопасности выбираются с учётом обеспечения допустимого индивидуального риска в любых условиях эксплуатации электроустановок.

Логической цепочкой рассуждений при выборе стратегии защиты в электроустановке, которая обеспечивает допустимый индивидуальный риск, могла бы быть следующая (пример для стационарно устанавливаемого производственного электрооборудования приведён в табл. 3.1):

- определить условия эксплуатации;
- определить напряжение питания;
- определить виды и необходимое число защит.

Таблица 3.1

Напряжение питания, В 50 Гц/ 0 Гц	Виды и число технических защитных средств для помещений			
	без повышенной опасности	повышенной опасности	особо опасного	Наружные условия
660/800	Основная и одна дополнительная защиты	Основная и две дополнительные защиты	Основная и три дополнительные защиты	Основная и четыре дополнительные защиты
380	То же	Основная и одна дополнительная защиты	Основная и две дополнительные защиты	Основная и три дополнительные защиты
220	– « –	То же	Основная и одна дополнительная защита	Основная и две дополнительные защиты
120	– « –	– « –	То же	Основная и одна дополнительная защиты
50/120	Основная защита	– « –	– « –	То же
25	То же	Основная защита	– « –	– « –
12	– « –	То же	– « –	– « –

В любом случае требуется решить задачу, как при работе электроустановки и электрооборудования достигнуть таких условий, чтобы риск поражения электрическим током не превышал допустимого. Например, вы при-

оборудование для производственного процесса, при котором налажены системы контроля технического состояния оборудования и систем защиты, отбраковка повреждённых изделий и проводятся организационные меры защиты. Тогда вероятность (риск) гибели работника может быть определена как произведение вероятности отказа защиты $P_{o.з}$ на вероятность гибели в результате этого отказа защиты $P_{г.о.з}$: $P_{г.} = P_{o.з} \cdot P_{г.о.з}$. Исходя из этого, можно сформулировать необходимые требования как к изделию, так и к организации выполнения защиты. Предположим, что в производственных условиях $P_{o.з} = 10^{-3}$, тогда чтобы получить приемлемый риск 10^{-6} год^{-1} , необходимо добиться $P_{г.о.з} = 10^{-3}$. В связи с тем, что для бытовых условий вероятность отказа защиты на порядок выше (к примеру $P_{o.з} = 10^{-2}$), для получения той же величины риска необходимо уменьшить риск гибели при отказе защит до $P_{г.о.з} = 10^{-4}$.

Одним из путей обеспечения указанных условий является снижение напряжения источников питания до 220 В с тем, чтобы напряжение прикосновения не превышало требования ГОСТ 12.1.038-84 (220 В – максимально допустимое в аварийном режиме работы бытовой электроустановки). Отсюда становится ясно, почему в квартирах или частных домах питание подаётся только от одной фазы трёхфазной сети. Можно, конечно, просить подвести трёхфазное питание, но тогда сам хозяин уже ответственен за то, чтобы обеспечить вероятность отказа защиты до допустимого уровня. В США напряжение питания составляет 120 В, то есть риск гибели при отказе защит до $P_{г.о.з} = 10^{-5}$, тогда допустимый риск может быть обеспечен и при использовании менее надёжного электрооборудования, т. е. $P_{o.з} = 10^{-1}$.

Для обеспечения защиты от случайного прикосновения к токоведущим частям можно применять следующие способы и средства:

- безопасное расположение токоведущих частей;
- защитные оболочки;
- защитные ограждения (временные или стационарные);
- изоляцию токоведущих частей (рабочую, усиленную, двойную);
- предупредительную сигнализацию, блокировку, знаки безопасности.

Для обеспечения защиты от поражения электрическим током при прямом прикосновении к токоведущим частям можно применять следующие способы и средства:

- изоляцию рабочего места;
- малое напряжение;
- защитное отключение;
- уравнивание потенциалов;
- электрическое разделение сети;
- компенсацию токов замыкания на землю;
- защитное шунтирование;
- средства индивидуальной защиты.

Для обеспечения защиты от поражения электрическим током при косвенном прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции, применяют следующие способы:

- защитное заземление;
- зануление;
- выравнивание потенциала;
- защитное отключение;
- изоляцию нетоковедущих частей;
- электрическое разделение сети;
- малое напряжение;
- контроль изоляции;
- компенсацию токов замыкания на землю;
- защитное шунтирование;
- средства индивидуальной защиты.

Непосвящённый или необученный человек (частное лицо) часто, полагаясь на интуицию, может ошибиться при выборе средств защиты, особенно если он следует инструкции по применению изделий, поступающих из-за границы, и у которых имеются свои особенности работы электроустановок, не характерные для России (к примеру, если в разделе инструкции по защите системного блока записано, что требуется заземление корпуса, то это ещё не значит, что данная защита обеспечит вашу безопасность, а скорее, наоборот, введёт вас в заблуждение и приведёт к непоправимым последствиям).

Таким образом, технические способы и средства защиты должны применяться с учётом знаний особенностей их работы отдельно или в сочетании друг с другом так, чтобы обеспечивалась оптимальная защита от пора-

жения электрическим током. *Основным правилом* такой защиты, которое призвано исключить опасности прямого и косвенного прикосновений, является следующее: *опасные токоведущие части не должны быть доступными, а доступные проводящие части не должны быть опасными* в нормальных условиях работы и при наличии неисправности.

Защита от поражения электрическим током может быть обеспечена условиями эксплуатации, конструкцией электрооборудования, системой питания или соответствующими комбинациями мер защиты.

Обобщённые виды защит приведены на рис. 3.1 – 3.3.

Усиленные защитные меры обеспечивают защиту как при прямом, так и при косвенном прикосновениях.

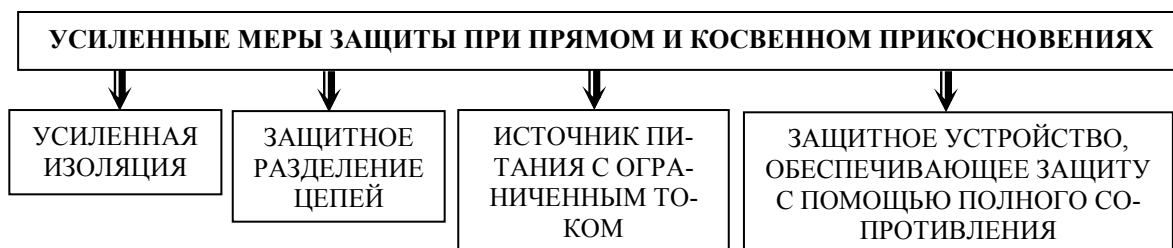


Рис. 3.1. Усиленные меры защиты

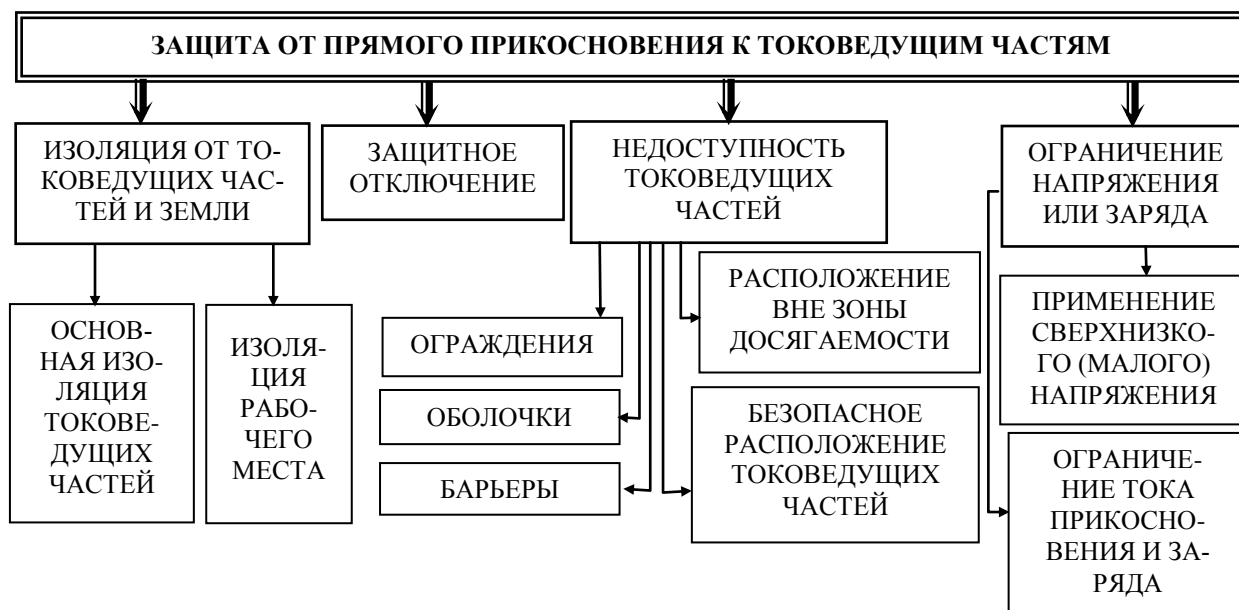


Рис. 3.2. Средства защиты от прямого прикосновения



Рис. 3.3. Средства защиты при непрямом (косвенном) прикосновении

Защита от косвенного прикосновения обеспечивается следующими мерами: применением *основной защиты*, которая обеспечивает защиту от поражения электрическим током в нормальном режиме работы, и *дополнительной защиты*, которая обеспечивает защиту от поражения электрическим током в случае отказа основной защиты.

Технические средства обеспечивают электробезопасность людей следующими путями:

- исключением (или уменьшением вероятности) прикосновения к токоведущим частям вообще или к только находящимся под рабочим напряжением;
- исключением возможности (уменьшением вероятности) выноса рабочего напряжения сети на нетоковедущие части;
- уменьшением напряжения прикосновения;
- уменьшением длительности протекания через тело человека опасного по силе тока.

4. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для электроустановок напряжением до 1 кВ приняты следующие обозначения систем, которые уже предусматривают использование технических средств обеспечения электробезопасности (дополнительной защиты):

- IT – система, в которой нейтраль источника питания изолирована от земли или заземлена через приборы или устройства, имеющие большое сопротивление, а открытые проводящие части электрооборудования заземлены;
- TN – система, в которой нейтраль источника питания глухозаземлённая, а открытые проводящие части электрооборудования присоединены к нейтрали источника посредством нулевых защитных проводников;
- TN–C – система TN, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники совмещены в одном проводнике на всем её протяжении;
- TN–S – система TN, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники разделены на всем её протяжении;
- TN–C–S – система TN, в которой функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников совмещены в одном проводнике в какой-то её части, начиная от источника питания;
- TT – система, в которой нейтраль источника питания глухозаземлённая, а открытые проводящие части электрооборудования заземлены при помощи заземляющего устройства, электрически независимого от глухозаземлённой нейтрали источника.

На рис. 4.1 приведены виды трёхфазных сетей и систем питания током промышленной частоты, поясняющие ранее приведённые обозначения.

В соответствии с Международной системой классификации электрических сетей первая буква здесь обозначает состояние нейтрали источника питания относительно земли (Т – заземленная нейтраль; I – изолированная нейтраль), а вторая буква – состояние открытых проводящих частей относительно земли или нейтрали (Т – проводящие части заземлены, N – проводящие части присоединены к глухозаземленной нейтрали источника питания).

Последующие (после N) буквы означают совмещение в одном проводнике или разделение функций нулевого рабочего и нулевого защитного проводников: S – нулевой рабочий (N) и нулевой защитный (PE) проводники разделены; C – функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников совмещены в одном проводнике (PEN-проводнике).

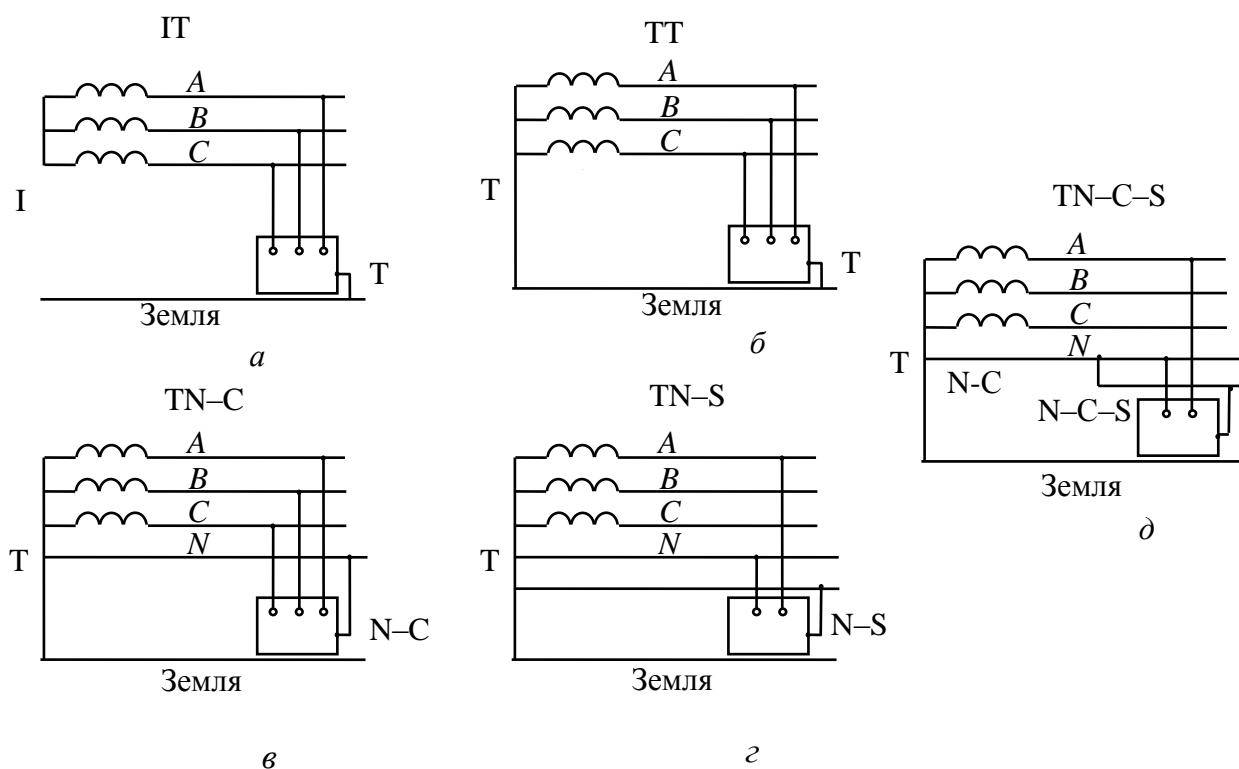


Рис. 4.1. Классификация электрических сетей и систем:

а – сеть с изолированной нейтралью и использованием заземления корпуса; *б* – сеть с глухозаземлённой нейтралью и использованием заземления корпуса; *в* – сеть с глухозаземлённой нейтралью и использованием зануления корпуса на рабочий нулевой провод; *г* – сеть с глухозаземлённой нейтралью и использованием заземления корпуса на защитный нулевой провод; *д* – сеть с глухозаземлённой нейтралью и использованием заземления корпуса на защитный нулевой провод, соединённый с рабочим нулевым проводом

Электроустановки напряжением до 1 кВ жилых, общественных и промышленных зданий и наружных установок получают питание, как правило, от источника с глухозаземлённой нейтралью с применением системы TN. Условия безопасности человека при прямом прикосновении в такой системе в определяются преимущественно сопротивлением рабочего заземления нейтрали R_0 , которое значительно меньше сопротивлений изоляции фазных и нулевого проводов относительно земли, и практически не зависят от сопротивлений и ёмкостей фаз относительно земли (рис. 4.2). Основная часть тока через тело человека в СГЗН в неаварийном режиме её работы протекает по пути “фаза – человек – земля – рабочее заземление – нейтраль источника электроэнергии”, тогда как другие пути тока, как правило, малозначимы.

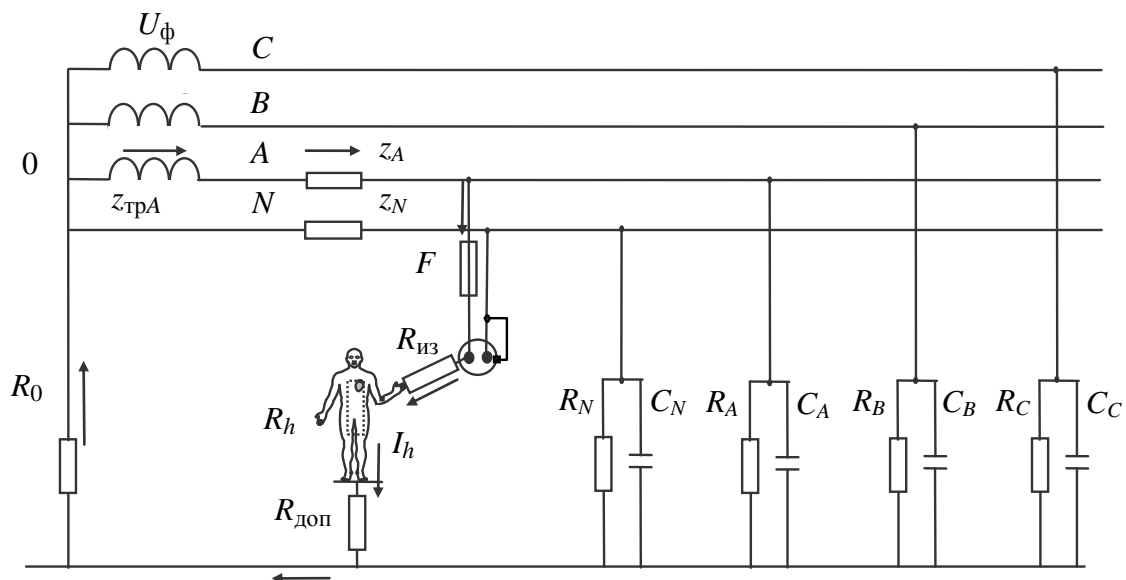


Рис 4.2. Схема для анализа безопасности человека в системе TN

Ток I_h , протекающий по телу человека при прямом прикосновении к сети с заземлённой нейтралью, в основном определяется фазным напряжением сети $\dot{U}_{\phi A}$ и сопротивлениями на его пути: трансформатора $z_{\text{тр}A}$, фазного провода $z_{\phi A}$, изоляции между токоведущей частью и рукой человека $R_{\text{из}}$, самого человека R_h , пола $R_{\text{доп}}$, на котором человек стоит, и рабочего заземления R_0 :

$$I_h = \frac{\dot{U}_{\phi A}}{z_{\text{тр}A} + z_{\phi A} + R_{\text{из}} + R_h + R_{\text{доп}} + R_0} \approx \frac{\dot{U}_{\phi A}}{R_{\text{из}} + R_h + R_{\text{доп}}}.$$

В табл. 4.1 приведены условия, при которых токи через тело человека могут быть ограничены до предельных в нормальном режиме и в аварийных режимах для бытовых и производственных электроустановок дополнительным сопротивлением пола, а также достигать порогового неотпускающего и фибрилляционного токов при фазном напряжении 220 В. Аналогично можно создать условия изоляции человека от токоведущей части.

Таблица 4.1

Ток I_h , мА	$R_{\text{доп}}$, Ом	Вид пола	Ток I_h , мА	$R_{\text{доп}}$, Ом	Вид пола
0.3	730 000	Сухой паркет	15.0	13 000	Сухие земля или цемент
2.0	105 000	То же влажный	100.0	1 200	Влажные земля или мрамор
6.0	37 000	Сухой мрамор	—	—	—

Питание электроустановок напряжением до 1 кВ переменного тока от источника с изолированной нейтралью (системы IT) выполняется, как правило, при недопустимости перерыва питания при первом замыкании на землю или на открытые проводящие части, связанные с землёй, а также при повышенной вероятности контакта людей с токоведущими частями.

Основными достоинствами СИИН являются:

- повышенная надёжность электроснабжения, связанная с отсутствием перерыва питания при первом замыкании на землю;
- повышенные условия пожаробезопасности, связанные с ограничивающим силу тока замыкания на землю действием сопротивления электрической изоляции сети относительно земли;
- меньшая опасность поражения электрическим током при однофазном прикосновении человека как к корпусам электроустановок с повреждённой изоляцией, так и непосредственно к токоведущим частям.

Ток, протекающий через тело человека, и напряжение однофазного прямого прикосновения в данном случае зависят от сопротивления и от ёмкости фаз относительно земли (рис. 4.3).

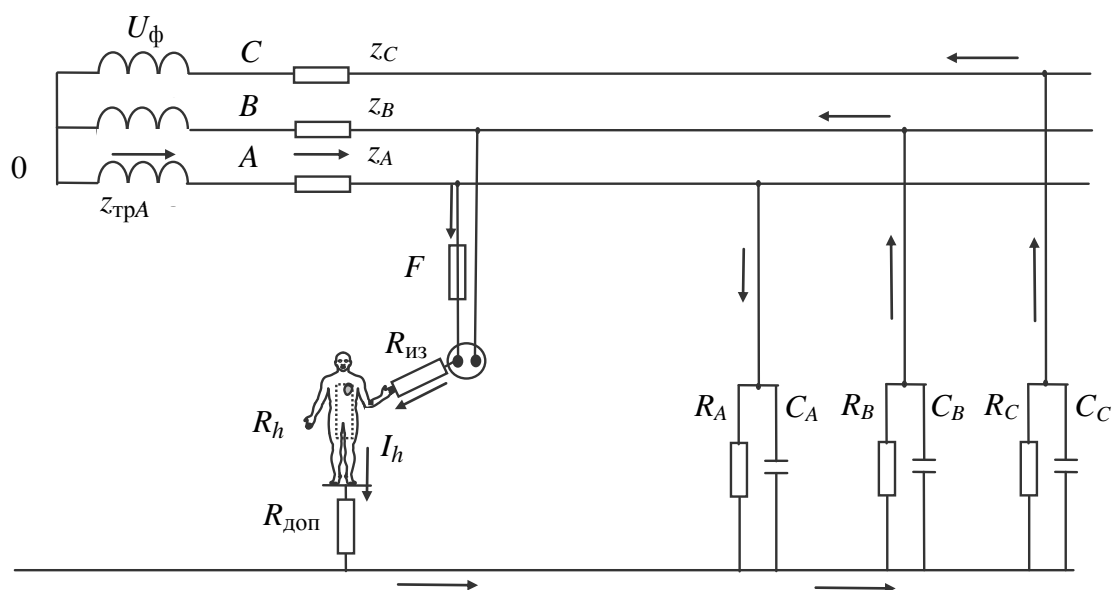


Рис 4.3. Схема для анализа безопасности человека в системе IT

В случае однофазного прикосновения человека к токоведущим частям в сети с изолированной нейтралью ток, протекающий через тело человека, кроме этого зависит также и от сопротивлений изоляции тела человека от токоведущей части, самого человека и дополнительного сопротивления пола:

$$I_h = \frac{U_\phi}{2(R_{из} + R_h + R_{доп})} \sqrt{\frac{9(\frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C})^2 + [\sqrt{3}(\frac{1}{R_B} - \frac{1}{R_C}) + 6\omega C_\phi]^2}{(\frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_{из} + R_h + R_{доп}})^2 + 9\omega^2 C_\phi^2}}.$$

где U_ϕ – фазное напряжение; R_A, R_B, R_C – активные сопротивления, Ом;
 C_ϕ – ёмкость фаз относительно земли, Ф, $\omega = 314 \text{ с}^{-1}$.

Ток I_h можно ограничить, либо увеличив сопротивления и уменьшив ёмкость фаз по отношению к земле, либо так же, как и для системы TN, создав дополнительное сопротивление на пути тока за счёт дополнительной изоляции пола или изоляции тела человека от проводящей части (на чём строятся некоторые системы защиты от прямого прикосновения).

5. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИЁМНИКОВ ПО СТЕПЕНИ ЗАЩИТЫ

Электротехнические, радиотехнические, электронные и другие изделия, подключаемые к электрическим сетям, с точки зрения защиты от поражения электрическим током могут иметь различные классы защит. Согласно ГОСТ 12.2.007.0-75* таких классов защит пять: 0; 0I; I; II и III.

Согласно ГОСТ Р МЭК 60536–2–2001 электрооборудование в зависимости от заложенных в его конструкцию мер защиты разделено на четыре класса защит от поражения электрическим током – 0, I, II и III. Описание классов защит и их краткие характеристики приведены в табл. 5.1.

К классу 0 должны относиться изделия, имеющие по крайней мере рабочую изоляцию и не имеющие элементов для заземления, если эти изделия не отнесены к классам II или III.

К классу 0I должны относиться изделия, имеющие по крайней мере рабочую изоляцию, элемент для заземления и провод без заземляющей жилы для присоединения к источнику питания. К классу I должны относиться изделия, имеющие по крайней мере рабочую изоляцию и элемент для заземления. Если изделие класса I имеет провод для присоединения к источнику питания, этот провод должен иметь заземляющую жилу и вилку с заземляющим контактом. К классу II должны относиться изделия, имеющие двойную или усиленную изоляции.

Таблица 5.1

Характеристика	Класс защиты			
	0	I	II	III
Описание класса	Только основная изоляция	Проводящая защитная оболочка и элемент заземления	Двойная изоляция	Питание БСНН (≤ 50 В переменного или ≤ 120 В постоянного токов)
Маркировка	Нет	Защитный зажим – знак  , буквы PE	Знак 	Знак 
Основная защита	Основная изоляция			Ограничение напряжения
Дополнительная защита	Нет	Защитное соединение	Дополнительная изоляция	Нет
Назначение защиты	При косвенном прикосновении			От прямого и косвенного прикосновений
Условия применения электрооборудования в электроустановке	1. Применение в непроводящих помещениях 2. Питание от вторичной обмотки разделительного трансформатора только одного электроприёмника	Присоединение заземляющего зажима электрооборудования к защитному проводнику электроустановки	Независимо от мер защиты, принятых в электроустановке	Питание от безопасного разделительного трансформатора
Дополнительная защита для электроустановки	Непроводящая (изолирующая) среда Электрическое разделение цепей (защитное разделение) – только для одной единицы оборудования	Автоматическое отключение питания (заземляющий защитный проводник + защитное устройство)	Нет	Защитное разделение от других сетей, кроме БСНН и ЗСНН
Принцип защиты	Уменьшение силы тока	Уменьшение времени действия тока	Уменьшение силы тока	

К классу III следует относить изделия, предназначенные для работы при безопасном сверхнизком напряжении, не имеющие ни внешних, ни внутренних электрических цепей, работающих при другом напряжении. Следует упомянуть, что выражение “безопасное сверхнизкое напряжение” не соответствует тем критериям безопасности, которые определены в нормативных документах, а предполагает, что напряжение прикосновения к таким цепям не окажется выше предельно допустимого (с учётом приемлемого риска).

Изделия, получающие питание от внешнего источника, могут быть отнесены к классу III только в том случае, если они присоединены непосредственно к источнику питания, преобразующему более высокое напряжение, что осуществляется посредством разделительного трансформатора или преобразователя с отдельными обмотками. При использовании в качестве источника питания разделительного трансформатора или преобразователя его входная и выходная обмотки не должны быть электрически связаны и между ними должны быть двойная или усиленная изоляции.

Изделия класса 0 МЭК в дальнейшем планирует исключить, как опасные, однако в данный момент они используются и, поэтому приведены в табл. 5.1.

6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАЛЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПИТАНИЯ

Самым очевидным техническим средством обеспечения электробезопасности является применение в электроустановках безопасно низких рабочих напряжений. В условиях невозможности (или нецелесообразности) исключить контакт человека с токоведущими частями и предусмотреть какие-либо меры по снижению опасности такого контакта применение безопасного сверхнизкого напряжения является единственно возможным.

Питание может обеспечиваться системами безопасного сверхнизкого напряжения БСНН, в которых согласно ГОСТ 30331.3/ГОСТ Р 50571.3 напряжение не может превышать сверхнизкого напряжения в нормальных условиях и при наличии неисправности, включая неисправности заземления в других цепях, или защитного сверхнизкого напряжения ЗСНН, в которой напряжение не может превышать сверхнизкого напряжения в нормальных условиях и при наличии неисправности, за исключением неисправности заземления в других цепях. Функционирование электроустановок в системе БСНН далеко не всегда бывает целесообразно по техническим и экономическим соображениям. Однако повышение рабочего напряжения предполагает и проведение соответствующих защитных мероприятий.

Ограничение напряжения источника питания до 50 В промышленной частоты и 120 В на постоянном токе (использование электроустановок III класса защиты) считается одним из основных средств обеспечения электробезопасности и значительно снижает риск поражения электрическим током, хотя и не обеспечивает указанную безопасность полностью (случаи смер-

тельного поражения электрическим током отмечались и при 12 В). При нормальных условиях даже в помещении повышенной опасности поражения электрическим током однофазное или однополюсное прикосновение может вызвать ток в человеке, как правило, меньше порогового неотпускающего тока. Если электроприёмник подключается к сети 220 В, он должен иметь промежуточный разделительный трансформатор (рис. 6.1), уменьшающий напряжение до требуемого значения (понижающий трансформатор с функцией понижения напряжения, к примеру, до 36 В).

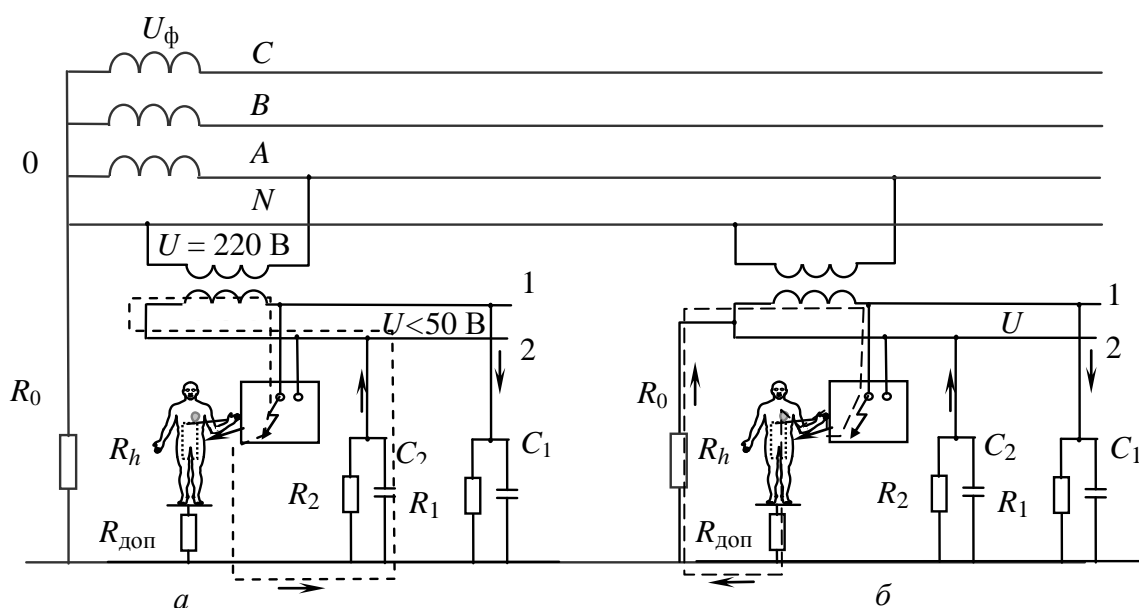


Рис 6.1. Схема для анализа безопасности человека в системе TN при использовании понижающих трансформаторов, в которых один полюс вторичной обмотки:
а – изолирован от земли, б – заземлён

При нормальных условиях даже в помещении повышенной опасности поражения электрическим током однофазное или однополюсное прикосновение может вызвать ток в человеке, как правило, меньше порогового неотпускающего тока.

Для однофазного источника питания и двухпроводной сети, полюса которых изолированы от земли (рис. 6.1, а), при прикосновении человека к одному из полюсов напряжение между полюсом и землёй зависит от проводимостей $\dot{Y}_1 = 1/R_1 + j\omega C_1$ и $\dot{Y}_2 = 1/R_2 + j\omega C_2$ и выражается формулой

$$\dot{U}_{13} = U \frac{\dot{Y}_2}{\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + 1/(R_h + R_{\text{доп}})}.$$

При одинаковых проводимостях $Y_1 = Y_2$ это напряжение не превышает половины рабочего напряжения на вторичной стороне трансформатора, то есть для системы БСНН не может быть более 25 В. С учётом того, что сопротивление человека при данном напряжении составляет от 1750 до 6100 Ом, ток, протекающий через тело человека в условиях особой опасности (полное отсутствие $R_{\text{доп}}$), не превысит 14...4 мА. Если проводимости высокие, для части людей, имеющих небольшое сопротивление тела, это повышенный риск. Однако реально такие проводимости не более 10^{-4} См (сопротивление относительно земли не менее 10 000 Ом), и напряжение относительно земли в данном случае не превысит 7...10 В, а ток через человека, соответственно, 4...2 мА (при этом человек чувствует сильное дрожание пальцев или небольшие судороги в руках).

Для трансформатора, один полюс которого заземлён (рис. 6.1, б), при прикосновении человека к другому полюсу напряжение между полюсом и землёй практически не зависит от проводимостей и выражается формулой

$$U_{13} = U \frac{1/R_0}{1/R_0 + 1/(R_h + R_{\text{доп}})} = U \frac{R_h + R_{\text{доп}}}{R_0 + R_h + R_{\text{доп}}} \approx U.$$

При этом ток, протекающий через тело человека в условиях особой опасности, может увеличиться до 28...8 мА, что не соответствует нормативному ограничению 6 мА для производственных и 2 мА для бытовых условий при длительности воздействия более 1 с и представляет определённую опасность для человека, хотя рекомендации МЭК допускают такую ситуацию.

Согласно ПУЭ, если наибольшее рабочее напряжение не превышает 25 В переменного или 60 В постоянного токов в помещениях без повышенной опасности и 6 В переменного или 15 В постоянного токов во всех других случаях, то не требуется принимать мер защиты от прямого прикосновения, если электрооборудование находится в зоне системы уравнивания потенциалов.

Защиту при косвенном прикосновении следует применять во всех случаях, если напряжение в электроустановке превышает 50 В переменного и 120 В постоянного токов. В помещениях с повышенной опасностью, особо опасных и в наружных установках применение защиты при косвенном прикосновении может потребоваться при более низких напряжениях, например, 25 В переменного и 60 В постоянного токов или 12 В переменного и 30 В постоянного токов при наличии требований соответствующих разделов ПУЭ.

Соответственно, при меньших рабочих напряжениях требуется только защита от прямого прикосновения с помощью ограждений или оболочек, а также применение при необходимости усиленной изоляции.

7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕДОСТУПНОСТИ ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ

Действующие правила безопасности обязывают применять защиту от прямого прикосновения только при напряжении выше БСНН, однако для минимизации риска следует считать её применение желательным и при меньших напряжениях. Основой безопасной эксплуатации электроустановок, содержащих опасные для прикосновения человека токоведущие части, является обеспечение недоступности этих токоведущих частей. Наиболее наглядными примерами являются оголённые провода линий электропередач, висящие высоко над землёй, или электрическая розетка, в которую включается вилка электрического оборудования, например утюга. В первом случае слишком высоко, чтобы достать до токоведущих частей, во втором – имеются слишком маленькие отверстия, чтобы коснуться пальцем оголённого провода.

Способ реализации принципа недоступности зависит от параметров электроустановки, особенностей её применения и условий окружающей среды. В первую очередь недоступность обеспечивается нанесением на токоведущие части слоя электрической изоляции (основная изоляция), которая должна покрывать токоведущие части и выдерживать все возможные воздействия в процессе эксплуатации электрооборудования и сети. Удаление изоляции должно быть возможно только путём её разрушения.

Согласно п. 1.7.70 ПУЭ, если применение твёрдой основной изоляции невозможно или экономически нецелесообразно и основная изоляция обеспечивается воздушными промежутками, защита от прямого прикосновения к токоведущим частям или приближения к ним на опасное расстояние (в том числе в электроустановках напряжением выше 1 кВ) должна быть выполнена посредством оболочек, ограждений, барьеров или размещением вне зоны досягаемости (рис. 7.1).

Расположение открытых токоведущих частей сразу за границами зон досягаемости позволяет защитить квалифицированный электротехнический персонал от случайного прикосновения. Внутри производственных и (особенно) бытовых помещений необходимо располагать открытые токоведущие части на бóльшей высоте, так как при переноске длинномерных металличе-

ских предметов (например, лестниц, труб) или ремонтах возможны случайные (а иногда и намеренные) прикосновения.

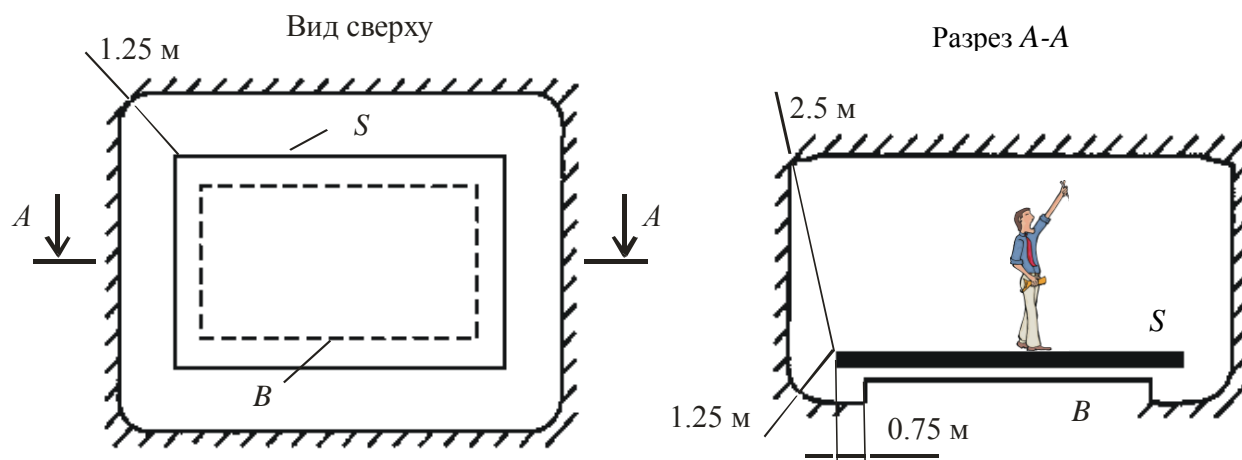


Рис. 7.1. Зона досягаемости в электроустановках до 1 кВ:

S – поверхность, на которой может находиться человек; B – граница зоны досягаемости токоведущих частей рукой человека, находящегося на поверхности S ;
0.75; 1.25; 2.50 м – расстояния от края поверхности S до границы зоны досягаемости

Ограждения и оболочки (корпуса устройств) – основное средство обеспечения недоступности токоведущих частей устройств в условиях, когда периодически требуется обеспечить доступ человека к расположенным внутри токоведущим частям, не разрушая изоляционные покрытия. Оболочки должны соединяться с основными частями изделия в единую конструкцию, закрывать опасную зону и сниматься только при помощи инструмента.








В соответствии с ГОСТ 14254-96 ограждения или оболочки должны исключать доступ к опасным токоведущим частям за счёт выбора степени защиты от поражения электрическим током. *Степень защиты* – способ защиты, обеспечиваемый оболочкой, от доступа к опасным частям, попадания внешних твёрдых предметов и воды указывается кодом IP.

В табл. 7.1 приведено краткое описание элементов кода IP.

Выбор необходимой степени защиты осуществляется в зависимости от ожидаемых условий эксплуатации электрооборудования и квалификации пользователей. Так, для оборудования научных лабораторий обычно вполне достаточно оболочек со степенью защиты IP20. Если же оборудование предназначено для размещения на открытом пространстве и к нему возможен доступ посторонних лиц, то степень защиты потребуется не ниже IP44. Оборуду-

дование, предназначенное для работы в условиях воздействия паров химических веществ, разрушающе действующих на токоведущие части и электрическую изоляцию, может потребовать оболочку со степенью защиты вплоть до IP67.

Таблица 7.1

Цифры или буквы кода IP		Графическое обозначение	Значение для защиты оборудования	Значение для защиты людей
Первая характеристическая цифра			<i>От проникновения внешних твёрдых предметов:</i>	<i>От доступа к опасным частям</i>
	0	—	Нет защиты	Нет защиты
	1	—	Диаметром ≥ 50 мм	Тыльной стороной руки
	2	—	То же ≥ 12.5 мм	Пальцем
	3	—	— « — ≥ 2.5 мм	Инструментом
	4	—	— « — ≥ 1.0 мм	Проволокой
	5		Пылезащищенное	То же
	6		Пыленепроницаемое	— « —
Вторая характеристическая цифра			<i>От проникновения воды</i>	—
	0	—	Нет защиты	—
	1	—	Вертикальное каплепадение	—
	2		Каплепадение (номинальный угол 15°)	—
	3		Дождевание	—
	4		Сплошное обрызгивание	—
	5		Действие струи	—
	6	—	Сильное действие струи	—
	7		Временное непродолжительное погружение	—
	8	—	Длительное погружение	—
Дополнительная буква (при необходимости)				<i>От доступа к опасным частям</i>
	A	—	—	Тыльной стороной руки
	B	—	—	Пальцем
	C	—	—	Инструментом
	D	—	—	Проволокой

Первая характеристическая цифра указывает, что оболочка обеспечивает:

- защиту людей от доступа к опасным частям, предотвращающую либо ограничивающую проникновение какой-либо части человеческого тела или предмета, находящегося в руках у человека;

- и одновременную защиту оборудования, находящегося внутри оболочки, от проникновения внешних твёрдых предметов.

Вторая характеристическая цифра обозначает степень защиты, обеспечиваемую оболочками в отношении вредного воздействия на оборудование в результате проникновения воды.

Дополнительная буква обозначает степень защиты людей от доступа к опасным частям; она используется только при условии, что действительная защита от доступа к опасным частям выше защиты, указанной первой характеристической цифрой (например, более высокая степень защиты может быть обеспечена путём установки ограждений, специальной формой отверстий либо за счёт расстояний внутри оболочки.)

Вспомогательная буква (при необходимости) (Н, М, S) означает вспомогательную информацию, относящуюся: Н – к высоковольтным аппаратам, М – к состоянию движения во время испытаний защиты от воды, S – к состоянию неподвижности во время испытаний защиты от воды.

При отсутствии необходимости в нормировании характеристической цифры её заменяют буквой X.

8. ИЗОЛЯЦИЯ ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ И ЕЁ КОНТРОЛЬ

Надлежащая электрическая изоляция является одной из важнейших основных защит в электроустановках и электрооборудовании. Она предназначена для снижения токов между токоведущими частями и землёй или корпусом электрооборудования. Сопротивление изоляции фаз относительно земли, которое во многом определяет условия безопасности в СИН, зависит от температуры, влажности, способа прокладки проводов (кабель или воздушная линия электропередач), их протяжённости, технического состояния, условий и времени эксплуатации и может изменяться от 0.5...1 кОм (например, при питании устройств с водоохлаждаемыми токоподводами) до 1...10 МОм (короткие сети для индивидуального питания двигателей, вентиляторов или источников света). Новое оборудование при его установке должно иметь сопротивление изоляции проводов относительно земли не менее 1...5 МОм, двигатели и реле – 10 МОм. Сопротивление изоляции нового кабеля должно составлять не менее 100 МОм/км. С увеличением протяжённости линии и количества подключённых к ней потребителей общее сопротивление фазы (или полюса) относительно земли уменьшается, а проводимость,

соответственно, увеличивается, предоставляя тем самым большую возможность току (току утечки) протекать между фазами и землёй. В результате сеть с изолированной нейтралью может по условиям опасности при прямом прикосновении приближаться к сети с глухозаземлённой нейтралью.

В устройствах I класса защиты основная защита от поражения электрическим током обеспечивается *основной электрической изоляцией* токоведущих частей от токопроводящего корпуса. Она рассчитывается на то, чтобы при касании этого корпуса в любых условиях ток, протекающий через тело человека, не превышал в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.038–84 0.3 мА (0.1 мА при влажности более 75 % и температуре окружающей среды более 25 °С) для промышленной частоты 50 Гц. Разделив рабочее напряжение питания на этот ток, можно приблизительно найти минимально требуемое сопротивление изоляции (около 0.7...2 МОм для напряжения 220 В).

Кроме требования ограничения силы тока утечки выбор изоляции для изделия в целом или его частей определяется в зависимости от требований к нагревостойкости, напряжения электрической сети, заданного срока службы, а также климатических факторов внешней среды. Если недоступность токоведущих частей обеспечивается за счёт электрической изоляции, то в процессе эксплуатации в условиях агрессивной внешней среды, механических воздействий на изоляцию защита в любой момент может стать неэффективной.

Покрытие токоведущих частей изделий лаком, эмалью или аналогичными материалами не является достаточным для защиты от поражения при непосредственном прикосновении к этим частям и для защиты от переброса электрической дуги от токоведущих частей изделия на другие металлические части (кроме тех случаев, когда применяемые для покрытия материалы специально предназначены для создания такой защиты).

Со временем электрическая изоляция ухудшается, теряя свои свойства и достигая критического значения, при котором эксплуатация электроустановки или электрооборудования будет осуществляться с повышенным риском. С этого времени необходимо отбраковывать изделие или электроустановку или проводить ремонт электрической изоляции, при котором время её работы можно повысить (рис. 8.1). Зная постоянную времени τ , можно прогнозировать наступление такого момента.

В связи с тем, что в процессе эксплуатации изоляция электрозащитных средств, как и основная изоляция электроустановок, подвергается неблаго-

приятным климатическим, механическим и другим воздействиям, исправность изделий должна периодически проверяться, и тем чаще, чем выше вероятность повреждений в реальных условиях применения (рис. 8.2).

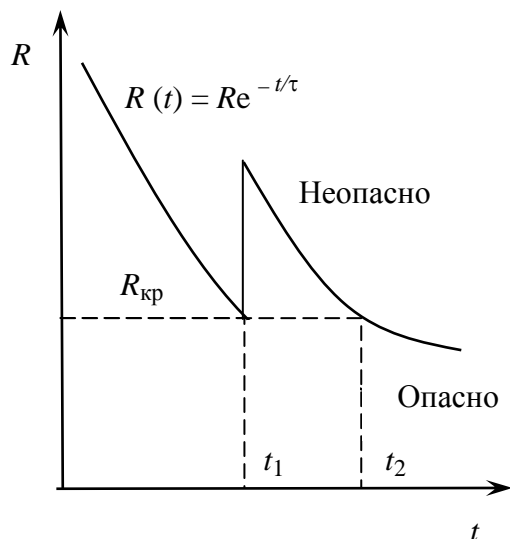


Рис. 8.1. Качественные зависимости сопротивления изоляции от времени при ремонте изоляции

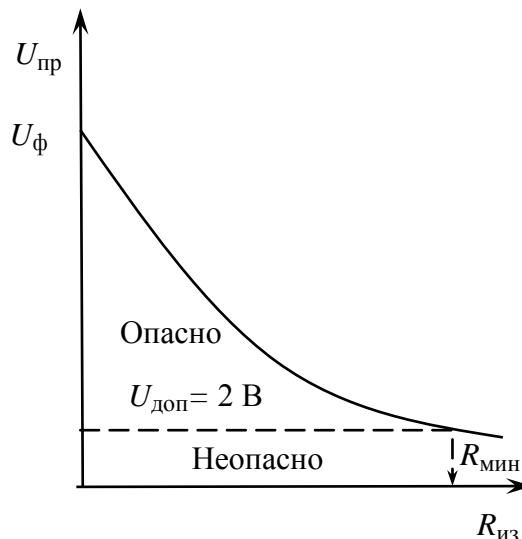


Рис. 8.2. Минимально необходимое сопротивление изоляции электрозащитных средств в установках до 1 кВ

Контроль изоляции – это профилактическое мероприятие, направленное на выявление неисправности электрической изоляции, предупреждение аварийных ситуаций, ведущих к поражению людей электрическим током и пожарам, а также на надёжность функционирования электроустановок, систем их управления и контроля. Он производится с целью своевременного выявления фактов снижения текущего значения сопротивления изоляции, замыканий на землю или на корпус электроприёмника. Измерение сопротивления изоляции между токоведущими частями, а также относительно земли или корпуса электроустановки при снятом рабочем напряжении, регулярно выполняется при техническом обслуживании, перед включением электрооборудования под рабочее напряжение после ремонтных работ, при поиске мест повреждений электрической изоляции и пр.

Контроль изоляции осуществляется непрерывно с применением автоматических устройств либо периодическими измерениями мегомметром.

Мегомметры работают на методе наложения измерительного напряжения постоянного тока, что позволяет отстроиться от влияния на результат измерений емкостных связей между токоведущими частями и землёй.

В схеме любого мегомметра содержатся последовательно соединённые источник измерительного напряжения $U_{изм}$, измеритель тока mA (с цифровой или со стрелочной индикацией) и ограничительный резистор $R_{доб}$. Эта цепь подключается к измеряемому сопротивлению изоляции (рис. 8.3).

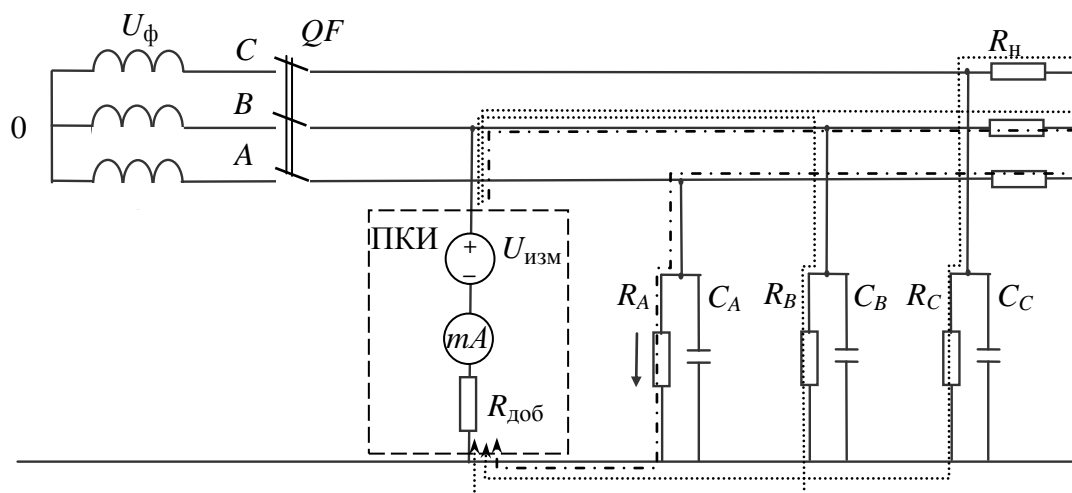


Рис. 8.3. Схема измерения эквивалентного сопротивления изоляции относительно земли с помощью прибора контроля изоляции (ПКИ) или мегомметра

Ток в измерительной цепи $I_{изм} = U_{изм} / (R_{вн} + R)$, где $R_{вн}$ – внутреннее сопротивление мегомметра (микроамперметра, источника измерительного напряжения и ограничительного резистора), R – измеряемое сопротивление изоляции. При постоянстве $U_{изм}$ и $R_{вн}$ ток $I_{изм}$ является однозначной функцией сопротивления изоляции, и поэтому прибор градуируется в мегаомах или килоомах.

Под действием рабочего напряжения может происходить электрический пробой недопустимо уменьшившихся воздушных зазоров между токопроводящими частями, пробой через слои поверхностного загрязнения или участки локального разрушения изоляционных конструкций, которые при малых напряжениях ещё сохраняют диэлектрические свойства. Чтобы было можно оценить поведение электрической изоляции в рабочем режиме, значение измерительного напряжения должно быть соизмеримо с рабочим напряжением сети, в которой будет работать контролируемая электроустановка.

Достаточно большие значения измерительного напряжения представляют опасность для жизни человека. Электротравмы при пользовании ме-

гомметром исключаются ограничительным сопротивлением $R_{\text{доб}}$, не позволяющим измерительному току даже в режиме короткого замыкания превышать значение порогового ощутимого тока (в мегомметрах напряжением 500 В $R_{\text{доб}}$ составляет 500 кОм).

Если внезапное повреждение изоляции способно вызвать существенное ухудшение условий электро- и пожаробезопасности, а также надёжности электроснабжения электроустановок, контроль сопротивления изоляции производится в электрической сети непрерывно. Разные модификации устройств контроля могут обеспечивать функции измерения текущего значения эквивалентного сопротивления изоляции и/или сигнализации об его отклонении от нормативного значения.

Способы получения информации о состоянии изоляции зависят от рода тока в контролируемой сети. Существуют устройства, предназначенные для работы в обесточенной сети, в сети постоянного тока, в сети переменного тока и в сетях двойного или тройного рода токов.

В сети двойного рода тока эквивалентное сопротивление изоляции зависит от пяти составляющих, три из которых находятся под действием переменного напряжения на стороне 50 Гц (сопротивления изоляции фаз относительно земли), две – под действием выпрямленного напряжения (сопротивления изоляции полюсов относительно земли R_1 и R_2), а в сети тройного рода тока – от семи составляющих: кроме первых двух ещё и от сопротивлений изоляции полюсов на стороне высокочастотного тока (рис. 8.4).

Несимметрия состояний изоляции полюсов на стороне постоянного тока в сети двойного рода тока приводит к появлению на стороне переменного тока постоянной составляющей напряжения фаз относительно земли:

$$U_{\text{п}} = \frac{3\sqrt{3}U_m}{2\pi} \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \frac{R_{\sim}}{R_{\sim} + R_{\sim}},$$

где U_m – амплитуда фазного напряжения; R_1 и R_2 – сопротивления изоляции полюсов постоянного тока; R_{\sim} и R_{\sim} – эквивалентные сопротивления изоляции цепей постоянного и переменного токов.

Появление в сети переменного тока постоянной составляющей напряжения фаз относительно земли приводит к недостоверной работе традиционных приборов контроля изоляции сетей переменного тока.

Помимо устройств, осуществляющих оценку состояния изоляции всей электрической сети, существуют устройства селективного контроля изоляции, позволяющие в разветвлённой сети обнаружить повреждённый фидер, определить место повреждения на трассе.

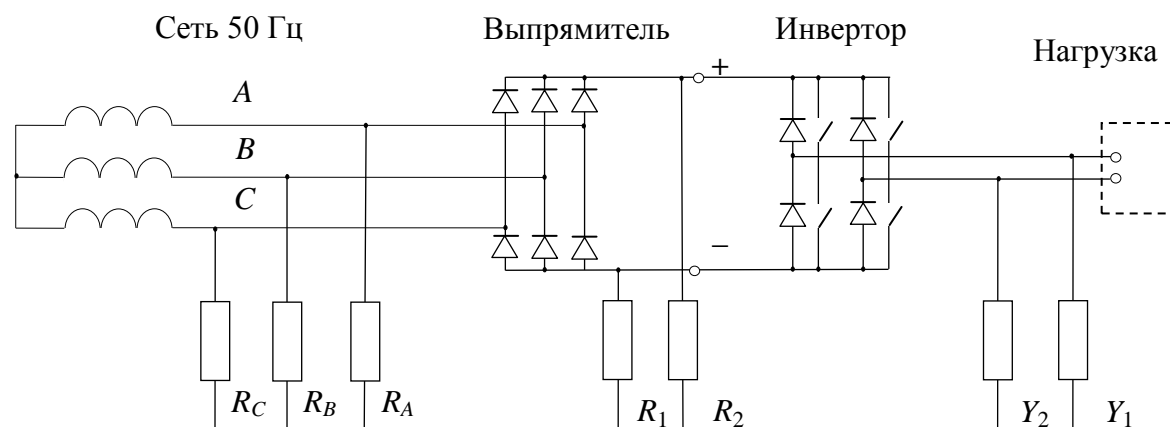


Рис. 8.4. Сеть тройного рода тока

Подробнее об основных принципах работы устройств контроля изоляции см. в книге Иванова Е. А. “Методы контроля изоляции судовых электроэнергетических систем”.

Двойная изоляция является одним из наиболее эффективных (хотя не самых дешёвых) дополнительных технических средств обеспечения электробезопасности. При её использовании доступные прикосновению части не приобретают опасного потенциала при повреждении только рабочей или только дополнительной изоляции. Оставшаяся неповреждённой ступень изоляции обеспечивает полноценную защиту от поражения током, позволяя выявить и устранить повреждение изоляции задолго до возникновения действительно опасной ситуации. На рис. 8.5 показан пример выполнения равноценной двойной изоляции – усиленной изоляции для электрического кабеля, хотя двойную изоляцию могут иметь различные электротехнические, радиотехнические и электронные изделия, включая ручной переносной электроинструмент и т. д.

Защита при помощи двойной или усиленной изоляции может быть обеспечена применением электрооборудования класса II или заключением электрооборудования, имеющего только основную изоляцию токоведущих частей, в изолирующую оболочку.

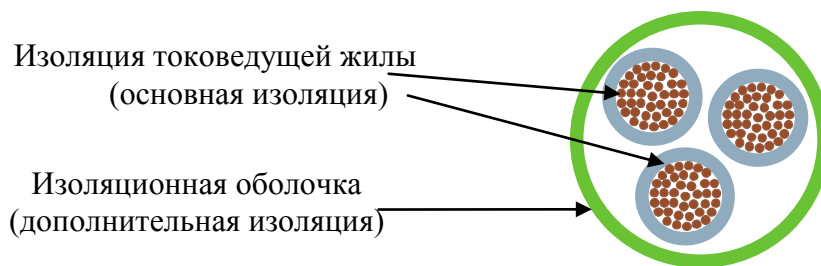


Рис. 8.5. Двойная (усиленная) изоляция кабеля

Изделия со сплошным корпусом из изоляционного материала, который включает все металлические детали за исключением мелких табличек, винтов, заклёпок, изолированных от узлов с опасным напряжением усиленной изоляцией, рассматривают как изделия с двойной изоляцией.

9. ЗАЩИТНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ

Защитное заземление является также основным из дополнительных средств и предназначено для защиты людей от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции.

Принципом его действия является ограничение напряжения на корпусе по отношению к земле и, следовательно, на человеке до допустимого значения при длительном прикосновении к корпусу, на которое произошло замыкание фазы. Защитное заземление – эффективное средство защиты от поражения электрическим током только в сетях, изолированных от земли. Если бы корпус не был заземлён, то человек мог бы оказаться под опасным напряжением в соответствии с распределением падений напряжения на плечах делителя напряжения, образованного полными (комплексными) сопротивлениями изоляции неповреждённых фаз сети и повреждённой фазы с подключённым параллельно ему сопротивлением человека (рис. 9.1, а).

При наличии защитного заземления, сопротивление которого много меньше сопротивлений изоляции и человека, сопротивление плеча делителя, относящегося к повреждённой фазе, становится несоизмеримо меньше сопротивлений плеч делителя, относящихся к другим фазам, поэтому рабочее напряжение сети практически полностью прикладывается к сопротивлению изоляции “здоровых” фаз, а напряжение повреждённой фазы относительно земли и, соответственно напряжение прикосновения, существенно уменьшаются (рис. 9.1, б).

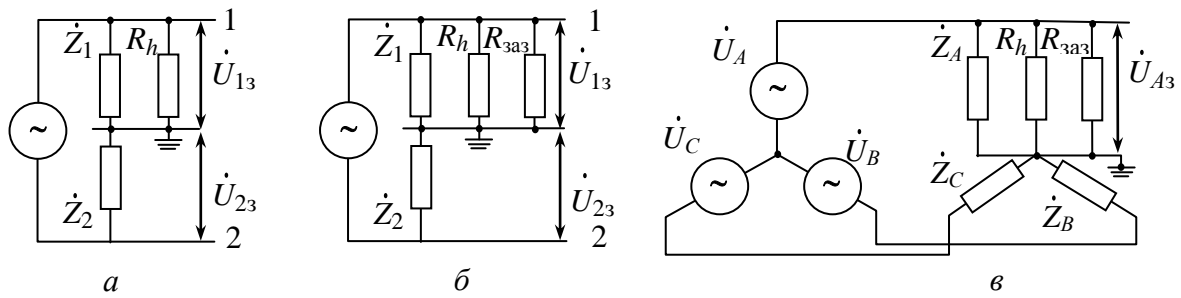


Рис. 9.1. Схемы замещения режима косвенного прикосновения в системе ИТ:

а – без заземления и *б* – с заземлением в однофазной сети;

в – с защитным заземлением в трёхфазной сети

Для однофазного источника питания и двухпроводной сети, полюса которых изолированы от земли (рис. 9.1, *б* и 9.2, *а*), при косвенном прикосновении человека к корпусу напряжение между ним и землёй

$$\dot{U}_{13} = U \frac{1/\dot{Z}_2}{1/\dot{Z}_1 + 1/\dot{Z}_2 + \frac{1}{R_h + R_{\text{доп}}} + \frac{1}{R_{\text{заз}}}} \approx U \frac{R_{\text{заз}}}{\dot{Z}_2}.$$

Для трёхфазной сети напряжение фазы *А* относительно земли U_{A3} при замыкании её на корпус (см. рис. 9.1, *в* и 9.2, *б*)

$$U_{A3} = \frac{U_{\phi}}{2} \sqrt{\frac{9\left(\frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C}\right)^2 + \left[\sqrt{3}\left(\frac{1}{R_B} - \frac{1}{R_C}\right) + 6\omega C_{\phi}\right]^2}{\left(\frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_{\text{заз}}}\right)^2 + 9\omega^2 C_{\phi}^2}}.$$

Для обеспечения эффективной защиты сопротивление защитного заземления должно быть много меньше активных и реактивных сопротивлений фаз относительно земли, а также много меньше сопротивления человека. Это сопротивление, на котором возникает напряжение от протекающего по нему тока замыкания, определяется суммой сопротивлений переходного контакта между корпусом и защитным проводником R_k (не должно превышать 0.1 Ом), сопротивления защитного проводника R_{PE} (в общем случае можно сделать сколь угодно малым из-за относительно малой протяжённости и удельного сопротивления проводника) и, наконец, сопротивления заземлителя R_3 , к которому подключается защитный проводник: $R_{\text{заз}} = R_k + R_{PE} + R_3$.

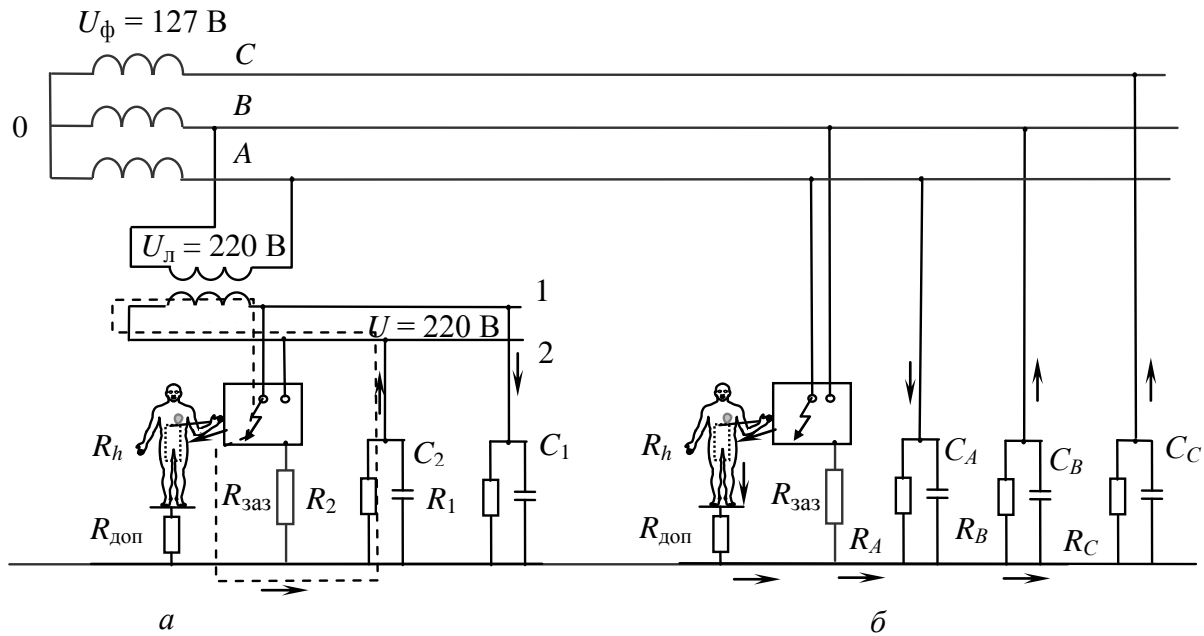


Рис. 9.2. Схема для анализа безопасности человека в системе ИТ при использовании защитного заземления электрооборудования класса I при питании:
а – от разделительного трансформатора; *б* – от трёхфазной сети

Сопротивление R_3 зависит от конструкции заземлителя, удельного сопротивления земли и в основном определяет общее сопротивление заземления. Наиболее часто используемые типы одиночных заземлителей и приближительные формулы для расчёта их сопротивления приведены в табл. 9.1. Из формул видно, что обеспечить допустимые значения сопротивления заземления (к примеру 4 или 10 Ом) непросто, поэтому заземлители являются сложными инженерными сооружениями, состоящими из группы параллельно включённых одиночных заземлителей (групповой заземлитель).

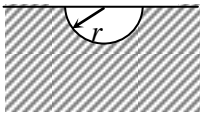
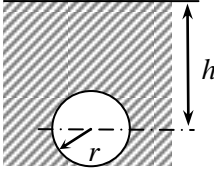
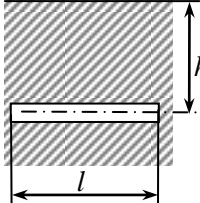
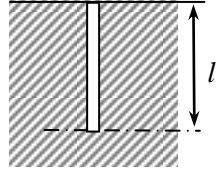
При реальном значении проводимости $Y_\phi = 10^{-5}$ См или сопротивлении фаз относительно земли 100 кОм напряжение на корпусе составляет 0.04 В при $U_\phi = 127$ В, т. е. неощутимо для человека.

Опасные ситуации при применении защитного заземления в сетях ИТ могут возникнуть только при появлении помимо замыкания фазы на заземлённый корпус еще замыкания другой фазы на землю, например фазы *В*, в результате чего напряжение на корпусе может достичь небезопасных значений

$$\dot{U}_{A3} \approx \sqrt{3}U_\phi \frac{R_{ззз}}{R_{ззз} + R_{зам}}.$$

В рассмотренном примере $U_{A3} = 20$ В при $R_{з\text{аз}} = 10$ Ом и сопротивлении замыкания фазы В $R_{з\text{ам}} = 100$ Ом.

Таблица 9.1

Характеристика заземлителя	Тип заземлителя			
	Полушаровой	Шаровой на глубине h	Стержень/труба диаметром d	Стержень диаметром d
Схема				
Расчётная формула R_3	$R_3 = \frac{\rho}{2\pi r}$	$R_3 = \frac{\rho}{4\pi r} \left(1 + \frac{r}{2h}\right)$	$R_3 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{d \cdot h}$	$R_3 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$
Значение R_3 , Ом при $r = h = l = 1$ м, $d = 0.1$ м, $\rho = 100$ Ом·м	16	12	37	59

Если в сети имеется другой заземлённый приёмник, в котором произошло замыкание другой фазы на корпус, то напряжения на обоих корпусах могут возрасти до половины линейного напряжения. Дополнительной защитой от таких случаев является контроль сопротивления изоляции фаз, поэтому обязательным условием в сети ИТ согласно ПУЭ является применение заземления в сочетании с одновременным контролем возможных замыканий фаз на землю (применением систем контроля изоляции).

Если выполнение защитного заземления представляется недостаточно надёжным, в частности, существует риск его обрыва при питании передвижных приёмников электрической энергии и ручных электрических машин класса I, защитное заземление применяется в сочетании с дополнительными защитными мероприятиями, например защитным отключением.

В качестве заземляющих устройств электроустановок в первую очередь используются следующие естественные заземлители:

1) металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений, находящиеся в соприкосновении с землёй, в том числе железобетонные фундаменты зданий и сооружений;

2) металлические трубы водопровода, проложенные в земле (кроме трубопроводов горючих жидкостей, горючих или взрывоопасных газов и смесей и трубопроводов канализации и центрального отопления);

3) металлические оболочки бронированных кабелей, проложенных в земле, и т. п.

Запрещается заземлять электроприёмники на элементы, электрически плохо связанные с землёй (батареи центрального отопления, водопроводные трубы в здании и т. д.). Падение напряжения на относительно большом сопротивлении заземления в этом случае будет также велико и не сможет обеспечить требуемое минимальное напряжение прикосновения при длительном касании повреждённого корпуса. Кроме того, появляется напряжение и на тех элементах, на которые электроприёмники заземлены.

Неэффективность применения защитного заземления в сети с глухозаземлённой нейтралью. В сети с глухозаземлённой нейтралью защитное заземление не эффективно, так как не обеспечивает снижения напряжения на корпусе до безопасного уровня, даже если его сделать хорошо и по всем правилам. Тем не менее, существуют системы типа ТТ, где оно применяется, но только совместно с другой дополнительной защитой, к примеру устройством защитного отключения.

При замыкании фазы на заземлённый корпус возникают два контура протекания тока замыкания. В контуре “фаза – корпус – сопротивление защитного заземления – сопротивления изоляции неповреждённых фаз – фазы” величина составляющей тока замыкания $I_{\text{зам}2}$ пренебрежимо мала по сравнению с составляющей $I_{\text{зам}1}$, протекающей по контуру “фаза – корпус – сопротивление защитного заземления – сопротивление заземления нейтрали – нейтраль источника”, имеющему как минимум в сотни раз меньшее сопротивление (рис. 9.3).

Появление контура протекания тока замыкания через сопротивление заземления нейтрали обуславливает возникновение отличных от сети ИТ эффектов при работе защитного заземления. В этом контуре фазное напряжение распределяется на примерно равных сопротивлениях $R_{\text{заз}}$ и R_0 , то есть напряжение между корпусом неисправного приёмника и землёй может уменьшиться всего примерно в два раза относительно фазного:

$$\dot{U}_{\text{Аз}} \approx U_{\text{ф}} \frac{R_{\text{заз}}}{R_{\text{заз}} + R_0}.$$

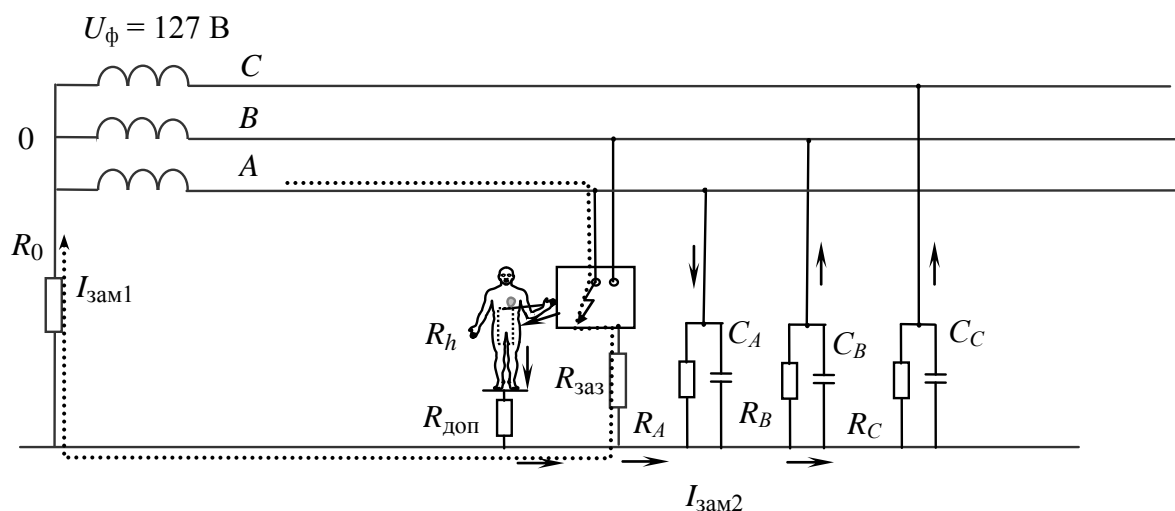


Рис. 9.3. Схема для анализа безопасности человека в системе ТТ при использовании защитного заземления электрооборудования класса I

Таким образом, условие ограничения напряжения при косвенном прикосновении не может быть выполнено. Защитное заземление корпуса, на который произошло замыкание фазы, хоть и позволяет уменьшить напряжение корпуса относительно земли, но в недостаточной степени для обеспечения электробезопасности, то есть действует неэффективно.

Длительность режима замыкания на заземлённый корпус определяется временем отключения автоматического выключателя или предохранителя. Из-за относительно больших сопротивлений защитного и рабочего заземлений только для слаботокового электроприбора с установленными предохранителями с уставками максимум на единицы ампер при замыкании на корпус можно надеяться, что в течение нескольких секунд произойдет их срабатывание. В более мощных электроприёмниках сила тока замыкания может и не превысить ток уставки максимальной токовой защиты, и тогда опасный режим будет существовать длительно, что недопустимо.

Особенности защитного заземления в высоковольтных установках.

В электроустановках напряжением выше 1 кВ сети с изолированной нейтралью сопротивление заземляющего устройства при прохождении расчётного тока замыкания на землю с учётом сопротивления естественных заземлителей по действующим правилам должно быть $R \leq 250/I$, но не более 10 Ом, где I – расчётный ток замыкания на землю. Соответственно, считается допустимым в аварийном режиме появление на корпусе электроприёмника относи-

тельно земли потенциала 250 В. Для снижения опасности поражения током в режимах замыкания фазы на заземлённый корпус используются “уравнивание” электрических потенциалов (в зоне обитания) и “выравнивание” потенциалов на территории, занятой оборудованием системы заземления. Действие защиты, так же, как и в низковольтных сетях, не приводит к отключению повреждённого электроприёмника.

В сетях с заземлённой нейтралью напряжением выше 1 кВ защитное заземление также не снижает напряжение на корпусе с повреждённой изоляцией до безопасных значений. Ток замыкания проходит по контуру “фаза – корпус – зона растекания тока вблизи заземлителя R_3 – зона растекания тока вблизи заземлителя R_0 – нейтраль вторичной обмотки трансформатора”. В этом контуре фазное напряжение в основном падает на сопротивлениях R_0 и $R_{\text{зав}}$, которые примерно равны, следовательно, максимальные потенциалы в зонах растекания тока равны $0.5 U_{\text{ф}}$. По действующим нормам в сети с заземлённой нейтралью напряжением выше 1 кВ заземляющее устройство должно иметь сопротивление не более 0.5 Ом. В результате ток в контуре будет составлять тысячи ампер, что значительно превысит уставку срабатывания максимальной токовой защиты от коротких замыканий, и, следовательно, произойдет быстрое отключение повреждённой установки. Таким образом, заземление корпусов в данных сетях приводит к срабатыванию защиты, по принципу действия аналогичной занулению в низковольтных сетях.

В целях обеспечения безопасности прикосновения к корпусу повреждённой установки в течение времени срабатывания максимальной токовой защиты производится выравнивание электрического потенциала выполнением контурного заземления. Контурное заземление представляет собой систему электрически связанных одиночных заземлителей, особым образом размещённых на территории (рис. 9.4).

В случае замыкания фазы на корпус электроприёмника протекает ток замыкания, при этом вблизи каждого заземлителя формируется зона растекания тока. В результате взаимного влияния этих зон на защищаемой территории образовывается единая пилообразная зона изменения потенциала.

Правильно спроектированное контурное заземление должно обеспечить условия безопасности прикосновения и приближения к корпусу электроприёмника, при котором напряжение шага $U_{\text{ш}} = \varphi_{\text{max}} - \varphi_{\text{min}} < U_{\text{пду}}$.

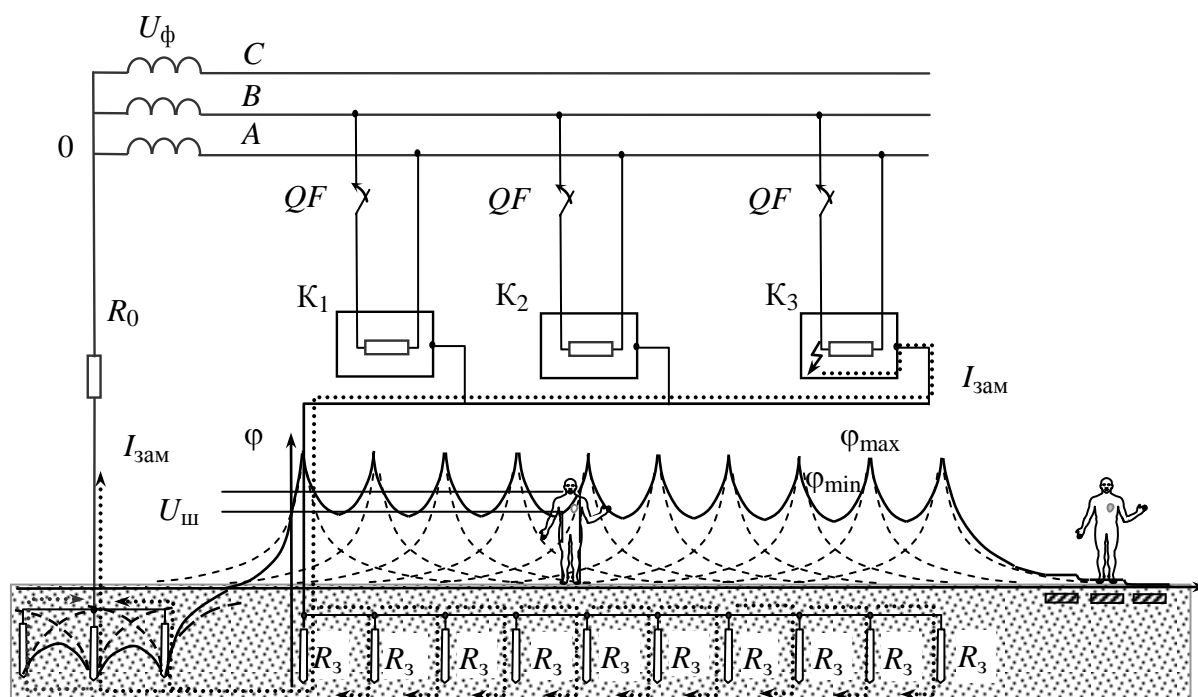


Рис. 9.4. Схема для анализа безопасности человека в системе ТТ с помощью контурного заземления с диаграммами потенциалов на поверхности земли в зоне растекания тока замыкания на корпус

Рабочие и защитные заземления, а также заземления установок разных напряжений, технически могут быть выполнены и совместно, и отдельно. Однако объединение или разделение заземляющих устройств не может быть случайным и необоснованным. Правильное решение этого вопроса чрезвычайно существенно. Раздельное выполнение защитных заземлений в одной электрической сети в условиях двойного замыкания на землю, например в различных помещениях или цехах, создает опасный потенциал на заземлённых частях оборудования (рис. 9.5).

Устройство общего заземления или объединение отдельных заземлителей с помощью уравнивательных шин имеет два существенных преимущества. Во-первых, оно превращает двойное замыкание на землю в двухполюсное короткое, что приводит к отключению. Во-вторых, при этом не образуются опасные напряжения на оборудовании, так как основная часть тока короткого замыкания проходит через соединительные шины, а не через заземлители.

Так же, как и при раздельном заземлении, защитное заземление не достигает цели при низком сопротивлении изоляции сети, при наличии в ней замыкания на землю и в особенности при замыкании на металлическую конструкцию с большой проводимостью растекания (водопроводная сеть и т. п.).

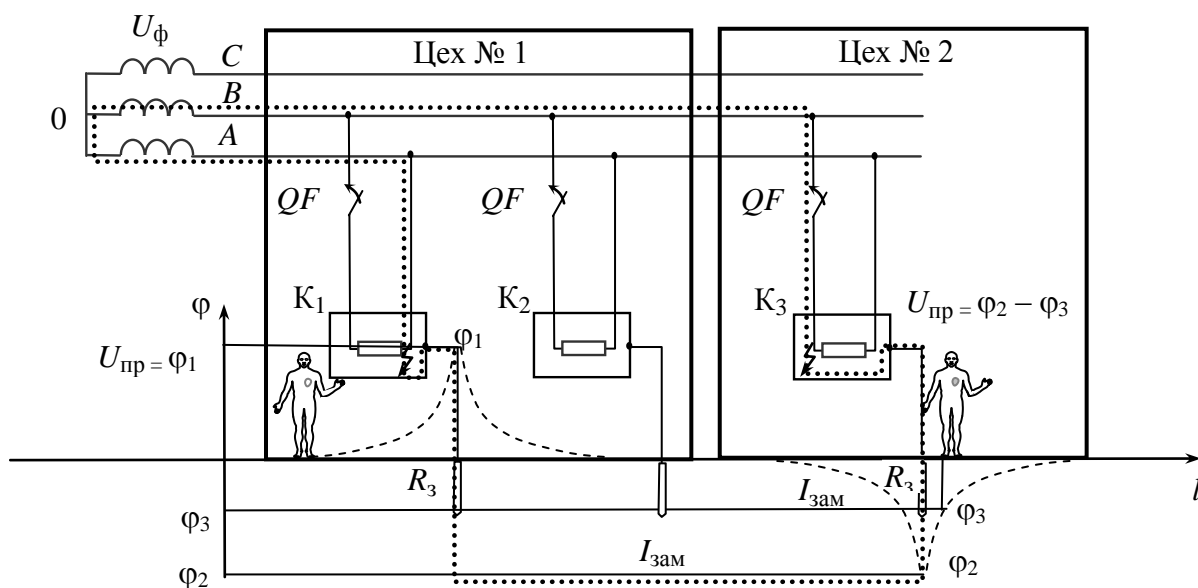


Рис. 9.5. Опасность замыкания двух фаз в системе IT

С этой точки зрения становится желательным присоединить подобные конструкции к системе заземления (об уравнивании потенциалов см. далее).

Области применения защитного заземления. Защитному заземлению подлежат металлические части электроустановок, доступные для прикосновения человека и не имеющие других видов защиты, обеспечивающих электробезопасность.

Защитное заземление применяется:

- в электроустановках переменного тока с изолированной нейтралью при напряжении 380 В и выше и постоянного тока с изолированной средней точкой при напряжении 440 В и выше (альтернативных вариантов защиты нет);
- в электроустановках с изолированной от земли нейтралью (полюсом), если рабочее напряжение выше 50 (25, 12) В переменного и 120 (60, 30) В постоянного тока (в зависимости от категории опасности помещения), как вариант защиты (поскольку имеются альтернативные защитные мероприятия);
- во взрывоопасных зонах – заземляются все нетоковедущие части независимо от значения рабочего напряжения электрооборудования;
- в электроустановках с глухозаземлённой нейтралью при напряжении более 1000 В (альтернативных вариантов защиты нет).

10. ЗАНУЛЕНИЕ

Ещё одним основным из дополнительных средств защиты при непрямом прикосновении в системах TN напряжением менее 1000 В является *зануление*. При замыкании фазы на корпус занулённого электроприёмника формируется контур тока короткого замыкания “фаза – корпус – зануляющий проводник – нулевой провод – нейтраль обмотки трансформатора”. Под действием тока короткого замыкания срабатывают приборы максимальной токовой защиты (автоматический выключатель, плавкий предохранитель) и отключают неисправный приёмник от питающей сети, в результате чего напряжение прикосновения к корпусу неисправного электроприёмника становится равным нулю. Защитный эффект зануления заключается в уменьшении длительности протекания тока замыкания, и, следовательно, тока через тело человека.

Технические требования к системе зануления, направленные на обеспечение защиты от поражения током, приведены в пп. 1.7.79 – 1.7.89 ПУЭ.

Расчёт зануления проводится с целью определения условий, при которых оно надёжно выполняет возложенную на него задачу – быстро отключить повреждённое электрооборудование от сети. При замыкании фазы на занулённый корпус она автоматически отключится, если сила тока однофазного замыкания между фазным и нулевым защитным проводниками $I_{кз}$ удовлетворяет условию $I_{кз} > k I_{ном}$, где k – коэффициент кратности номинального тока $I_{ном}$ плавкой вставки предохранителя или уставки тока срабатывания автоматического выключателя.

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 от тока (уменьшается с ростом тока), то в целях ускорения отключения принимают $k > 3$. Если установка защищается автоматическим выключателем с обратно зависимой от тока характеристикой, подобной характеристике предохранителей, то также принимают $k \geq 3$. Такое значение k позволит обеспечить необходимое по условиям безопасности быстродействие (100...250 мс для напряжений прикосновения 220 В) с учётом возможного старения системы защиты (окисление контактных соединений и т. п.).

На рис. 10.1 приведена общая схема для анализа электробезопасности при использовании зануления, а на рис. 10.2 – упрощённая схема.

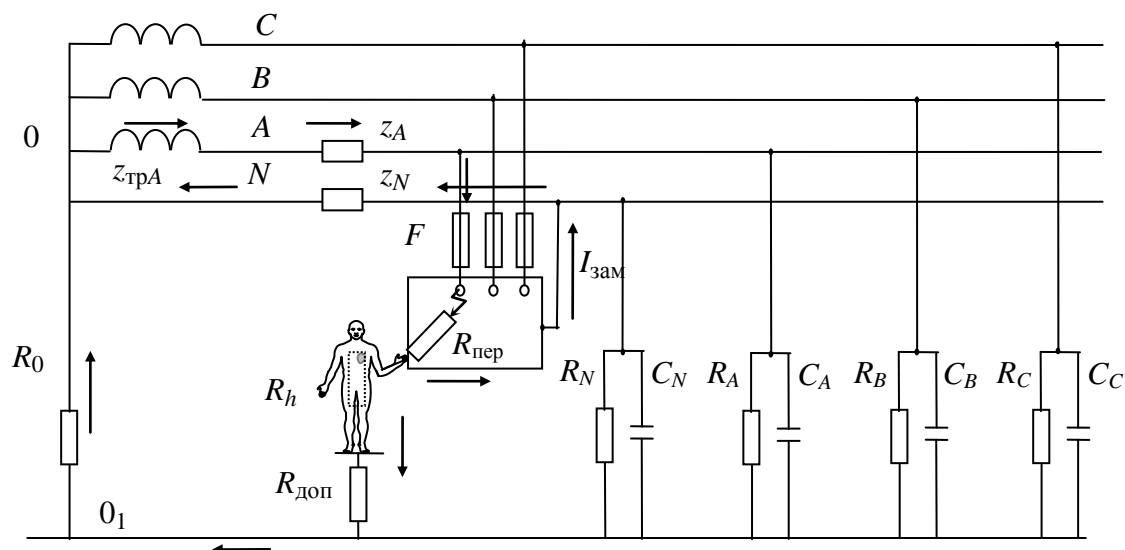


Рис 10.1. Схема замещения для расчёта системы зануления

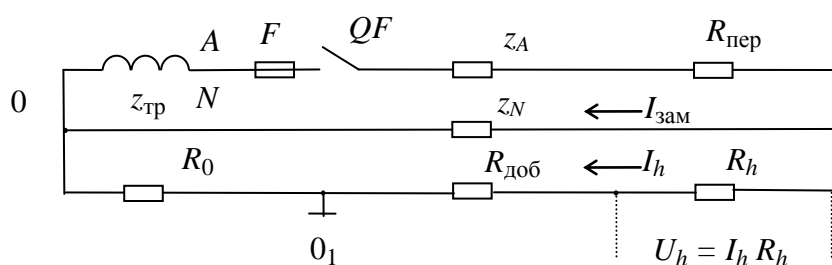


Рис 10.2. Упрощённая схема для расчёта системы зануления

Ток короткого замыкания, который должен обеспечить отключение неисправного потребителя от сети, и напряжение на корпусе до момента этого отключения рассчитываются по формулам

$$I_{\text{зам}} = \frac{U_{\phi}}{z_{\text{тр}} + z_A + R_{\text{пер}} + z_N}, \quad U_{\text{кор}} = I_{\text{зам}} z_N,$$

где $z_{\text{тр}}$, z_A , z_N , $R_{\text{пер}}$ – соответственно, собственные сопротивления обмотки трансформатора, фазного и нулевого проводов и переходное сопротивление (дополнительное сопротивление в месте замыкания на корпус).

Этот ток сравнивается с током уставки автоматического выключателя или плавкого предохранителя $I_{\text{уст}}$, каждый из которых имеет определённую характеристику срабатывания (рис. 10.3) и время отключения.

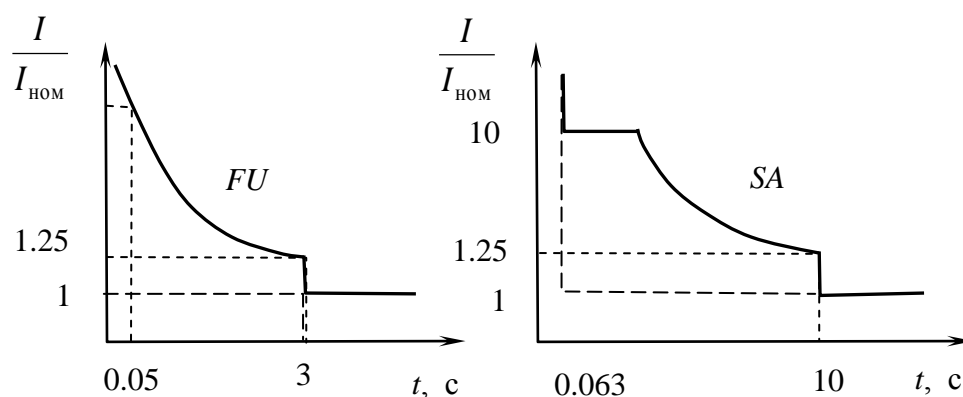


Рис. 10.3. Вид токовременных характеристик плавкого предохранителя (FU) и автоматического выключателя (SA)

Сопротивления фазного и нулевого проводов определяются суммой сопротивлений $z_{тр} = r + jx$, где $r = \rho l/S$ – собственное активное и $x = \omega L$ – индуктивное сопротивления. Они зависят от длины проводников l и могут быть рассчитаны при известном параметрах – удельном сопротивлении ρ и сечении S . Для одиночного провода круглого поперечного сечения диаметром d индуктивность определяется выражением $L = 0.5\mu_0 l (\ln 4l/d - 0.75)/\pi$. К примеру, пусть $d = 1$ мм, $l = 100$ м, $\rho = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м и $\omega = 314$ с⁻¹, тогда полное сопротивление провода $z = 2.5 + j0.08 \approx 2.5$ Ом. Как правило, индуктивным сопротивлением пренебрегают и при расчёте берут только активное сопротивление. Сопротивление обмоток трансформатора или генератора может быть определено из справочной литературы, а ориентировочные значения следующие:

Мощность трансформатора, кВ·А	25	63	100	250	630	1000
Сопротивление $z_{тр}$, Ом	0.9	0.36	0.23	0.1	0.04	0.03

Изменяя материал и сечение проводов, можно подобрать значение расчётного тока короткого замыкания, достаточное для обеспечения необходимой скорости срабатывания устройств максимальной токовой защиты. При этом согласно п.1.7.76 ПУЭ по условиям механической прочности сечение проводников должно удовлетворять условию $S > S_{min}$. Минимальное их сечение S_{min} , мм², приведено в табл. 10.1.

В качестве нулевых защитных проводников ПУЭ рекомендуют применять неизолированные или изолированные проводники, а также различные

металлические конструкции зданий, подкрановые пути, стальные трубы электропроводок, трубопроводы (кроме газовых, канализационных, отопления).

Таблица 10.1

Материал	Отдельный провод		Жила в кабеле (шнуре питания)
	неизолированный	изолированный	
Медь	4	1.5	1 (0.35 – в бытовых приборах)
Алюминий	6	2.5	2.5

Зануление применяется в электроустановках переменного тока с глухо-заземлённой нейтралью и постоянного тока с заземлённой средней точкой:

- во всех электроустановках при напряжении переменного тока 380 В и выше и при напряжении постоянного тока 440 В и выше;
- в электроустановках в помещениях с повышенной опасностью поражения током, особоопасных и в наружных пространствах, если рабочее напряжение выше 50 (42) В переменного и 120 (110) В постоянного токов;
- во взрывоопасных зонах – независимо от значения рабочего напряжения электрооборудования.

ПУЭ требуют занулять те же металлоконструкции, что и заземлять:

- корпуса электрических машин, трансформаторов, аппаратов, светильников и других приёмников электроэнергии;
- каркасы распределительных щитов, щитов управления и их съёмные и открывающиеся части;
- металлические оболочки кабелей и конструкции для их прокладки (трубы, кожухи, короба и т. п.).

Эти конструкции могут быть одновременно и заземлены (что равносильно повторному заземлению нулевого провода). В то же время согласно п.1.7.39 ПУЭ применение защитного заземления корпусов электроприёмников без их зануления *не допускается*.

Опасные неисправности в системе зануления. В системах TN имеется достаточно много неисправностей, которые необходимо учитывать при эксплуатации. Особенностью зануления является то, что оно эффективно защищает человека только в наиболее опасном случае – при коротком замыкании на корпус электроприёмника. Если ток короткого замыкания по тем или иным причинам не достигает необходимого для срабатывания максимальной

защиты уровня, возможно длительное существование режимов работы электроустановки, когда опасность поражения током людей оказывается значительно выше, чем если бы зануление отсутствовало. Наиболее часто подобные режимы возникают при неправильном выполнении зануления.

К другим недостаткам зануления можно отнести следующее:

- сложность и пожароопасность испытаний системы зануления для реальных параметров аппаратов и проводников (перегрузка сети и выработка ресурса аппаратуры защиты), отсутствие встроенных в систему устройств проверки её работоспособности;
- плохие эксплуатационные качества системы. Использование “жучков” или ненадёжных автоматических выключателей, неправильный выбор сечения нулевого защитного проводника, плохое качество контактов ведут к отказам системы защиты (увеличивают пожарную опасность режима) или её неселективной работе (подчас раньше, чем периферийные, срабатывает групповой автоматический выключатель, отключающий несколько групп электроприёмников), а соединение с нейтралью источника корпусов различных электроприёмников может привести к появлению на корпусах исправных электроприёмников вынесенных потенциалов от неисправных потребителей (при отказе в системе защиты, использовании защитного заземления без одновременного защитного зануления) и т. д.

На рис. 10.4 – 10.7 приведены характерные схемы основных неисправностей, которые необходимо учитывать при эксплуатации систем TN.

Рассмотрим некоторые наиболее характерные опасные ситуации.

1. Несрабатывание устройств защиты (рис. 10.4). Данная ситуация может возникать вследствие установки автоматических выключателей или предохранителей с уставками срабатывания, превышающими расчётные, либо из-за наличия переходных сопротивлений в месте замыкания.

В результате ток короткого замыкания фазы на занулённый корпус может оказаться недостаточным для срабатывания устройств максимальной токовой защиты или из-за недостаточной кратности тока замыкания время срабатывания будет превышать допустимое по условиям безопасности прикосновения. Данная ситуация, при которой человек, прикасаясь к повреждённому корпусу, оказывается под опасным потенциалом относительно земли уже рассмотрена ранее (см. рис. 10.1 и 10.2). Напряжение на корпусе K_1 , равное току короткого замыкания, умноженному на сопротивление провода нейтра-

ли, может достигать половины (если сечения нулевого и фазного проводов равны) и даже $2/3$ фазного напряжения (если нейтральный провод имеет сечение, в два раза меньшее фазного). Опасность кроме этого заключается в том, что не только на корпусе K_2 , но на всех других (неповреждённых) корпусах, соединённых с нулевым проводом сети после него (например K_3), будет примерно такое же напряжение (рис. 10.4, а). Опасность будет существовать в течение всего аварийного периода, то есть с момента замыкания фазы на корпус до автоматического отключения поврежденной установки от сети, если, конечно, ток замыкания превысит уставку срабатывания устройств токовой защиты.

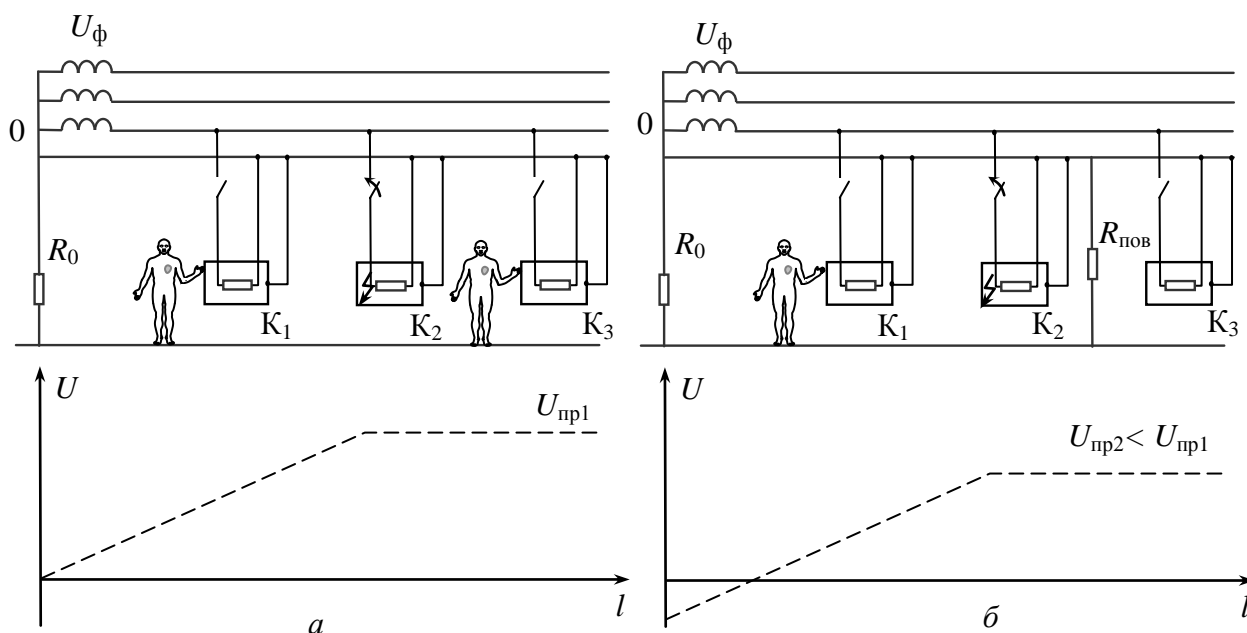


Рис. 10.4. Схема для анализа безопасности человека в системе TN при несрабатывании систем защиты с диаграммами напряжений на нулевом проводе:
а – без повторного заземления; б – с повторным заземлением нулевого провода

На участке нулевого защитного проводника ближе к источнику энергии (на корпусе K_1) напряжение будет изменяться от нуля до $U_{пр1}$ пропорционально расстоянию места подключения корпуса к нулевому проводу от места заземления нейтрали, то есть чем ближе корпус электрооборудования находится к трансформатору или генератору, тем меньше на нём будет напряжение.

Данный режим не только создает условия для поражения электрическим током, но является одной из наиболее частых причин возникновения

пожаров. Поэтому обязательными условиями применения зануления являются использование только калиброванных плавких вставок предохранителей с соответствующими проекту характеристиками, а также регулярная проверка исправности устройств токовой защиты.

Повторное заземление нулевого защитного проводника снижает напряжение на занулённых корпусах в период замыкания фазы на корпус (см. рис. 10.4, б). Если нулевой защитный проводник будет иметь повторное заземление с сопротивлением $R_{\text{пов}}$, то напряжение на нулевом проводе снизится до значения $U_{\text{пр2}} = U_{\text{пр1}} \frac{R_{\text{пов}}}{R_0 + R_{\text{пов}}}$, где $U_{\text{пр1}}$ – падение напряжения в нулевом проводе без повторного заземления, R_0 – сопротивление заземления нейтрали источника электроэнергии.

Если принять $R_{\text{пов}} = R_0$, напряжение на нулевом проводе не превысит значение $U_{\text{ф}}/4$, то есть применение повторного заземления не обеспечивает необходимой защиты в описанной аварийной ситуации, но снижает вероятность нежелательных последствий.

2. Обрыв нулевого провода (рис. 10.5). При случайном или преднамеренном обрыве нулевого защитного проводника (такая ситуация возникнет при срабатывании плавкого предохранителя или автоматического выключателя, установленного в совмещенном нулевом проводе, поэтому правилами запрещается в нулевом проводнике ставить выключатели, предохранители, а также другие приборы, способные нарушить его целостность) и замыкании фазы на корпус прибора, присоединённого к нулевому проводу после места обрыва, ток замыкания ограничивается сопротивлением изоляции относительно земли оторванного от нейтрали участка нулевого провода и сопротивлениями прикасающихся к нему людей. Соответственно, за местом обрыва напряжение относительно земли участка нулевого защитного проводника и всех присоединённых к нему корпусов электроприёмников окажется близким по значению к фазному напряжению сети. Это напряжение будет существовать длительно, поскольку повреждённая установка автоматически не отключится.

Причём здесь не только замыкание на один корпус приведёт к появлению опасного напряжения на остальных корпусах, но и любая несимметричная трёхфазная нагрузка. Такой несимметричной нагрузкой может быть на-

пример включение только одной лампочки на 100 Вт ($R_{\text{наг}} = 490 \text{ Ом}$) при отключённых других или включение электрооборудования с корпусом K_2 (рис. 10.5, *а*). При этом ни лампочка, ни оборудование работать не будут, поскольку току некуда идти (имеется обрыв на пути тока нагрузки), а при прикосновении человека к занулённому корпусу K_2 на нём будет примерно $2/3$ фазного напряжения.

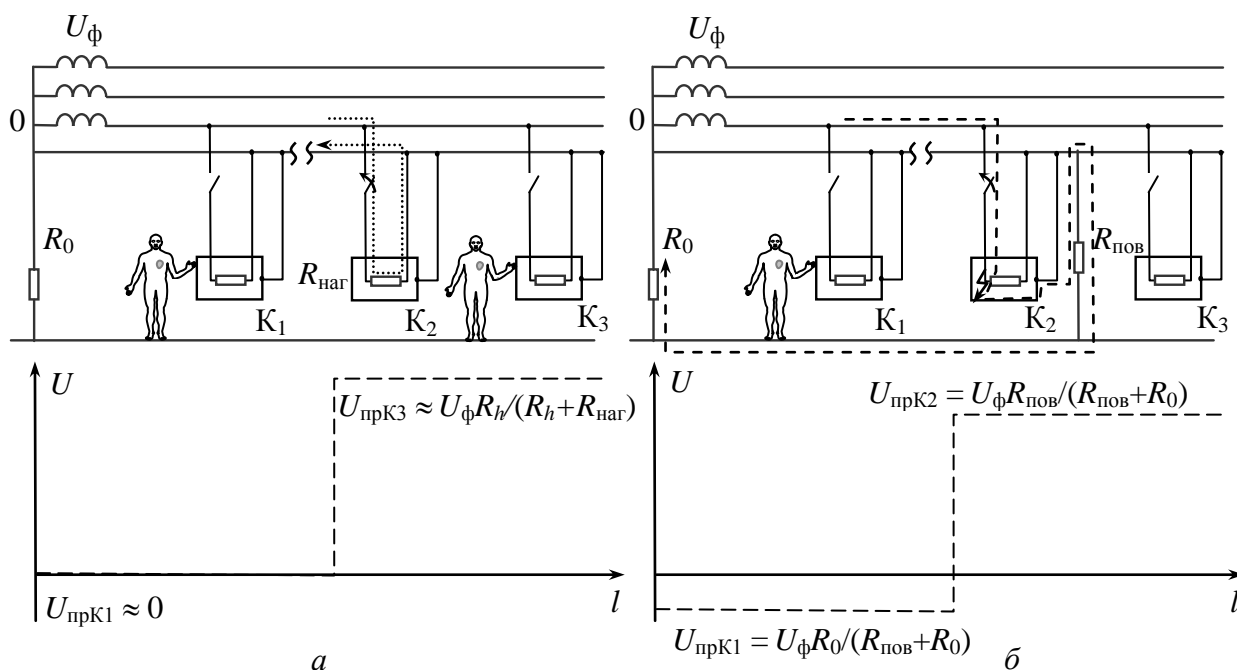


Рис. 10.5. Схема для анализа безопасности человека в системе TN–С при обрыве нулевого провода с диаграммами напряжений на нулевом проводе:
а – без повторного заземления, *б* – с повторным заземлением нулевого провода

Снизить риск поражения током в этих режимах позволяет повторное заземление нулевого провода (рис. 10.5, *б*). При наличии сопротивления $R_{\text{пов}}$ в случае разрыва нулевого провода формируется контур тока замыкания на землю “фазный провод – сопротивление нагрузки – нулевой провод – сопротивление повторного заземления – земля – сопротивление рабочего заземления – нейтраль обмотки трансформатора” и напряжение оторванного участка нулевого провода относительно земли уменьшится. Одновременно, правда, возникнет напряжение на сопротивлении рабочего заземления нейтрали источника и соединённом с ним участке нулевого провода корпусе K_1 до места разрыва, например при замыкании фазы на корпус оно достигает значения $U_{\text{прК1}} = U_\phi R_0 / (R_{\text{пов}} + R_0)$.

Повторное заземление совмещённого нулевого проводника уменьшает опасность поражения током, возникающую в результате его обрыва, но не может устранить её полностью. Поэтому, во-первых, требуется тщательная прокладка нулевого проводника, чтобы исключить возможность его обрыва, а, во-вторых, предпочтительно разделение рабочего и защитного нулевых проводников, особенно на конечных идущих к электроприёмникам участках системы электроснабжения, где наиболее часто возникают повреждения проводов (применение системы TN–C–S).

Согласно ПУЭ повторному заземлению подвергаются нулевые рабочие провода воздушных линий, которые используются одновременно и как нулевые защитные проводники. При этом повторные заземления выполняются на концах воздушных линий (или ответвлений) длиной более 200 м, а также на вводах воздушных линий в электроустановки, которые подлежат занулению.

Заземление занулённых корпусов равносильно повторному заземлению нулевого провода.

3. Одновременное использование заземления и зануления в системе TN–C (рис. 10.6). В результате замыкания фазы на заземлённый, но не занулённый, корпус на нём появляется опасное напряжение, равное произведению тока замыкания на сопротивление защитного заземления, однако опасное напряжение может появиться и на нулевом проводе (падение напряжения от этого же тока на сопротивлении рабочего заземления R_0). Чем хуже выполнено заземление, тем больше напряжение на корпусе K_2 и тем меньше напряжение на корпусах K_1 и K_3 (рис. 10.6, а). Повторное заземление нулевого провода несколько снижает напряжение на занулённых корпусах, но ненамного (рис. 10.6, б).

4. Обрыв цепи заземления нейтрали и, соответственно, переход сети к режиму изолированной нейтрали. При наличии занулённых корпусов электроприёмников такая неисправность грозит опасными последствиями.

Неравенство сопротивлений изоляции и емкостей разных фаз даже в неаварийных режимах работы сети с изолированной нейтралью вызывает появление напряжения смещения нейтрали относительно земли. Возникновение же замыкания одной из фаз сети на землю приводит к возрастанию этого напряжения до величины фазного, если же человек прикасается к корпусу, то напряжение на корпусе с фазного уменьшается, перераспределяясь примерно пропорционально сопротивлениям человека и замыкания (рис. 10.7, а).

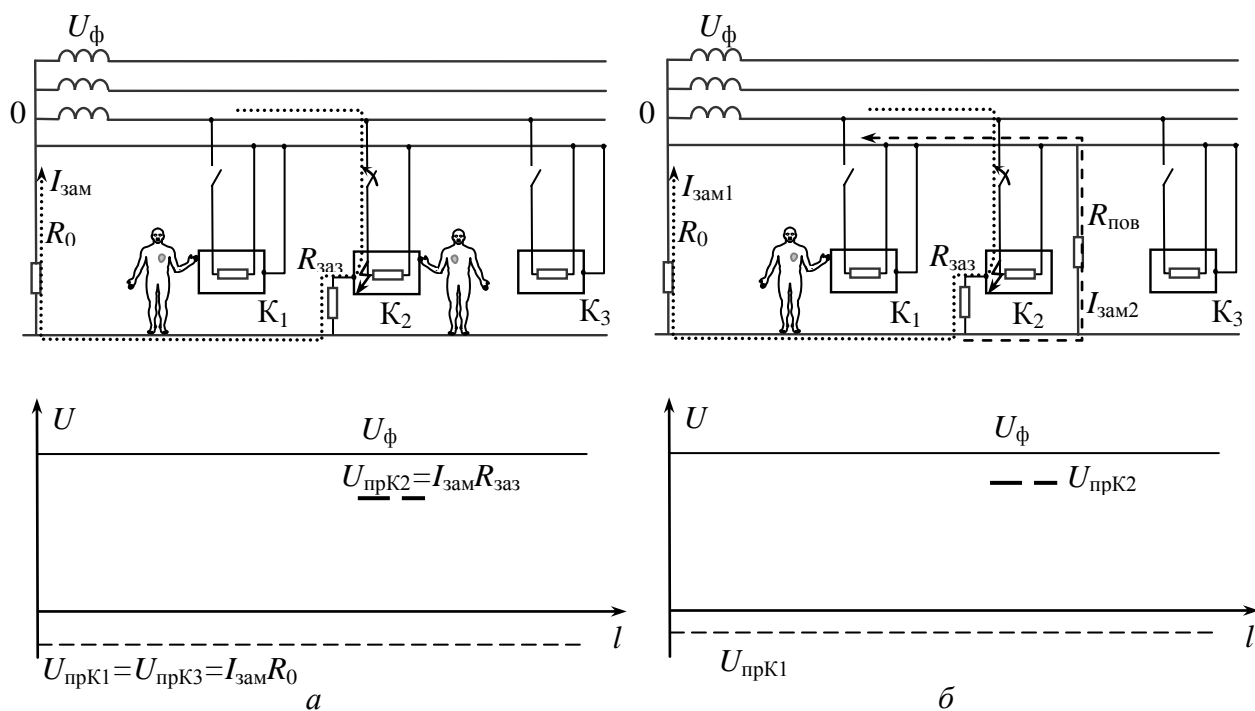


Рис 10.6. Схема для анализа безопасности человека в системе TN–С при использовании и заземления и зануления с диаграммами напряжений на нулевом проводе:
а – без повторного заземления, б – с повторным заземлением нулевого провода

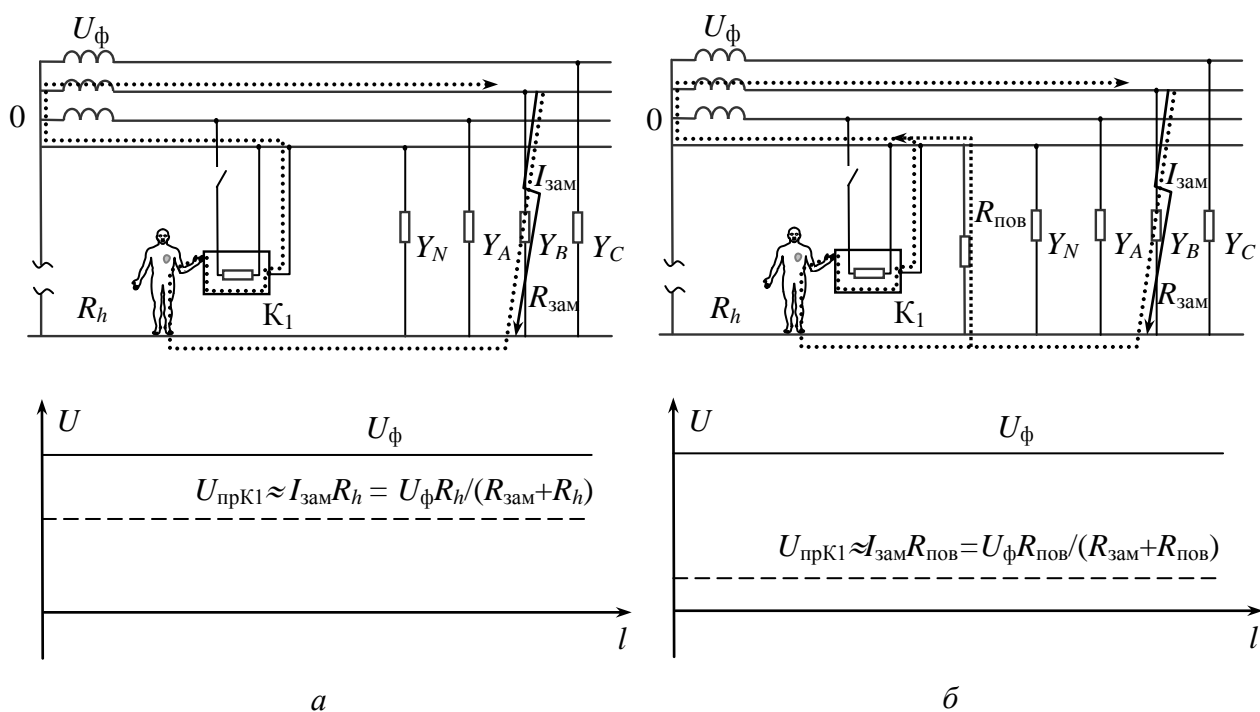


Рис. 10.7. Схема для анализа безопасности человека в системе TN при обрыве цепи заземления нейтрали с диаграммами напряжений на нулевом проводе:
а – без повторного заземления; б – с повторным заземлением нулевого провода

Защитный нулевой провод и все занулённые конструкции в случае обрыва цепи заземления нейтрали оказываются под напряжением, равным напряжению смещения нейтрали, что создает угрозу массовых электротравм.

Так же, как и при наличии двух первых неисправностей повторное заземление нулевого провода снижает опасность непрямого прикосновения (рис. 10.7, б). Оно выступает как дублёр основного заземлителя в аварийной ситуации и снижает напряжение U_0 за счёт перераспределения падений напряжения на $R_{\text{зам}}$ и R_h .

11. ЗАЩИТНОЕ ОТКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время защитное автоматическое отключение всё чаще используется в качестве основного из дополнительных средств обеспечения электробезопасности при непрямом прикосновении. В основе действия защитного отключения как способа защиты лежит принцип ограничения продолжительности протекания тока через тело человека за счёт быстрого отключения участка сети от источника электроэнергии. Реализуется способ в виде отдельных устройств защитного отключения (УЗО) (рис. 11.1).

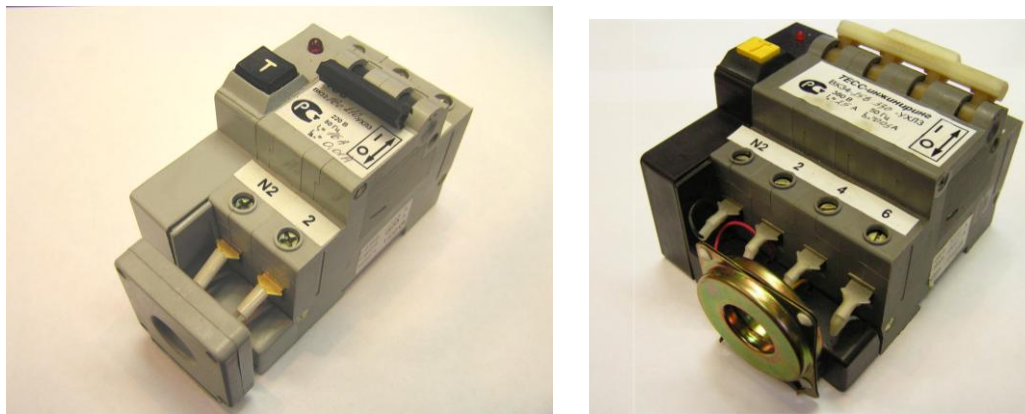


Рис. 11.1. Внешний вид однофазного и трехфазного дифференциальных автоматов (автоматический выключатель + УЗО)

Отличительной особенностью УЗО является универсальность: в зависимости от способа реализации они могут защищать человека в случае как косвенного, так и прямого прикосновений к токоведущим частям, защищают от опасных последствий однофазных замыканий токоведущих частей на землю или на корпус электроприёмника. Как правило, УЗО имеют высокую чувствительность (токи, при которых УЗО срабатывают, составляют единицы,

десятки или для защиты оборудования – сотни миллиампер), позволяющую выявить опасную ситуацию на ранних стадиях её возникновения и пресечь её дальнейшее развитие.

УЗО, предназначенные для отключения электроустановок при прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением, имеют характеристики быстрогодействия, обеспечивающие время действия тока на человека значительно ниже значений, установленных ГОСТ 12.1.038-82*.

С учётом особенностей обеспечения электробезопасности в сетях различного вида ПУЭ конкретизированы требования к быстрдействию УЗО в зависимости от уровня рабочего напряжения. Наибольшие времена защитного автоматического отключения приведены в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Номинальное фазное напряжение U , В, для системы TN	Номинальное линейное напряжение U , В, для системы IT	Наибольшее время отключения τ , с
127	220	0.8
220	380	0.4
380	660	0.2
> 380	> 660	0.1

Для системы IT приведено наибольшее допустимое время защитного автоматического отключения при двойном замыкании на открытые проводящие части.

УЗО являются устройствами специализированного применения в зависимости от режима нейтрали источника питания электроустановки, рода и частоты тока. По виду входного сигнала различают УЗО, реагирующие:

- на ток нулевой последовательности (ток утечки, дифференциальный ток);
- на напряжение нулевой последовательности;
- на сумму, разность, фазовые соотношения между током и напряжением нулевой последовательности;
- на напряжение корпуса относительно земли;
- на оперативный ток (постоянный, переменный не промышленной частоты), накладываемый на рабочий ток электроустановки, и т. д.

В конструкции УЗО обязательно должна быть предусмотрена возможность периодической проверки его исправности в условиях эксплуатации, например имитированием однофазного повреждения изоляции в защищаемом участке сети.

Наиболее широкое распространение получили УЗО, реагирующие непосредственно на ток утечки на землю через тело человека (рис. 11.2) или место повреждения изоляции (дифференциальный ток I_{Δ}).

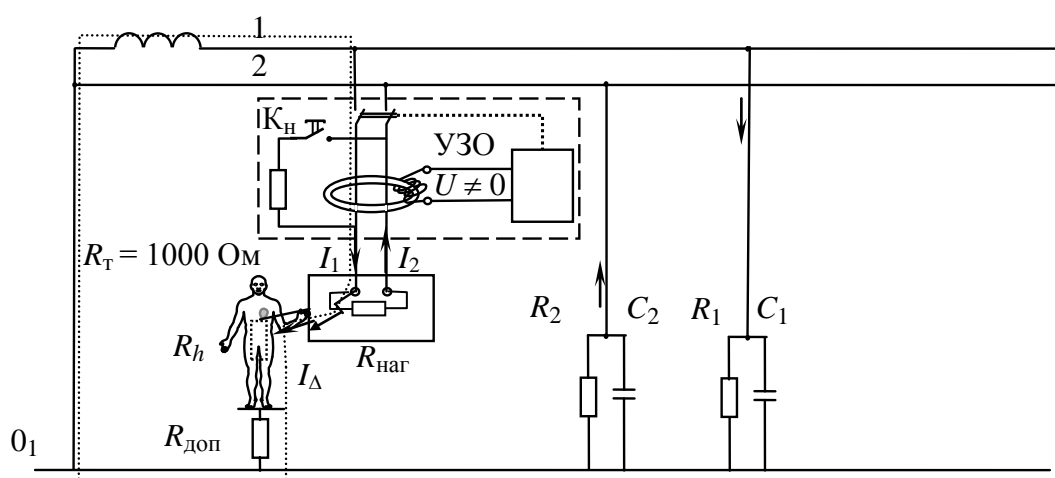


Рис. 11.2. Пояснение к принципу работы дифференциального УЗО

В этих устройствах в качестве чувствительного элемента используется трансформатор тока нулевой последовательности (ТТНП), обычно представляющий из себя кольцевой магнитопровод с намотанной на него вторичной обмоткой. Через окно магнитопровода пропущены все силовые провода электропитания защищаемого участка сети.

В случае однофазного прикосновения по проводам дополнительно к токам нагрузки, протекающим по $R_{\text{наг}}$, протекает ток через тело человека I_{Δ} , контур которого замыкается вне ТТНП – через сопротивление заземления нейтрали или через сопротивление изоляции и ёмкости фаз относительно земли (в сетях с изолированной нейтралью). Поэтому векторная сумма токов I_1 и I_2 , суммарный магнитный поток в магнитопроводе и напряжение на вторичной обмотке ТТНП уже не будут равны нулю. Появление этого напряжения вызывает срабатывание коммутационного аппарата, отключающего защищаемый участок от сети.

Если на защищаемом участке в трёхфазной сети нет однофазного прикосновения и изоляция его исправна, то сумма фазных токов нагрузки всегда равна нулю. Если же появляется ток, протекающий между одной из фаз на землю (прикосновение человека, замыкание фазы), минуя ТТНП, УЗО также срабатывает.

Кнопка K_n (тест) предназначена для проверки работоспособности УЗО.

Различают УЗО *высокой чувствительности*, используемые для защиты человека при прямом и непрямом прикосновениях к сети, и *низкой чувствительности* на дифференциальные токи 100...1000 мА, предназначенные для отключения повреждённого электрооборудования. Применение более чувствительных и быстродействующих УЗО необходимо для решения задач:

- защиты человека при непосредственном прикосновении к токоведущим частям,
- обеспечения пожарной безопасности замыканий на землю (корпус),
- применения УЗО как основного средства защиты человека вместо зануления или защитного заземления.

Прикосновение человека непосредственно к токоведущим частям, равно как и к незанулённым (незаземлённым) нетоковедущим частям, оказавшимся под опасным напряжением вследствие повреждения изоляции, приводит к появлению тока, сила которого помимо прочего зависит от наличия включённых в цепь добавочных сопротивлений (обуви, пола). Если высокое сопротивление сухих обуви и пола не позволяет току достичь опасных для человека значений, то в условиях повышенной влажности обуви и пола либо при отсутствии добавочных сопротивлений (например, при пути тока “рука – рука”) ток через тело человека достаточно велик и должен быть прерван УЗО с уставкой 5...30 мА.

Не во всех случаях применение УЗО на дифференциальных токах бывает эффективным. В электрической сети с изолированной нейтралью ток утечки в случае прикосновения в защищаемом УЗО участке сети (ток через тело человека) имеет две составляющие. Одна составляющая I_{Δ} , пропорциональная значениям емкостей фаз сети C_c до места установки УЗО (при условии хорошего состояния изоляции сети относительно земли), протекает через трансформатор тока нулевой последовательности (ТТНП) УЗО и может вызывать его срабатывание. Другая составляющая тока через тело человека, пропорциональная значениям емкостей фаз участка сети после места установки УЗО C_{ϕ} (в зоне защиты), не протекает через ТТНП УЗО и, соответственно, не вызовет срабатывание защиты. Если окажется, что в сети $C_{\phi} \gg C_c$ (питание единственного электроприёмника от разделительного трансформатора по длинному кабелю), ток через тело человека может достичь опасных значений, не приводя при этом к срабатыванию УЗО. Наличие же несимметрии емкостей фаз в зоне защиты и вне её может привести к появлению емко-

стных уравнильных токов, в ряде случаев способных вызвать ложные срабатывания УЗО. Поэтому в таких случаях используют более сложные по принципу выявления опасной ситуации устройства, например анализирующие фазовые сдвиги между током и напряжением нулевой последовательности (рис. 11.3).

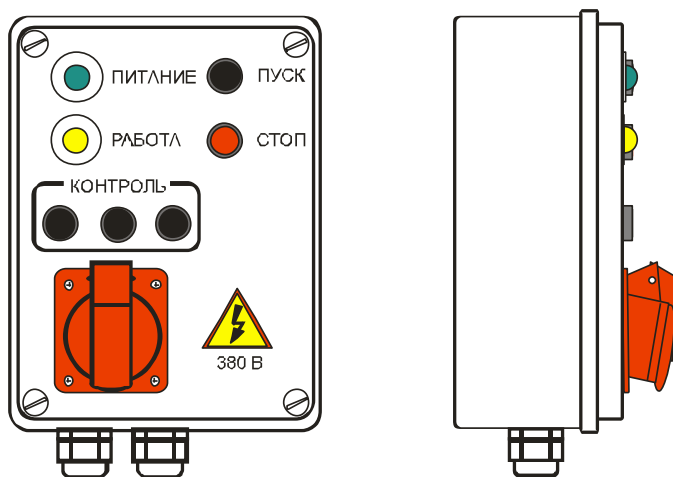


Рис. 11.3. Судовое устройство защитного отключения УЗО-С

УЗО применяются в тех случаях, когда допустимо временное отключение приёмников электроэнергии (например, в сетях питания переносных электроинструментов, в жилых зданиях и сооружениях и т. п.), а также во взрывоопасных зонах (цепи питания электроприводов в шахтах) и в особо опасных условиях (например, в карьерах).

ПУЭ и ГОСТ Р 50571.3-94 требуют применение УЗО в электроустановках строящихся и реконструируемых зданий, предлагают питание передвижных и переносных электроприёмников на 380/220 В для особо опасных условий эксплуатации через разделительные трансформаторы в сочетании с защитным отключением. Применение УЗО в цепях питания установок, допускающих перерывы электроснабжения, стало обязательным требованием Российского морского регистра судоходства для некоторых классов судов.

Наиболее эффективным становится применение УЗО совместно с защитным заземлением (или занулением). Даже не очень большое ухудшение состояния изоляции какого-либо из фазных проводов относительно корпуса заземлённого электроприёмника уже приводит к появлению тока утечки, достаточного для срабатывания УЗО. Так как длительность существования

внезапно возникших опасных потенциалов ограничивается временем отключения УЗО, совместное применение УЗО и защитного заземления допускается даже в сетях с глухозаземлённой нейтралью (сети вида ТТ).

В связи с универсальностью УЗО оно может быть использовано, к примеру, в высокочастотных индукционных установках при прямом или косвенном прикосновении человека на стороне высокочастотного тока (рис. 11.4).

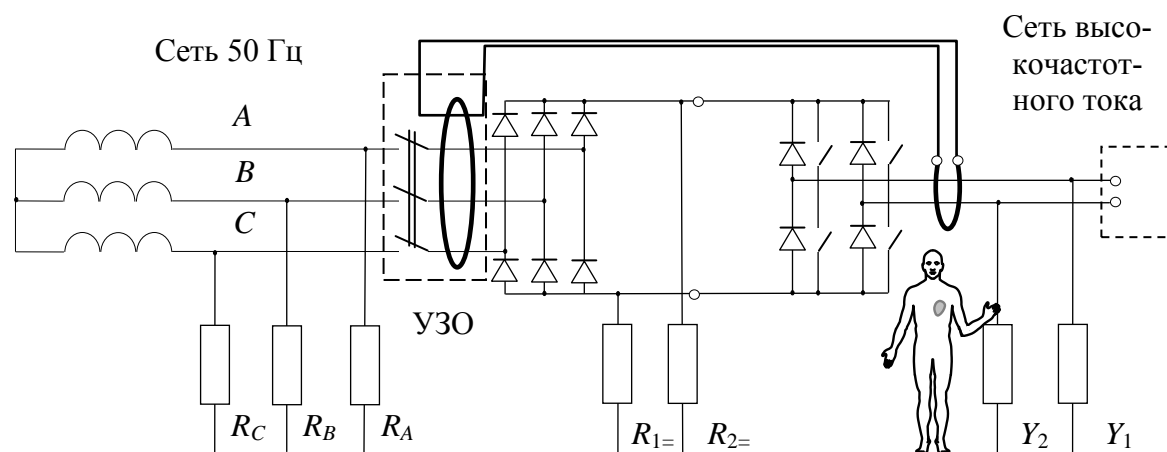


Рис. 11.4. Применение способа защиты человека в высокочастотных установках

Для этого в ТТНП устройства защитного отключения на стороне 50 Гц дополнительно вводится сигнал разностного тока от датчика, находящегося на шинах индуктора, и при опасном контакте человека к индуктору УЗО срабатывает, отключая питание установки.

12. ДРУГИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ

На рис. 12.1 приведены схемы реализации некоторых средств защиты, используемых для снижения опасности поражения электрическим током.

Защита от опасности перехода высокого напряжения на сторону низкого. Напряжения, необходимые для питания установок потребителей, обычно получают с помощью понижающих трансформаторов (к примеру, 6 или 10 кВ преобразуют в 220 или 380 В). Во многих электрических сетях и в большинстве устройств имеются понижающие или измерительные трансформаторы. Конструкция любого трансформатора не может полностью исключить возможность электрического контакта между обмотками разных напряжений при повреждениях электрической изоляции. В этом случае возникает так называемый переход высшего напряжения на сторону низшего.

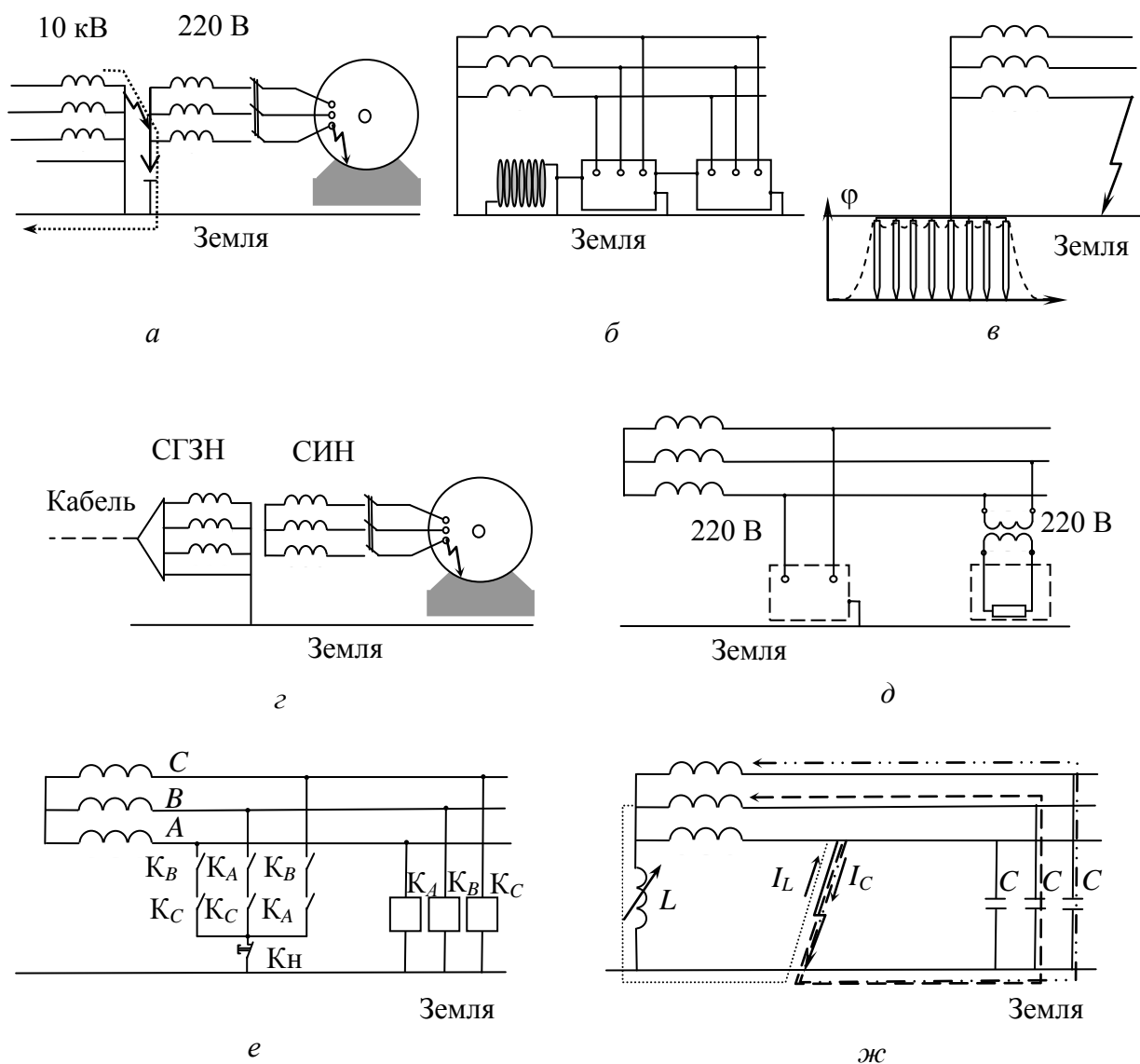


Рис. 12.1. Схемы выполнения дополнительной защиты:

а – пробивной предохранитель; *б* – уравнивание потенциалов; *в* – выравнивание потенциалов, *г* – электрическое разделение сетей; *д* – электрическое разделение цепей; *е* – однофазное защитное замыкание (шунтирование); *ж* – компенсация емкостных токов

Цепи, питающиеся от вторичной обмотки трансформатора, оказываются под потенциалом относительно земли, близким к потенциалу повреждённой фазы. Это может повлечь за собой повреждение изоляции приёмников электроэнергии, несчастные случаи и другие аварийные ситуации на стороне низшего напряжения. Ток через тело человека оказывается зависящим от параметров вторичной и первичной сетей, а результат прикосновения к токоведущим частям на стороне низкого напряжения (например, к цепи питания радиоэлектронной схемы) может оказаться равносильным прикосновению к фазе на стороне высшего напряжения.

Пусть к трёхфазной сети напряжением 220/380 В подключён однофазный понижающий трансформатор для питания светильников местного освещения в помещении с повышенной опасностью поражения электрическим током. Из-за повреждения изоляции в трансформаторе происходит замыкание между обмотками (рис. 12.2). Цепи вторичных обмоток трансформаторов – низковольтные, поэтому возможность прикосновения человека к токоведущей части не исключена (в частности, по психологическим причинам).

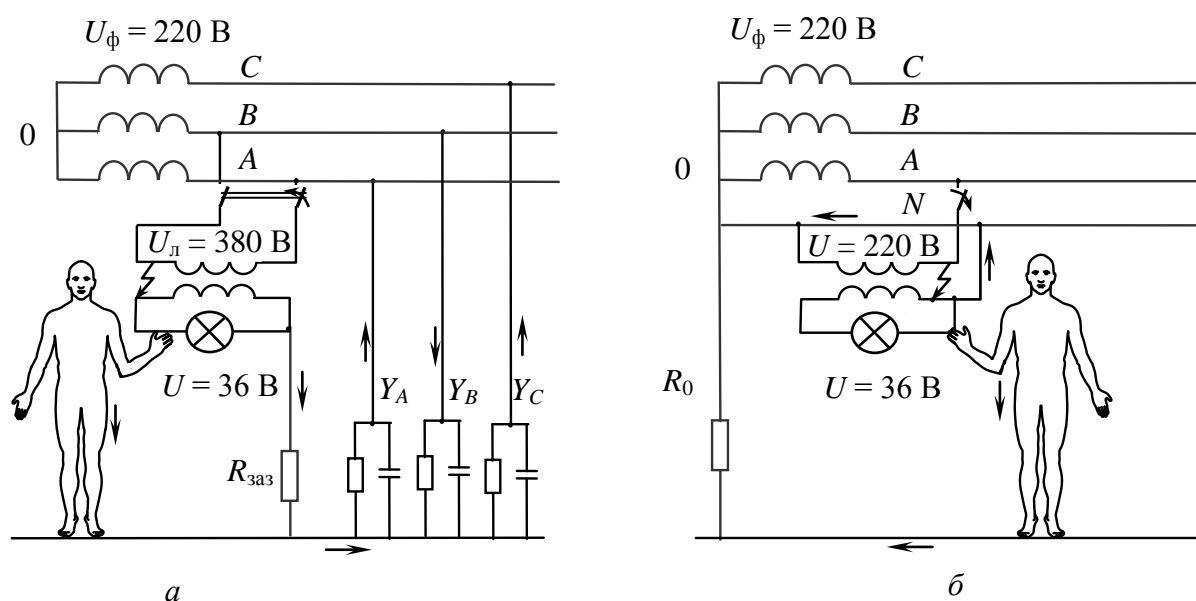


Рис. 12.2. Схемы выполнения защиты человека при прикосновении к вторичной обмотке понижающего трансформатора, питающего лампы:
а – в системе IT; б – в системе TN – С

В СИН человек оказывается в режиме однофазного прикосновения к сети, питающей трансформатор. При этом опасность режима зависит от значения сопротивлений изоляции фаз и ёмкости фаз относительно земли. В общем виде значение напряжения прикосновения может изменяться в диапазоне $0 < U_{пр} < U_{л}$, то есть может иметь смертельно опасные для жизни человека значения (см. разд. 4). Защита от возможного поражения человека электрическим током осуществляется заземлением одного полюса вторичной обмотки трансформатора (рис. 12.2, а).

Функция заземления полюса вторичной обмотки аналогична функции защитного заземления металлических токоведущих частей электроустановок

(см. разд. 9). При замыкании между обмотками трансформатора фаза B через сопротивление заземления замыкается на землю; при этом основная часть напряжения прикладывается к изоляции здоровых фаз ($U_{Aз} \rightarrow U_{л}$, $U_{Cз} \rightarrow U_{л}$), а напряжение фазы B относительно земли уменьшается до безопасного для человека значения. В результате напряжение прикосновения $U_{пр} \rightarrow 0$.

В СГЗН защита осуществляется занулением одного полюса вторичной обмотки при питании первичной обмотки. Из схемы рис. 12.2, б видно, что при замыкании обмотки, например фазы, A на занулённую вторичную обмотку формируется короткое замыкание фазы на нулевой провод, при котором срабатывает аппарат защиты (автоматический выключатель, установленный в цепи питания первичной обмотки, или предохранитель).

Если по каким-либо причинам непосредственное заземление/зануление полюса вторичной обмотки невозможно, защита может быть организована иначе, например, заземлением/занулением полюса экранной обмотки, расположенной в трансформаторе между первичной и вторичной обмотками таким образом, что замыкание первичной обмотки на вторичную не может произойти без одновременного замыкания и на экранную обмотку.

В сети напряжением более 1000 В, где имеется возможность пробоя первичной обмотки высоковольтного трансформатора на сторону вторичной обмотки с изолированной нейтралью (полюсами) используется *пробивной предохранитель* (см. рис. 12.1, а). Он должен быть установлен на стороне низшего напряжения трансформатора между полюсом или нейтралью и землёй. При превышении определённого напряжения происходит пробой вставки предохранителя, цепь замыкается на землю и вследствие появления тока короткого замыкания происходит отключение питания на первичной стороне высоковольтной сети.

Выравнивание и уравнивание потенциалов. Это эффективные методы снижения напряжения прикосновения или напряжения шага в действующей электроустановке, и их часто отождествляют друг с другом, хотя между ними имеется существенное различие. Они основаны на конструкторских решениях, обеспечивающих равенство электрических потенциалов точек, к которым возможно прикосновение человека. Применяются в тех случаях, когда необходимо выполнять работы на находящихся под напряжением элементах электроустановки или когда возможен вынос опасного потенциала на металлические конструкции.

Принцип защиты выравниванием потенциалов на поверхности земли в зоне действия токов замыкания на землю (см. рис. 12.1, в) основан на том, чтобы напряжения между любыми точками касания человеком проводящей поверхности не превышали предельно допустимых. Если человек стоит на эквипотенциальной поверхности, имеющей большое напряжение относительно земли, это не представляет опасности. Опасность возникает только в местах резкого изменения потенциала (см. рис. 9.2).

Аналогичный принцип защиты используется при уравнивании потенциалов (см. рис. 12.1, б) за счёт электрического соединения проводящих частей для достижения равенства их потенциалов, необходимых для безопасности. Даже если при пробое фазы на корпус на нём имеется опасный потенциал, такой же потенциал имеют и окружающие человека проводящие поверхности (батарея центрального отопления, водопровод, ванна, газопровод, другие корпуса оборудования). Обязательным условием при этом является объединение всех проводящих частей, а не отдельных из них (ПУЭ запрещает локальную систему уравнивания потенциалов). Если имеются пластиковые трубы и сантехоборудование, проблемы уравнивания потенциалов иногда очень трудно решить из-за отсутствия доступных проводящих частей.

Согласно ПУЭ основная система уравнивания потенциалов в электроустановках до 1 кВ должна соединять между собой следующие части:

- 1) нулевой защитный РЕ- или PEN-проводник питающей линии в системе TN;
- 2) заземляющий проводник, присоединённый к заземляющему устройству электроустановки, в системах IT и TT;
- 3) заземляющий проводник, присоединённый к заземлителю повторного заземления на вводе в здание (если есть заземлитель);
- 4) металлические трубы коммуникаций, входящих в здание: горячего и холодного водоснабжения, канализации, отопления, газоснабжения и т. п.
- 5) металлические части каркаса здания;
- 6) металлические части систем вентиляции и кондиционирования;
- 7) заземляющее устройство системы молниезащиты;
- 8) заземляющий проводник функционального (рабочего) заземления, если такое имеется и отсутствуют ограничения на присоединение сети рабочего заземления к заземляющему устройству защитного заземления;
- 9) металлические оболочки телекоммуникационных кабелей.

Уравнивание потенциалов достигается конструкторскими решениями, без применения каких-либо устройств автоматики, поэтому это одно из наиболее надёжных и эффективных технических защитных мероприятий.

Рассмотрим некоторые примеры таких решений.

Пример 1. Пусть необходимо выполнить ремонтную работу на контактном проводе, находящемся под напряжением 3 кВ.

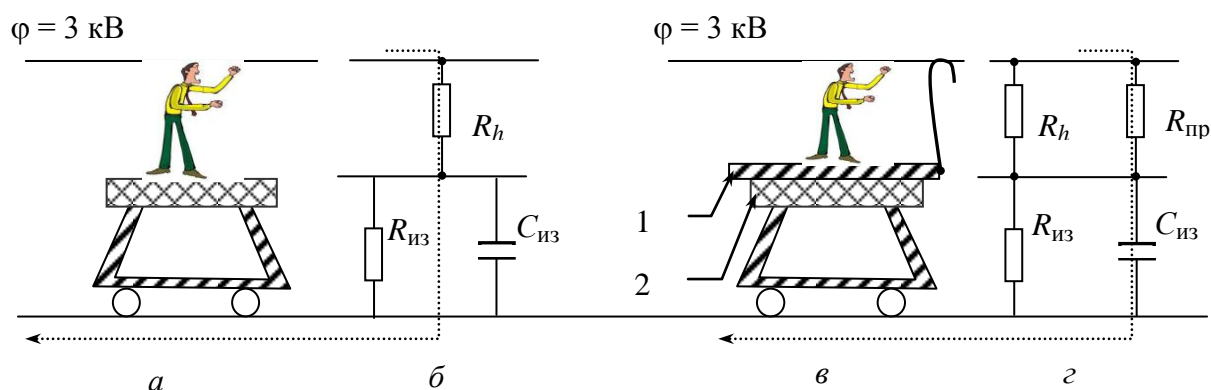


Рис. 12.3. Схемы анализа прикосновения к контактному проводу:
 а – с изолирующей платформы; б – схема замещения; в – с изолирующей платформой и металлического листа, соединённого с проводом; г – схема замещения

Если человека изолировать от земли (рис. 12.3, а), то независимо от качества и размеров изоляционной прокладки (даже при чрезвычайно высоком её сопротивлении) сохраняется опасность поражения человека емкостным током (рис. 12.3, б).

Метод уравнивания потенциалов предусматривает установку металлического листа 1 на верхней поверхности изоляционной конструкции 2 и, после подъёма на него человека – соединение этого листа гибким проводником с объектом работы (рис. 12.3, в). Так как сопротивление проводника несоизмеримо меньше активного и емкостного сопротивлений изоляционной прокладки, потенциал рук оказывается практически равным потенциалу ног человека (всё напряжение падает на сопротивлении $R_{из}$). При этом напряжение прикосновения $U_{пр} = 0$. Этот метод можно также назвать методом шунтирования человека с помощью проводника, подключаемого параллельно ему.

После окончания работы необходимо, не сходя с металлического листа, отсоединить гибкий проводник от высоковольтной части и сбросить его на землю для разряда ёмкости изоляции

Пример 2. Строительный кран находился вблизи мощной передающей радиоантенны. Стальной трос крана и земля с теоретической точки зрения представляют собой разомкнутый виток, находящийся в переменном электромагнитном поле. Поэтому гак крана по отношению к земле приобретал электрический потенциал, значение которого зависит от частоты электромагнитного поля и угла поворота плоскости витка относительно антенны (в имевшем место реальном случае оно изменялось в диапазоне 10...1200 В). В этих условиях возможность выполнения любых строительных работ исключалась, так как рабочие получали удар электрическим током при каждом прикосновении к гаку или к подвешенному на нём грузу.

Задача обеспечения безопасности выполнения работ была решена с помощью метода уравнивания потенциалов. Для этого чулок из металлической сетки надевался на рукавицы рабочего, в сапоги под стельку также была положена металлическая сетка. Все детали электрически соединены гибким проводником, расположенным внутри рабочей одежды. При каждом прикосновении к гаку крана потенциалы рук и ног рабочего оказывались равными, то есть напряжение, наведённое на гаке, прикладывалось к подошвам сапог и уже не представляло опасности для жизни человека.

Защитное электрическое разделение сетей и цепей. Используется для снижения вероятности повреждения изоляции между обмотками трансформатора в электроустановках напряжением до 1 кВ за счёт отделения одной электрической сети или цепи от других с помощью двойной изоляции, основной изоляции и защитного экрана или усиленной изоляции (см. рис. 12.1, а, б, в, г, д).

Принцип защиты в данном случае основан на преобразовании одной сети или цепи, опасной для человека, в другую, относительно безопасную с помощью разделительного трансформатора (трансформатора, предназначенного (по ПУЭ п.1.7.31) для отделения сети, питающей электроприёмник, от первичной электрической сети, а также от сети заземления или зануления). Разделительные трансформаторы должны удовлетворять специальным техническим условиям в отношении повышенной надёжности конструкции и повышенных испытательных напряжений.

Целесообразно применять защитное разделение сетей в цепях питания электроприёмников, имеющих небольшое сопротивление изоляции. Гальванически отделив такой электроприёмник, получают достаточно высокий уро-

вень сопротивления изоляции первичной сети; при этом также существенно уменьшаются значения токов однофазного замыкания. В сетях с глухим заземлением нейтрали напряжение прикосновения почти равно фазному, то есть ток через тело человека всегда будет смертельно опасным. В сетях с изолированной нейтралью напряжением 220/380 В при большой ёмкости или низком сопротивлении изоляции фаз относительно земли значение напряжения прикосновения также достигает 220 В. При однофазном прикосновении к сети после разделительных трансформаторов человек может оказаться в безопасности, если токоведущие части сети не имеют заземлений, обладают малой ёмкостью и большим сопротивлением изоляции относительно земли.

Разделительные трансформаторы применяются не только в сетях TN, но и в сетях IT. Идея защиты заключается в гальванической развязке протяжённой сети на отдельные участки, содержащие минимальное количество приёмников электроэнергии. Когда один приёмник электроэнергии получает питание от индивидуального источника (разделительного трансформатора), формируется сеть “вторичная обмотка трансформатора – электроприёмник”, имеющая низкое значение ёмкости и высокое значение сопротивления изоляции. За счёт изменения параметров сети получают значительное снижение напряжения прикосновения (см. разд. 6, где рассмотрены условия безопасности для понижающих трансформаторов).

Разделительные трансформаторы применяют, как правило, при работе с переносными электроустройствами в помещениях с повышенной опасностью или особо опасных условиях. Например, при работе в замкнутых объёмах типа цистерн электроинструментами с двойной изоляцией сохраняется опасность поражения током в случае прикосновения к жиле питающего провода. ГОСТ 12.2.013-75 требует применять разделительный трансформатор, вынесенный за пределы помещения, в котором выполняется работа.

Штепсельные розетки для питания бытовых и других электроприборов в помещениях с повышенной опасностью также следует запитывать от разделяющих трансформаторов (например, пассажирские каюты на судах, ваннные комнаты и т. п.).

Однофазное защитное замыкание (шунтирование). Устройства защитного замыкания предназначены для защиты человека от поражения электрическим током в случае прямого или косвенного прикосновения к токоведущим частям, а также для снижения пожарной опасности однофазных за-

мыканий на землю в СИН. Принцип действия однофазного замыкания (шунтирования) на землю в системе IT подобен защитному заземлению – уменьшение разности потенциалов между фазой, к которой прикоснулся человек, и землёй.

Чувствительный орган устройства однофазного шунтирования выявляет факт однофазного прикосновения человека, определяет фазу, которой человек коснулся, и выдаёт сигнал силовому органу на замыкание этой фазы на землю. Упрощённая схема устройства однофазного шунтирования приведена на рис. 12.1, *е*.

Реле К настраиваются на напряжение срабатывания, превышающее фазное напряжение. В нормальном режиме работы сети, когда нет повреждений изоляции и нет однофазного прикосновения, напряжения фаз относительно земли равны фазному, при этом реле не срабатывают, их контакты разомкнуты. При прикосновении человека (или замыканиях фазы на землю) за счёт перекаса напряжений включаются контакты реле, подключённые к двум другим фазам относительно земли. За счёт малого сопротивления заземления, к которому подключены контакты, напряжение фазы уменьшается до безопасного. Работа оборудования при этом не прекращается, а задачей электротехнического персонала является быстро отыскать место повреждения фазы либо причину срабатывания устройства. Кнопка K_H предназначена для разрыва цепи замыкания и восстановления схемы устройства в первоначальное рабочее состояние для того, чтобы исключить возможность попадания другого человека под линейное напряжение при касании другой фазы.

Устройства защитного замыкания применяют в сетях, изолированных от земли, в тех случаях, когда по условиям эксплуатации не допускается снятие напряжения с приёмников электроэнергии. Для обеспечения защиты достаточно установки одного устройства на всю электрическую сеть (гальванически изолированный участок сети).

Компенсация ёмкостных токов. В разветвлённых трёхфазных сетях с изолированной нейтралью сила тока однофазного прикосновения к токоведущим частям (или же тока однофазного замыкания на землю) в основном определяется значением ёмкости фаз относительно земли: $I_{\text{зам}} \approx 3\omega C_{\text{ф}} U_{\text{ф}}$. Влияние ёмкости существенно снижается, если установить в сети компенсатор ёмкостных токов – регулируемый дроссель (катушку индуктивности), включаемый между нейтральной точкой сети и землёй (см. рис. 12.1, *ж*).

Ток, протекающий через место замыкания фазы на землю (или человека), имеет три составляющие, определяемые в зависимости от пути возвращения в источник электроэнергии, – активную, емкостную и индуктивную. Так как емкостной ток опережает напряжение по фазе на 90° , а индуктивный

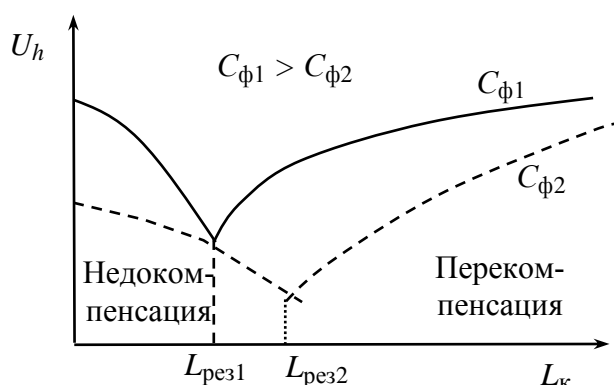


Рис. 12.2. Зависимость напряжения прикосновения от согласованности индуктивности компенсатора с ёмкостью сети

ток отстает по фазе от напряжения на 90° , эти два тока оказываются в противофазе и могут взаимно компенсировать друг друга. Условие полной компенсации выполняются при значении индуктивности $L_{рез} = 1/(3\omega^2 C_\phi)$. Напряжение фазы А относительно земли при этом условии имеет минимум (рис. 12.2).

Недостатками такого средства защиты являются необходимость

точной подстройки индуктивности (могут быть либо недокомпенсация, либо перекомпенсация), а также то, что реальные устройства компенсации (дроссели) имеют дополнительную активную проводимость $1/R_{0L}$, определяемую их добротностью, которая ухудшает условия безопасности по сравнению с идеальным вариантом дросселя:

$$\dot{U}_{Az} = U_\phi \frac{3/R_\phi + 1/R_{0L}}{3/R_\phi + 1/R_{0L} + 1/R_{зам}}.$$

Блокировка. Предотвращает ошибочные действия оператора и исключает возможность доступа к токоведущим частям, находящимся внутри защитной оболочки или за ограждением, пока они находятся под напряжением. Принцип блокировки заключается в том, что любое вскрытие защитной оболочки (открывание крышек или снятие кожухов) сопровождается разрывом электрической цепи и автоматическим отсоединением защищаемого изделия от источника напряжения. В других случаях блокировка делает возможным снятие кожуха или открывание дверцы лишь после предварительного снятия напряжения питания. Различают электрические, механические и электромагнитные блокировки.

Электрозащитные средства. Могут быть отнесены к средствам индивидуальной защиты при работе в электроустановках. К ним относятся:

- изолирующие и электроизмерительные клещи;
- изолирующие штанги (оперативные, измерительные, для наложения заземления);
- указатели напряжения (с газоразрядной лампой, бесконтактные, импульсного типа, с лампой накаливания);
- бесконтактные сигнализаторы наличия напряжения;
- изолированный инструмент;
- диэлектрические перчатки, боты и галоши, ковры, изолирующие подставки;
- защитные ограждения (щиты, ширмы, изолирующие накладки, колпаки);
- переносные заземления;
- устройства и приспособления для обеспечения безопасности труда при проведении испытаний и измерений в электроустановках (указатели напряжения для проверки совпадения фаз, устройства для прокола кабеля, указатели повреждения кабелей и т. п.);
- прочие средства защиты, изолирующие устройства и приспособления для ремонтных работ под напряжением (полимерные и гибкие изоляторы; изолирующие лестницы, канаты, вставки телескопических вышек и подъёмников; штанги для переноса и выравнивания потенциала; гибкие изолирующие покрытия и накладки).

Изолирующие электрозащитные средства делятся на основные и дополнительные. В качестве *основного* может применяться изолирующее защитное средство, изоляция которого длительно выдерживает рабочее напряжение электроустановки и которое позволяет работать на токоведущих частях, находящихся под напряжением. *Дополнительным* является изолирующее электрозащитное средство, которое само по себе не может при данном напряжении обеспечить защиту от поражения электрическим током, но дополняет основное средство защиты, а также служит для защиты от напряжения прикосновения и напряжения шага.

К основным электрозащитным средствам в электроустановках напряжением выше 1000 В относятся:

- изолирующие штанги всех видов;
- изолирующие и электроизмерительные клещи;
- указатели напряжения;

- устройства и приспособления для обеспечения безопасности труда при проведении испытаний и измерений в электроустановках (указатели напряжения для проверки совпадения фаз, устройства для прокола кабеля, указатели повреждения кабелей и т. п.);

- прочие средства защиты, изолирующие устройства и приспособления для ремонтных работ под напряжением в электроустановках напряжением 110 кВ и выше (полимерные изоляторы, изолирующие лестницы и т. п.).

Основные электрозащитные средства в электроустановках до 1000 В:

- изолирующие штанги;
- изолирующие и электроизмерительные клещи;
- указатели напряжения;
- диэлектрические перчатки;
- изолированный инструмент.

К дополнительным электрозащитным средствам в электроустановках напряжением выше 1000 В относятся:

- диэлектрические перчатки;
- диэлектрические боты;
- диэлектрические ковры;
- изолирующие подставки и накладки;
- изолирующие колпаки;
- штанги для переноса и выравнивания потенциала.

К дополнительным электрозащитным средствам для работы в электроустановках напряжением до 1000 В относятся:

- диэлектрические галоши;
- диэлектрические ковры;
- изолирующие подставки и накладки;
- изолирующие колпаки.

Защитные свойства обеспечиваются за счёт ограничения тока утечки через изолирующую конструкцию и последовательно включённого с ней тела человека до безопасного уровня, поэтому основным требованием к электрозащитным средствам является обеспечение необходимо высокого значения сопротивления изоляции при заданном рабочем напряжении.

Необходимость применения электрозащитных средств диктуется условиями выполнения работ, такими, как невозможность отключения рабочего

напряжения с открытых токоведущих частей, на которых выполняются работы, или расположенных в опасной близости от места работ, недостаточная надёжность основных средств защиты при косвенном прикосновении.

13. БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ РАБОТЕ С ПЕРЕНОСНЫМИ ЭЛЕКТРОПРИЁМНИКАМИ

К переносным электроприёмникам в ПУЭ отнесены такие, которые могут находиться в руках человека в процессе их эксплуатации (ручной электроинструмент, переносные бытовые электроприборы, переносная радиоэлектронная аппаратура, электрические лампы для освещения и т. п.). Питание этих электроприёмников переменного тока следует выполнять от сети напряжением не выше 380/220 В.

В зависимости от категории помещения по уровню опасности поражения людей электрическим током для защиты при косвенном прикосновении в цепях, питающих переносные электроприёмники, могут быть применены автоматическое отключение питания, защитное электрическое разделение цепей, сверхнизкое напряжение, двойная изоляция. Случаи необходимости применения электрозащитных средств при использовании в работе электроинструмента и ручных электрических машин различных классов приведены в табл. 13.1.

При применении автоматического отключения питания металлические корпуса переносных электроприёмников, за исключением электроприёмников с двойной изоляцией, должны быть присоединены к нулевому защитному проводнику в системе TN или заземлены в системе IT, для чего должен быть предусмотрен РЕ-проводник, расположенный в одной оболочке с фазными проводниками (третья жила кабеля или провода – для электроприёмников однофазного и постоянного тока, четвёртая или пятая жила – для электроприёмников трёхфазного тока), присоединяемый к корпусу и к защитному контакту вилки штепсельного соединителя. РЕ-Проводник должен быть медным, гибким; его сечение должно быть равно сечению фазных проводников. Использование для этой цели нулевого рабочего N-проводника, в том числе расположенного в общей оболочке с фазными проводниками, не допускается.

Для дополнительной защиты от прямого прикосновения и при косвенном прикосновении штепсельные розетки с номинальным током не более 20 А наружной установки, а также внутренней установки, но к которым мо-

гут быть подключены переносные электроприёмники, используемые вне зданий либо в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных, должны быть защищены УЗО с отключающим током не более 30 мА.

Таблица 13.1

Место проведения работ	Класс защиты	Необходимость применения электрозащитных средств
Помещения без повышенной опасности, помещения с повышенной опасностью	I	С применением хотя бы одного из электрозащитных средств (диэлектрических перчаток, ковров, подставок, галош). Без применения электрозащитных средств, если при этом только один электроприёмник получает питание от разделительного трансформатора или через УЗО
	II	Без применения электрозащитных средств
	III	То же
Особо опасные помещения	I	Не допускается применять
	II	Без применения электрозащитных средств
	III	То же
Вне помещений (наружные работы)	I	Не допускается применять
	II	Без применения электрозащитных средств
	III	То же
При наличии особо неблагоприятных условий (в металлических ёмкостях с ограниченной возможностью перемещения и выхода)	I	Не допускается применять
	II	С применением хотя бы одного из электрозащитных средств. Без применения электрозащитных средств, если при этом только один электроприёмник получает питание от разделительного трансформатора или через УЗО
	III	Без применения электрозащитных средств

При применении защитного электрического разделения цепей в стеснённых помещениях с проводящим полом, стенами и потолком и в помещениях с особой опасностью, каждая розетка должна питаться от индивидуального разделительного трансформатора или от его отдельной обмотки.

14. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково основное правило защиты от поражения человека электрическим током?
2. Какие технические средства обеспечения электробезопасности используются для защиты при прямом прикосновении?
3. Какие технические средства обеспечения электробезопасности используются для защиты при непрямом (косвенном) прикосновении?

4. Каковы основные подходы к выбору технических средств защиты от поражения электрическим током?
5. Какими основными методами обеспечивается ограничение напряжения между проводящими поверхностями?
6. Какими основными методами обеспечивается ограничение времени воздействия тока?
7. Каковы особенности применения переносных приёмников?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в учебном пособии вопросы применения технических средств защиты от поражения электрическим током касаются любого технического специалиста. Во всем мире электротравматизм и в быту, и на производстве остается актуальной проблемой, требующей как правильного применения известных средств защиты, так и поиска новых путей решения.

Развитие новых технологий, применение новых изоляционных материалов позволяют снижать риск возникновения аварийных ситуаций в электроустановках, но в то же время растет энерговооруженность производств, расширяется ассортимент электроприборов в пользовании населения, что увеличивает вероятность попадания человека в цепь электрического тока. От грамотных действий разработчиков и пользователей электротехнических и радиоэлектронных изделий зависит, будет ли электроэнергия служить человеку, или всё обернется бедой.

Авторы пособия уверены, что полученные в результате изучения вопросов электробезопасности знания пригодятся всем студентам и в целях обеспечения личной безопасности, безопасности окружающих людей, и в целях безопасности будущих пользователей продукции, которую ещё предстоит разрабатывать.

Список рекомендуемой литературы

Иванов Е. А. Методы контроля изоляции судовых электроэнергетических систем: Учеб. пособие/ Гос. морская акад. им. адмирала С. О. Макарова. Л., 1999.

ПОТ РМ-016-2001 Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок.

Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. М.: ИНФРА-М, 2004.

Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: Главгосэнергонадзор, 2003.

Оглавление

Список условных обозначений и сокращений	3
Введение.....	4
1. Основные термины и определения.....	6
2. Опасность электрического тока и его нормирование.....	9
3. Требования к выбору средств защиты	18
4. Краткая характеристика электрических систем.....	27
5. Классификация электроприёмников по степени защиты.....	31
6. Использование малых напряжений питания	33
7. Обеспечение недоступности токоведущих частей	36
8. Изоляция токоведущих частей и её контроль	39
9. Защитное заземление	45
10. Зануление	54
11. Защитное отключение.....	64
12. Другие дополнительные средства защиты	69
13. Безопасность при работе с переносными электроприёмниками	81
14. Контрольные вопросы	82
Заключение	83
Список рекомендуемой литературы	83

Буканин Владимир Анатольевич, Ковбасин Алексей Александрович,
Павлов Владимир Николаевич, Трусов Александр Олегович

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

Учебное пособие

Редактор И. Б. Сенишева

Подписано в печать 08.12.2007. Формат 60х84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура “Times New Roman.” Печ. л. 5.25. Тираж 1250 экз. Заказ 180.

Издательство СПбГЭТУ “ЛЭТИ”

197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5