

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Рекомендовано

*ФГАУ «Федеральный институт развития образования»
к использованию в качестве учебного пособия в учебном процессе
образовательных учреждений, реализующих программы ВО
по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность».
Регистрационный номер рецензии 198 от 23 июня 2016 г.*

Москва
2017

УДК 621.3:331.4
ББК 31.29н
К89

Рецензент: главный инженер Свердловской железной дороги — филиала ОАО «РЖД» *И.О. Набойченко*

Кузнецов К.Б.

К89 Основы электробезопасности в электроустановках: учеб. пособие. — М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. — 495 с. ISBN 978-5-89035-966-7

Рассмотрены основные вопросы защиты электротехнического персонала электроустановок от вредного и опасного воздействия электрического тока и электромагнитных полей. Изложены специфика условий работы обслуживания и особенности его обслуживания на железнодорожном транспорте. Приведены технические средства защиты в электроустановках, их характеристики, конструктивные особенности и порядок расчета. Предложены новые конструктивные решения систем защиты электротехнического персонала от вредного и опасного воздействия электрических токов и электромагнитных полей. Эффективность решений демонстрируется с помощью новых методов расчета, моделирования и опыта применения в реальных условиях.

Предназначено для студентов вузов железнодорожного транспорта направлений 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов», специальности «Электроснабжение железных дорог», 23.05.03 «Подвижной состав железных дорог», и новых направлений подготовки бакалавров и магистров 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», 20.03.01 «Техносферная безопасность»; может быть полезно для аспирантов, научных работников, руководителей и специалистов в области эксплуатации и проектирования низковольтных и высоковольтных электроустановок, а также для студентов колледжей и техникумов.

УДК 621.3:331.4
ББК 31.29н

© Кузнецов К.Б., 2017
© ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017

ISBN 978-5-89035-966-7

Как ни чудесны законы и явления электричества, которые мы наблюдали в мире неорганического вещества и неживой природы, интерес, который они представляют, вряд ли может сравниться с тем, что вызывает та же сила в соединении с нервной системой и жизнью.

М. Фарадей

Все вещества — яды и все вещества — лекарства — все дело в дозе.

Парацельс

Электромагнитные поля лечат, электромагнитные поля и калечат — все дело в дозе.

К.Б. Кузнецов

Предисловие

Внедрение электричества во все сферы жизни и деятельности человека было одним из приоритетных направлений технической политики всех без исключения органов власти и руководителей России в XX в., благодаря чему электроэнергетика нашла широкое применение в быту, технике, транспорте и других важнейших отраслях народного хозяйства РФ.

В свою очередь, широкое внедрение средств электроэнергетики в хозяйственную деятельность человечества привело к созданию и распространению новых систем, конструкций и устройств (т.е. к возникновению электроэнергетической инфраструктуры): источников электроэнергии, систем ее передачи и распределения (линий электропередачи, трансформаторных и преобразовательных подстанций и др.), линий электрифицированного железнодорожного транспорта, электроустановок потребителей электроэнергии, устройств электросвязи и т.п., — а также к появлению многочисленных и разнообразных источников электромагнитного поля (ЭМП), характеристики которого существенно отличаются от характеристик естественного ЭМП Земли высокими уровнями напряженностей и другими показателями. Такая сложная инфраструктура приводит к необходимости частого и долговременного контакта технических средств электроэнергетики с окружающей природной средой и человеком.

В книге большое внимание уделено средствам электрификации объектов железнодорожного транспорта, к которым, кроме специальных электроэнергетических средств магистральных линий и подвижного состава, относятся и специализированные предприятия промышленного железнодорожного транспорта, в том числе электроустановки погрузочно-разгрузочных комплексов, сортировочных станций, вокзалов с системами обслуживания пассажиров, а также различных инфраструктурных организаций по ремонту локомотивов, вагонов, средств эксплуатации и ремонта устройств автоматики и связи, пути и др.

До середины XX в. в СССР проблемы электрификации рассматривались, как правило, только с точки зрения повышения эффективности и единичной мощности агрегатов, увеличения производительности и снижения затрат ручного труда. В какой-то мере в этот период изучались проблемы электробезопасности (В.В. Бургсдорф, А.Л. Вайнер, Т.В. Коляда, В.Е. Манойлов, К.Р. Малоян, М.Р. Найфельд, А.Б. Ослон, А.И. Сидоров, Л.Е. Эбин, А.И. Якобс и др.), в то же время такие проблемы, как изучение вредного воздействия ЭМП на окружающую среду, практически не возникали.

С середины 50-х гг. того же века интенсивное развитие электрификации, средств электрической связи, а также атомной энергетики привело к необходимости исследований как в области опасного воздействия электрического тока на организм животного и человека, так и в области вредного воздействия ЭМП и других, в частности, ионизирующих излучений.

Большой вклад в развитие фундаментальных исследований в этой области внесли и вносят ученые железнодорожного транспорта: М.П. Бадер, С.П. Власов, А.П. Киселев, Б.И. Косарев, В.Н. Пупынин, Ю.Г. Сибаров и др. (МГУ-МИИТ), А.Б. Косарев, А.В. Котельников, М.И. Михайлов, И.В. Павлов, М.П. Ратнер и др. (ВНИИЖТ), ученые ВНИИИЖГ, СПГУПС, УРГУПС, ОмГУПС, других университетов, академий и институтов железнодорожного транспорта.

Воздействие электрического тока на живую ткань широко используется в медицине как при биофизических исследованиях состава крови и тканей, так и для лечения при подавлении различных болезнетворных процессов в организме. Большой вклад в определение пороговых значений электрического тока, вызывающих

фибрилляцию сердца, внесла лаборатория АМН СССР под руководством чл.-корр. АМН В.А. Неговского, а влияние ЭМП на рост растений и развитие живых организмов изучал Институт экологии растений и животных РАН, Свердловский инженерно-педагогический институт (СИПИ г. Екатеринбург).

Многие аспекты проблем воздействия электромагнитного поля на живые организмы были еще далеко не изучены, не выработаны критерии и допускаемые нормы воздействия различных видов ЭМП на окружающую среду, поэтому задача автора в описании воздействия на живую ткань отдельных видов ЭМП на уровне клетки представлялась невыполнимой.

В то же время автор исходил из аксиомы, что любое техногенное воздействие на окружающую среду, многократно превышающее уровень естественного природного воздействия, является аномальным вредным воздействием.

При рассмотрении проблем электрификации железных дорог до недавнего времени изучалось только мешающее и опасное воздействие ЭМП на сооружения и устройства. Можно найти только единичные научно-исследовательские работы на железнодорожном транспорте, чаще всего выполняющие заказ исполнительных и руководящих органов отрасли на доказательство безопасности и безвредности существующих систем.

Задача этой книги — показать:

- физические явления, сопутствующие электромагнитному загрязнению окружающей среды электрическими установками;
- существующие методы нормирования опасного и вредного воздействия электромагнитных полей;
- применяемые технологии и технические средства защиты человека от вредного и опасного воздействия ЭМП;
- особенности решения проблем электробезопасности электроустановок (ЭУ).

Прошедшее десятилетие внесло существенные коррективы в российскую нормативно-правовую базу в области электрической безопасности эксплуатации электроустановок, установлены новые технические требования и разработаны новые конструктивные решения. Это касается, прежде всего, применения в электроэнергетике принципов технического регулирования безопасности продукции, процессов производства, эксплуата-

ции, перевозки, реализации, хранения и утилизации, определяемого Федеральным законом от 27.12.2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», т.е. применения норм безопасности для всех составляющих производственного процесса.

Последнее десятилетие характеризуется большим интересом специалистов и широкой общественности к проблеме вредного воздействия ЭМП на человека. Это связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, в конце 80-х гг. прошлого столетия в ряде стран осуществлено открытие в области электробиофизики, установившее, что электромагнитные поля промышленной частоты оказывают вредное воздействие на организм человека. Во-вторых, в практику повседневной жизни широко вошли средства коммуникации, использующие для передачи информации высокочастотное ЭМП, прежде всего мобильные средства связи.

Известно, что осуществление технического регулирования производственных процессов в странах Евросоюза в середине 80-х гг. XX в., включая инвестирование средств на перевооружение технологических процессов и производств, способствовало существенно снижению случаев травматизма на производстве, включая травмы при эксплуатации электроустановок. Так смертельный производственный травматизм при эксплуатации электроустановок в этих странах практически отсутствует. К сожалению, наша страна до сих пор является «лидером» по численности и тяжести травматических случаев в электроэнергетике. Только в РАО «ЕЭС» в 2009 г. произошло 80 электрических травм, из которых 34 оказались смертельными, в ОАО «РЖД» только в 2012 г. произошло 12 смертельных электрических травм. Указанные примеры показывают, что в Российской Федерации проблема безопасной эксплуатации электроустановок является чрезвычайно актуальной.

Произошли значительные изменения в органах государственного управления, получили развитие правительственные структуры исполнительной власти, включая надзорные органы по контролю различных сторон безопасности в производственной деятельности.

В данном издании учтены нововведения и новации в вопросах технических решений, эксплуатации и научных исследований в области электробезопасности эксплуатации электроустановок, а также изменения в нормативно-правовых документах. В частности рассматриваются новые подходы по дозовым

принципам нормирования электромагнитных воздействий ЭМП электроустановок на человека и вероятностный подход с оценкой риска опасных и вредных воздействий.

В книге даются материалы по эксплуатации ЭУ организаций любого профиля деятельности, в необходимых случаях рассматриваются особенности специальных электроустановок электрической тяги, применяемых на промышленном и магистральном железнодорожном транспорте.

Материал книги соответствует программам курсов «Безопасность жизнедеятельности» для студентов технических специальностей вузов, курсу «Производственная безопасность» и «Электробезопасность на транспорте» специальности 280102 «Безопасность технологических процессов и производств», курсу «Электробезопасность», входящего в учебные планы подготовки специалистов по специальности 190401 «Электроснабжение железных дорог». При подготовке бакалавров и магистров по дисциплине «Электромагнитная безопасность» направления подготовки 280700 «Техносферная безопасность» (профиль «Охрана труда и промышленная безопасность») может являться учебником.

Книга предназначена для широкого круга лиц, профессионально занимающихся проблемами безопасной эксплуатации электрических установок, включая научных работников. Может быть использована в качестве учебника или учебного пособия для студентов электроэнергетических специальностей, а также для студентов, обучающихся по двухуровневой подготовке для получения квалификации бакалавр и магистр по электротехническому и электроэнергетическому профилю. Материал книги также может представлять интерес для широкого круга специалистов, участвующих в проектировании и эксплуатации электроустановок железнодорожного транспорта.

Автор будет благодарен всем специалистам, использующим это издание в своей практической деятельности, за замечания и предложения по содержанию книги, которые можно направлять как в редакцию, так и автору по электронной почте: kobokuz@gmail.com.

Введение

Основные виды воздействия ЭМП на человека. *Электробезопасность* — система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества. Электробезопасность должна обеспечиваться конструкцией электроустановок (ЭУ), применением технических способов и средств защиты, выполнением организационных и технических мероприятий при производстве работ в ЭУ или при обслуживании потребителей электроэнергии.

Вредное или опасное воздействие электрического тока может быть определено в соответствии с характеристикой вредного и опасного производственных факторов:

- *вредный производственный фактор* (ВПФ) — производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению работоспособности;
- *опасный производственный фактор* (ОПФ) — производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к травме или другому внезапному резкому ухудшению здоровья.

В реальной жизни при широком проникновении электрических сетей не только в производство, но и в быт, правильнее утверждать об опасном и вредном воздействии электрических установок на окружающую среду, включая животный мир и человека, и, соответственно, необходимо говорить о вредных и опасных факторах ЭУ.

Очевидно, что *вредный фактор* характеризуется, как правило, большой продолжительностью воздействия и меньшей опасностью для здоровья (заболеванием, которое излечимо, и снижением работоспособности, которая, по существу, может быть восстановлена), т.е. малым уровнем воздействия в течение длительного периода времени. Вредным фактором при эксплуатации ЭУ является электромагнитное поле (ЭМП), окружающее любые работающие ЭУ, а человек, использующий или обслуживающий эти ЭУ, оказывается в зоне его распространения. Это усугубляется тем,

что у человека нет органов чувств или рецепторов, реагирующих на наличие ЭМП.

Опасный фактор характеризуется малой продолжительностью периода воздействия (внезапностью) и большей опасностью для здоровья (травма или другое внезапное резкое ухудшение здоровья, которые могут быть и с летальным исходом), т.е. такой фактор, высокий уровень воздействия которого происходит в течение короткого периода времени. К опасным факторам в электроустановках следует отнести ситуации случайного прикосновения человека к токоведущим частям ЭУ, ожоговое воздействие электрической дуги, воздействие опасных факторов пожара, вызванных дугой или нагревом токоведущих частей ЭУ, а также искрообразованием при разрядах статического электричества.

Такое разделение факторов условно, как и сами понятия: длительный и короткий период времени или высокий и низкий уровень воздействия. Такое разделение имеет смысл с точки зрения анализа процессов возникновения и распространения факторов, их физиологического воздействия на организм человека, нормирования допустимых уровней, а также при разработке и применении технических защитных средств и мероприятий.

Таким образом, можно определить:

Вредным фактором электроустановки (ВФ ЭУ) является высокий уровень ЭМП в пространстве, длительное воздействие которого на организм человека в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению работоспособности.

Опасным фактором электроустановки (ОФ ЭУ) является высокий уровень параметров ЭМП на конструкциях электроустановки, кратковременное воздействие которого в ситуации случайного прикосновения к ним приводит к электрической травме (электротравме) или другому внезапному резкому ухудшению здоровья.

В понятие *случайное прикосновение* здесь вкладывается не только неправильные действия человека, но и любые аварийные режимы, возникающие в ЭУ, приводящие к ситуации случайного прикосновения к их токоведущим частям. Например, ситуация электрического пробоя изоляции в результате ее старения, увлажнения или повреждения на металлический корпус электрического аппарата, которого касается человек. В практике применения нормативных правовых документов (Правила устройства электроустано-

вок) в настоящее время эти ситуации подразделяются на *прямое* и *косвенное* прикосновения.

Электромагнитные поля, воздействующие на человека, по степени и своеобразию воздействия на живую клетку условно можно подразделить на *электрическое* поле и *магнитное* поле.

Каждая из этих разновидностей электромагнитного поля, в свою очередь, может иметь специфический характер. Так, можно выделить следующие состояния электрического поля (ЭП):

- электростатическое поле электрических зарядов;
- электрическое поле ЭУ постоянного тока;
- электрическое поле ЭУ переменного тока;
- электрическое поле ЭУ с частотами звукового диапазона.

При больших частотах и малой длине волны электромагнитного поля его трудно рассматривать в виде отдельных составляющих: электрической и магнитной. В этом случае говорят об электромагнитном излучении, которое оценивается комплексно. К таким излучениям относятся:

- ультракоротковолновое излучение (УКВ-излучение);
- высокочастотное и сверхвысокочастотное излучение (ВЧ и СВЧ-излучение);
- ультрафиолетовое излучение (УФ-излучение);
- рентгеновское излучение (R-излучение);
- γ -излучение (гамма-излучение).

Перечисленные виды электромагнитного излучения следует отнести к ионизирующим излучениям, т.е. излучениям, распространение которых в окружающей среде приводит к ее ионизации или разрушению естественной равновесной атомной структуры вещества. Вредное воздействие перечисленных излучений может оцениваться как проникающая радиация.

Движущиеся заряды, электрические токи ЭП, а также постоянные магниты создают магнитное поле.

Магнитное поле представляет собой упорядоченное построение электронных орбит атомов относительно ядра под действием внешнего электрического поля.

Как было сказано выше, электрическое и магнитное поля являются составляющими единого электромагнитного поля. Это определяется их взаимным возникновением и существованием: движущиеся электрические заряды создают магнитное поле, а дви-

жущееся магнитное поле создает движущиеся заряды электрического поля.

Степень влияния ЭП на электронные орбиты атомов у различных веществ различна и определяется *магнитными свойствами вещества*. По магнитным свойствам все вещества подразделяются на парамагнетики, диамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферриты.

Парамагнетики (например, Na, K, Rb, Cs, Mg, Al, Mn, большая часть стекол, газообразный и жидкий кислород, растворы солей железа и др.) — вещества со слабыми магнитными свойствами. С исчезновением внешнего поля исчезает и намагниченность парамагнетиков, т.е. у них нет остаточного магнетизма.

Диамагнетики (например, Ge, Li, Na, Cu, другие одновалентные металлы, Hg, W, вода, молекулярный водород, щелочно-галлоидные кристаллы и многие другие) — вещества, которые характеризуются тем, что при наличии внешнего поля появляется результирующий магнетизм (магнитный момент), направленный против поля.

Ферромагнетики (например, железо, сталь, кобальт, никель и некоторые редкоземельные элементы) — вещества с большим проявлением магнитных свойств.

Антиферромагнетики (например, хром, α -марганец, MnO, NiO, CuCl₂, FeS и др.) — обширный класс веществ искусственного происхождения на основе ориентированного расположения их кристаллических решеток.

Ферриты (например, MnO, Fe₂O₃) — особые антиферромагнетики, обладающие значительным собственным магнитным моментом.

Очевидно, что в составе живой клетки имеются вещества в виде микроэлементов с различными магнитными и электрическими свойствами, которые различно реагируют на внешнее магнитное и электрическое поля.

Автор разделяет убеждение, что только глубокие исследования на клеточном уровне позволят наиболее точно и убедительно оценить воздействие всего многообразия электромагнитных полей на живые организмы, однако такое изучение входит в состав научного направления «Электробиофизика» и в данной работе затрагивается только фрагментарно.

В практике исследований в области электробезопасности сложилась ситуация, когда достаточно хорошо изучены критериальные

факторы воздействия на организм ОФ ЭУ и недостаточно изученными оказались критерии ВФ ЭУ.

ОФ ЭУ проявляются на практике случаями включения человека в электрическую цепь электроустановок путем непосредственного касания или контакта через электрическую дугу, через другие проводящие структуры и конструкции с частями ЭУ, находящимися в работе во включенном состоянии или, как принято говорить среди специалистов, — находящимися под напряжением. Эту ситуацию случайного прикосновения человека к токоведущим частям электроустановок иногда подразделяют на:

— прямое прикосновение, когда человек случайно касается оголенных токоведущих частей, находящихся под напряжением;

— косвенное прикосновение, когда человек при использовании ЭУ и прикасаясь к ее металлическому корпусу, попадает в ситуацию случайного прикосновения при аварийных режимах ЭУ, например при электрическом пробое рабочей изоляции на металлический корпус.

Опасные факторы электроустановки ощущаются как *раздражающее, болевое и тепловое* воздействие. Возбуждение живых тканей организма протекающим через него электрическим током, проявляющееся в непроизвольных судорожных сокращениях различных мышц тела, называют *электрическим ударом*. Часто действие электрического удара распространяется на весь организм человека из-за нарушения нормальной работы различных органов и систем, прежде всего нервной системы, сердца, легких.

Иногда негативное воздействие электрического удара на организм человека при случайном прикосновении к ЭУ переменного тока подразделяют на степени:

I — судорожное (едва осязаемое) сокращение мышц;

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

III — судорожное сокращение мышц, потеря сознания, но есть дыхание и пульс;

IV — потеря сознания и нарушение дыхания;

V — клиническая смерть, т.е. отсутствие сознания и пульса.

Вредные факторы ЭУ проявляются на практике невидимой и неосязаемой *проникающей радиацией* электромагнитного поля, которое воздействует на организм человека вблизи источников ЭМП

с возрастанием интенсивности по мере приближения к источнику или увеличения частоты (уменьшения длины волны) ЭМП.

Электробезопасность, как научный предмет, представляет собой одну из интереснейших проблем современной науки, потому что требует от исследователя глубоко проникнуть в проблемы электромагнитного поля, физиологии человека, биологии растений и животных, электрохимии и других отраслей знаний. Этим же обстоятельством объясняется сложность рассматриваемых проблем, которые, как правило, находятся на стыке наук и имеют еще много неисследованных областей.

В данной книге автор попытался интерпретировать сложные вопросы электробезопасности в форму, доступную для усвоения студентами.

При подготовке рукописи автор использовал фундаментальные научные труды русских ученых в области электробезопасности: С.П. Власова, А.А. Ворониной, П.А. Долина, Б.А. Князевского, А.П. Киселева, Т.В. Коляда, Б.И. Косарева, А.Б. Косарева, Р.Н. Карякина, В.И. Корольковой, В.Е. Манойлова, М.Р. Найфельда, А.И. Сидорова, В.И. Шуцкого, Е.Ф. Цапенко, А.И. Якобса и др. Часть рассмотренных вопросов автор обсуждал в разное время со своими учителями и коллегами: И.А. Беляевым, О.Ф. Горновым, В.О. Дегтяревым, А.П. Киселевым, Б.И. Косаревым, К.Г. Марквардтом, А.С. Мишариным, В.Н. Пупыниным, Ю.Г. Сибаровым, М.Г. Шалимовым, М.А. Шевандиным и др., многие идеи и мысли этих исследователей вошли в книгу.

Термины и определения. При изучении любого предмета для понимания концептуальных вопросов имеет большое значение применяемая терминология. На основе стандартов и нормативных документов ниже сформулированы основные термины, применяемые при изучении электробезопасности в электроустановках железнодорожного транспорта.

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 ее в другой вид энергии.

Замыкание на землю — случайное соединение находящихся под напряжением частей ЭУ с конструктивными частями, не изолированными от земли, или непосредственно с землей.

Замыкание на корпус — случайное соединение находящихся под напряжением частей ЭУ с их конструктивными частями, нормально не находящихся под напряжением.

Зона растекания тока замыкания на землю — зона земли, за пределами которой электрический потенциал, обусловленный токами замыкания на землю, может быть условно принят равным нулю.

Напряжение относительно земли (удаленной земли) — напряжение относительно точки земли, находящейся вне зоны растекания тока замыкания на землю.

Напряжение до прикосновения — напряжение между двумя точками электрической цепи, которых одновременно может касаться человек.

Напряжение прикосновения — напряжение между двумя точками электрической цепи, которых одновременно касается человек.

Напряжение шага — напряжение между двумя точками земли, обусловленное растеканием тока замыкания на землю, при одновременном касании их ногами человека.

Заземлением какой-либо части электроустановки называется преднамеренное электрическое соединение этой части с заземляющим устройством.

Защитное заземление — заземление частей электроустановки с целью обеспечения электробезопасности.

Рабочее (функциональное) заземление — заземление точки или точек токоведущих частей электроустановки, выполняемое для обеспечения работы электроустановки (не в целях электробезопасности).

Защитное зануление в электроустановках напряжением до 1 кВ — преднамеренное соединение открытых проводящих частей с глухозаземленной нейтралью генератора или трансформатора в сетях трехфазного тока, с глухозаземленным выводом источника однофазного тока, с заземленной точкой источника в сетях постоянно го тока, выполняемое в целях электробезопасности.

Защитный проводник (лат. РЕ) — проводник, предназначенный для целей электробезопасности, используется в электроустановках для защиты от поражения людей и животных электрическим током.

Нулевой защитный проводник (РЕ) — защитный проводник в электроустановках до 1 кВ, предназначенный для присоединения открытых проводящих частей к глухозаземленной нейтрали ис-

точника питания; используется для соединения с глухозаземленной нейтралью генератора или трансформатора в электроустановках до 1кВ.

Нулевой рабочий проводник (N) — проводник в электроустановках до 1 кВ, предназначенный для питания электроприемников и соединенный с глухозаземленной нейтралью генератора или трансформатора в сетях трехфазного тока, с глухозаземленным выводом источника однофазного тока, с глухозаземленной точкой источника в сетях постоянного тока.

Совмещенный нулевой защитный и нулевой рабочий проводник (PEN) — проводники в электроустановках напряжением до 1 кВ (система TN-C), совмещающие функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников.

Заземляющее устройство (ЗУ) — совокупность заземлителя и заземляющих проводников.

Заземлитель — проводящая часть или совокупность соединенных между собой проводящих частей, находящихся в электрическом контакте с землей непосредственно или через промежуточную проводящую среду.

Заземляющий проводник — проводник, соединяющий заземляемую часть (точку) с заземлителем.

Искусственный заземлитель — заземлитель, специально выполненный для целей заземления.

Естественный заземлитель — сторонняя проводящая часть, находящаяся в электрическом контакте с землей непосредственно или через промежуточную проводящую среду, используемая для целей заземления.

Сопротивлением (электрическим) заземляющего устройства называется отношение напряжения на заземляющем устройстве к току, стекающего с заземлителя в землю.

Эквивалентное удельное сопротивление земли с неоднородной структурой — удельное электрическое сопротивление земли с однородной структурой, в которой сопротивление заземляющего устройства имеет то же значение, что и в земле с неоднородной структурой.

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 присоединенных к заземляющему устройству,

или путем применения специальных покрытий земли; используется как метод снижения «напряжения прикосновения» или «шагового напряжения» между точками электрической цепи, к которым возможно одновременное прикосновение или на которых может одновременно стоять человек.

Тяговая подстанция (железной дороги) — электрическая подстанция, предназначенная для обеспечения электрической энергией железнодорожного электроподвижного состава (ЭПС) через тяговую сеть железной дороги и нетяговых потребителей железной дороги (ГОСТ Р 53685-2009. Электрификация и электроснабжение железных дорог. Термины и определения)

Выравнивающий контур заземления — искусственный заземлитель в виде горизонтального контура или сетки, обеспечивающий выравнивание потенциалов на территории электроустановки.

Групповое заземление — разновидность заземляющей магистрали, объединяющей однотипные объекты, расположенные на удалении друг от друга, например, опоры контактной сети.

Искровой промежуток — защитное устройство, включенное в заземляющем проводнике, создающее разрыв электрической цепи при нормальном режиме работы, электрический пробой которого происходит при электрическом замыкании на корпус; характеризуется напряжением срабатывания (электрического пробоя) промежутка.

Диодный или тиристорный заземлитель — защитное устройство, включенное в заземляющем проводнике, содержащее силовые полупроводниковые диоды или тиристоры, создающие одностороннюю проводимость для протекающих токов от корпуса к ЗУ в нормальном режиме и при электрическом замыкании на корпус.

Диодно-искровой заземлитель — защитное устройство, включенное в заземляющем проводнике, содержащее диодный заземлитель и включенные последовательно с ним два параллельных искровых промежутка.

Электрическая рельсовая линия (РЛ) — заземленная линия фазы (полюса) тягового электроснабжения с использованием рельсов железнодорожного пути.

Электрическая рельсовая сеть (РС) — система электрически объединенных заземленных линий фазы (полюса) тягового электроснабжения (рельсовых линий), включающая многопутные рельсы станций и перегонов.

Рельсовая цепь (РЦ) — электрическая цепь участка пути, называемого блок-участком, предназначенная для пропуска сигнальных токов и регулирования движением поездов с помощью сигнальных устройств (система СЦБ).

Однониточная рельсовая цепь — рельсовая цепь, использующая для пропуска сигнальных токов одну нитку рельсового пути, а для пропуска тяговых токов — другую.

Двухниточная рельсовая цепь — рельсовая цепь, использующая для пропуска сигнальных и тяговых токов обе рельсовые нити.

Дроссель-трансформатор — трансформатор, первичная обмотка которого (имеющая малое активное и значительное реактивное сопротивление и состоящая из двух полуобмоток) включена между рельсовыми нитями и служит для пропуска тяговых токов, а вторичная обмотка — является питающей или приемной для сигнальных токов.

Тяговый рельсовый соединитель — провод, соединяющий нулевые точки дроссель-трансформатора, нити однониточной рельсовой цепи и рельсовые цепи соседних путей, и предназначена для пропуска тяговых токов.

Изолирующий стык — стыковое соединение рельсов железнодорожного пути, электрически изолирующее их друг от друга.

Система электроснабжения TN-C низковольтных ЭУ — четырехпроводная система электроснабжения потребителей, включающая три питающих фазных провода трехфазной системы переменного тока и нулевой провод защитного зануления, совмещающий функции защитного и питающего для однофазных нагрузок (PEN-провод) и соединенный с нейтралью питающего генератора, трансформатора.

Система электроснабжения TN-S низковольтных ЭУ — пятипроводная система электроснабжения потребителей, включающая три питающих фазных провода трехфазной системы переменного тока, нулевой питающий провод для однофазных нагрузок (N) и нулевой провод защитного зануления (PE), соединенные с нейтралью питающего генератора, трансформатора.

Система электроснабжения TT низковольтных ЭУ — четырехпроводная система электроснабжения потребителей, включающая три питающих фазных провода трехфазной системы переменного тока и нулевой провод для однофазных нагрузок (N). Защита человека

(персонала, пользователя) осуществляется с помощью защитного заземляющего устройства.

Ниже приведены термины физических величин для оценки экспозиции ЭМП, используемые в странах Европейского союза для оценки вредного воздействия на человека.

Контактная величина электрического тока (I_c) между человеком и проводником установки, измеренная в амперах (А); проводник может получить заряд и от ЭМП, наведенного в нем от другой электроустановки.

Плотность тока (J), определяемая как ток, отнесенный к единице поверхности, перпендикулярной протеканию тока в электропроводящей среде, в частности, человеческого тела или его части; измеряемая в амперах на квадратный метр (А/м²).

Напряженность электрического поля как векторная величина (E), которая представляет собой силу, действующую по направлению на одну заряженную частицу, независимо от ее расположения в пространстве; единица измерения — вольт на метр (В/м).

Напряженность магнитного поля как векторная величина (H), которая вместе с магнитной индукцией определяет магнитное поле в любой точке пространства; измеряется в амперах на метр (А/м).

Магнитная индукция (плотность магнитного поля) как векторная величина (B), которая определяется как сила, действующая на движущийся заряд, измеряется в теслах (Т). В свободном пространстве и в биологической материи магнитная индукция и напряженность магнитного поля могут быть использованы как одни и те же значения с использованием равенства $1 \text{ А/м} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Т}$.

Плотность мощности излучения (S), которая характеризует плотность потока мощности высокочастотного излучения в точке пространства, подверженного воздействию ЭМП; определяет величину мощности падающего луча, направленного перпендикулярно поверхности, измеряется в ваттах на квадратный метр (Вт/м²).

Удельное поглощение (SA) энергии, определяемое величиной энергии, поглощенной единицей массы биологической ткани, измеряется в джоулях на килограмм (Дж/кг); в директивах ЕС используется для ограничения нетермического воздействия при пульсирующем микроволновом излучении.

Средний уровень удельного поглощения (SAR) энергии на все тело или часть целого тела, в котором энергия поглощается на едини-

цу массы всего тела или его части и измеряется в ваттах на килограмм (Вт/кг). Показатель *SAR* для всего тела широко применяется для установления соотношения между термическим и экспозиционным воздействием на радиочастотах. Основные сведения о *SAR* для всего тела и стойкость к локальной *SAR* необходимы для оценки ограничения воздействия чрезмерной энергии на отдельные части тела в результате специфичных условий экспозиции. Например, такие условия могут возникать у лиц, занятых на радиочастотах низкого диапазона, и лиц, экспонирующихся в поле вблизи антенн.

В последние годы автор в ряде своих научных публикаций показывает необходимость оценки воздействия на организм и ЭМП низкочастотного диапазона с использованием для оценки этого воздействия величины вектора Пойтинга, называемого энергетическим воздействием ЭМП (Вт/м²), в определенном смысле эту величину можно оценивать как плотность мощности излучения ЭМП низкочастотного диапазона (*S*).

Глава 1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

1.1. Классификация электроустановок по надежности и безопасности электроснабжения потребителей

В отношении обеспечения надежности электроснабжения любых электроприемников, в том числе железнодорожного транспорта, разделяются на три категории.

К *первой категории* относятся ЭП, перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, срыв графика движения поездов, значительный ущерб железнодорожному транспорту и народному хозяйству в целом.

Электроприемники этой категории должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых источников электроснабжения; перерыв их электроснабжения при выходе из строя одного из источников питания может быть допущен лишь на время автоматического восстановления питания.

Из электроприемников первой категории выделяется *особая группа* электроприемников, бесперебойная работа которых необходима для предотвращения угрозы жизни людей, пожаров, безаварийного движения поездов и исключения большого ущерба народному хозяйству.

Для электроснабжения особой группы (электроприемников ЭПР) должно предусматриваться дополнительное электроснабжение от третьего независимого источника питания, в качестве которого могут быть использованы специальные агрегаты или аккумуляторные батареи.

Ко *второй категории* относятся электроприемники, перерыв электроснабжения которых приводит к нарушению производственного цикла и массовым простоям рабочих энергоемких потребителей предприятий. ЭПР второй категории рекомендуется обеспечивать электроэнергией от двух независимых источников питания.

Для ЭПР второй категории при нарушении электроснабжения от одного из источников питания допустимы перерывы электроснабжения на время, необходимое для включения второго источника питания дежурным персоналом или выездной оперативной бригадой. Допускается электроснабжение ЭПР второй категории по одной воздушной или кабельной линии (состоящей из двух кабелей) или одного трансформатора, если обеспечена возможность проведения аварийного ремонта или замены поврежденного оборудования в течение *одних суток*.

К *третьей категории* относятся все остальные ЭПР, не относящиеся к первой и второй категориям. Для ЭПР третьей категории электроснабжение может выполняться от одного источника питания при условии, что перерывы электроснабжения, необходимые для ремонта или замены поврежденного элемента системы электроснабжения, не превышают *одних суток*.

Все электроприемники (ЭПР) организаций железнодорожного транспорта в отношении обеспечения надежности электроснабжения разделяются на ЭПР, режим работы которых непосредственно влияет на безопасность и бесперебойность движения поездов, и на ЭПР, режим работы которых не влияет на них.

Необходимо учитывать, что в условиях рыночной экономики обязанности электроснабжающей организации в отношении обеспечения надежности электроснабжения распространяются только на ЭПР организаций потребителей, не имеющих задолженности по оплате за поставленную электрическую энергию (Федеральный закон от 26.03.2003 г. № 35-ФЗ «Об электроэнергетике»).

В табл. 1.1 приведены некоторые ЭПР и их категории в отношении обеспечения надежности электроснабжения ЭПР в хозяйстве электрификации и электроснабжения и локомотивном хозяйстве железнодорожного транспорта.

В соответствии с Федеральным законом от 27.12.2009 г. № 347-ФЗ «Технический регламент о безопасности низковольтного оборудования» электроустановки (ЭУ) подразделяются на:

- высоковольтные: переменного тока выше 1000 В, постоянного тока выше 1500 В;
- низковольтные: переменного тока от 50 до 1000 В, постоянного тока от 50 до 1500 В.

Категории в отношении обеспечения надежности электроснабжения

Первая категория	Вторая категория	Третья категория
ПТО и экипировочные устройства локомотивов. Компрессорная, экипировки. Экипировочные насосы дизельного топлива масел и воды. Энергодиспетчерский пункт. Устройства телеуправления, телесигнализации и дистанционного контроля	Сушильно-пропиточное отделение депо. Механический цех депо. Сушильно-пропиточный цех базы масляного хозяйства. Ремонтные цехи дорожной электротехнической мастерской	Другие ЭП депо, дом локомотивных бригад, лаборатория, другие ЭП завода. Склады дизельного топлива, масел, песка, кроме ЭП 1 и 2 категории. Мастерские, дежурный пункт района контактной сети, мастерские района электрических сетей, дистанции электроснабжения, РРУ, ДЭЛ, отделение КИП

Электроустановки переменного и постоянного тока до 50 В принято называть ЭУ пониженного напряжения.

По условиям *электробезопасности* электроустановки переменного тока промышленной частоты разделяются Правилами устройства электроустановок (ПУЭ):

- на электроустановки напряжением выше 1 кВ в сетях с глухозаземленной или эффективно заземленной нейтралью;
- электроустановки напряжением выше 1 кВ в сетях с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор или резистор нейтралью;
- электроустановки напряжением до 1 кВ в сетях с глухозаземленной нейтралью (система TN);
- электроустановки напряжением до 1 кВ в сетях с изолированной нейтралью.

Для электроустановок напряжением до 1 кВ приняты следующие обозначения:

- **система TN** — система, в которой нейтраль источника питания глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки присоединены к глухозаземленной нейтрали источника посредством нулевых защитных проводников;
- **система TN-C** — система, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники совмещены в одном проводнике на всем

ее протяжении (рис. 1.1). На рисунке системы переменного тока (рис. 1.1, а) не показаны генераторы или трансформаторы, являющиеся источниками питания системы. Такая система повсеместно применялась в ЭУ до 1000 В в СССР и применяется в ЭУ зданий во многих случаях до сих пор. С точки зрения безопасности эксплуатации эта система имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что по защитному нулевому проводу в нормальном режиме работы протекают рабочие токи однофазных потребителей. Это создает условия для возникновения в нормальном режиме работы на конструкциях, присоединенных к нулевому проводу появления напряжения относительно земли, т.е. в нормальном режиме работы возникает напряжение прикосновения, значение которого может оказаться опасным для человека;

– **система TN-S** — система, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники разделены на всем ее протяжении (рис. 1.2). Такая система повсеместно применяется в развитых странах на протяжении нескольких последних десятилетий. Токи однофазных потребителей протекают в этом случае по рабочему нулевому проводу (N), а защитный нулевой провод (PE), ток по которому протекает только в аварийных режимах, осуществляет защиту персонала, например, при повреждении изоляции ЭУ. В этой системе на корпусах электрооборудования в нормальном режиме работы электроустановки напряжение прикосновения равно нулю.

Современные ПУЭ регламентируют постепенный переход на повсеместное применение системы TN-S:

– все вновь вводимые ЭУ зданий после 2005 г. должны выполняться с системой TN-S;

– при необходимости применения защитного зануления в помещении (евровилка-евророзетка) прокладывается отдельный нулевой провод в это помещение из распределительного щита. В этом случае часть ЭУ конструктивно остается в системе TN-C, а другая часть приобретает функции системы TN-S, система согласно ПУЭ приобретает новую классификацию TN-C-S;

– **система TN-C-S** — система, в которой функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников совмещены в одном проводнике в какой-то ее части, начиная от источника питания;

– **система IT** — система, в которой нейтраль источника питания изолирована от земли или заземлена через приборы или уст-

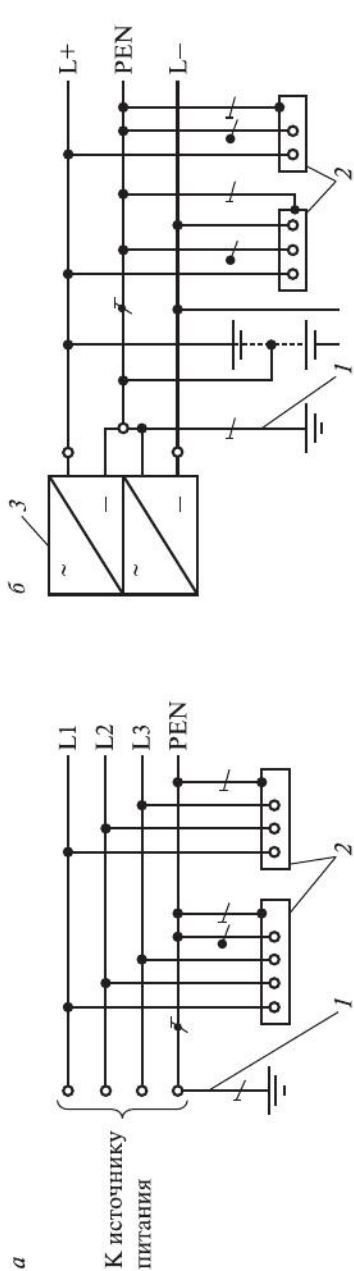


Рис. 1.1. Система TN-C переменного (*a*) и постоянного (*b*) тока (нулевой защитный и нулевой рабочий проводники совмещены в одном проводнике): 1 — заземлитель нейтралей (средней точки) источника питания; 2 — открытые проводящие части; 3 — источник питания постоянного тока

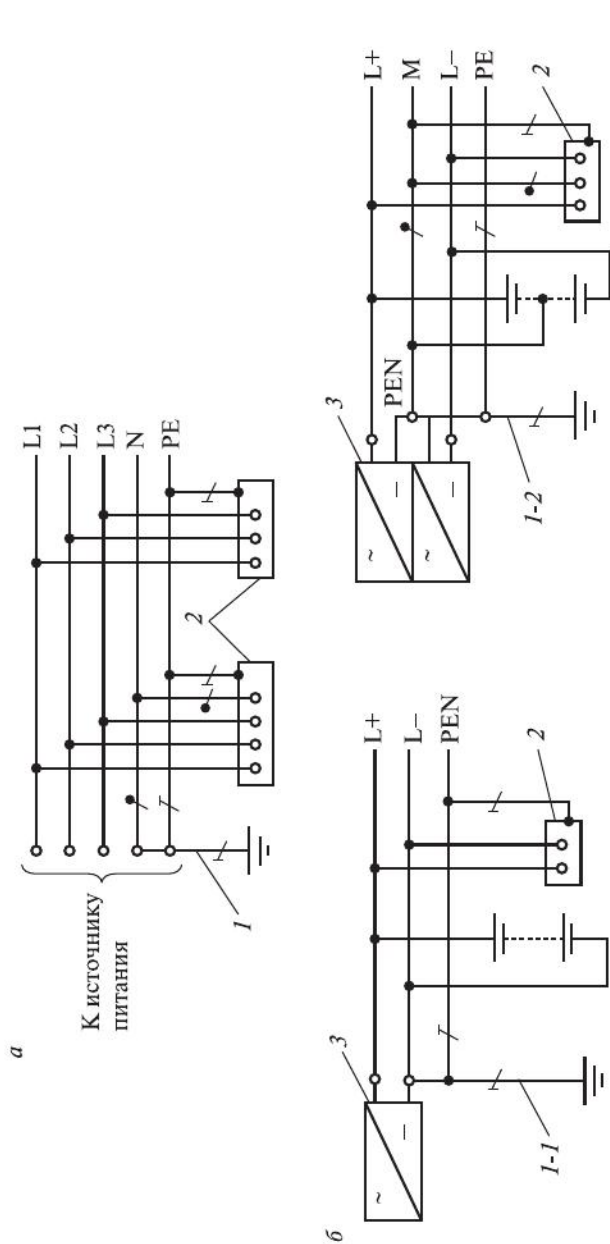


Рис. 1.2. Система TN-S переменного (а) и постоянного (б) тока (нулевой защитный и нулевой рабочий проводники разделены): 1 — заземлитель нейтрали источника переменного тока; 1-1 — заземлитель вывода источника постоянного тока; 1-2 — заземлитель средней точки источника постоянного тока; 2 — открытые проводящие части; 3 — источник питания постоянного тока

ройства, имеющие большое сопротивление, а открытые проводящие части электроустановки заземлены (рис. 1.3);

– **система ТТ** — система, в которой нейтраль источника питания глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки заземлены при помощи заземляющего устройства, электрически независимого от глухозаземленной нейтрали источника (рис. 1.4). Такая система представляет одну из модификаций применения системы TN-C без ущерба для персонала, эксплуатирующего ЭУ, и не требующая прокладки дополнительного провода РЕ. Применение такой системы ограничено невозможностью применения максимальной токовой защиты из-за незначительной величины тока замыкания при повреждении изоляции ЭУ, протекающего по последовательной цепи из сопротивлений растеканию заземляющих устройств с низкой проводимостью. Одно из обязательных требований для защиты при повреждениях изоляции — применение в этом случае чувствительной защиты на основе устройств защитного отключения (дифференциальных аппаратов) с током срабатывания до 30 мА.

На рис. 1.2, б; 1.3, б; 1.4, б показаны варианты схемы исполнения соответственно систем TN-S, IT, ТТ отдельно для аккумуляторных батарей и отдельно для источника постоянного тока на основе статического выпрямительного преобразователя, средний вывод с проводником М используется в качестве PEN-провода.

Электроустановки переменного тока выше 1 кВ подразделяются на ЭУ с изолированной нейтралью (6—35 кВ) и с эффективно заземленной (110 кВ) и заземленной (220 кВ и выше) нейтралью;

На железнодорожном транспорте потребители электроэнергии подразделяются на *тяговые* и *нетяговые*. Потребление энергии электрической тягой имеет определенную специфику в отношении схем питания, распределения и преобразования электрической энергии в энергию движения поезда.

Часть нетяговых потребителей может потреблять электрическую энергию по традиционным схемам трехфазного переменного тока промышленной частоты, а другая часть (питающаяся, например, от линий тяговой сети) по схемам, имеющим существенные конструктивные особенности.

К железнодорожным нетяговым потребителям относят силовые и осветительные нагрузки промежуточных станций, локомотивных

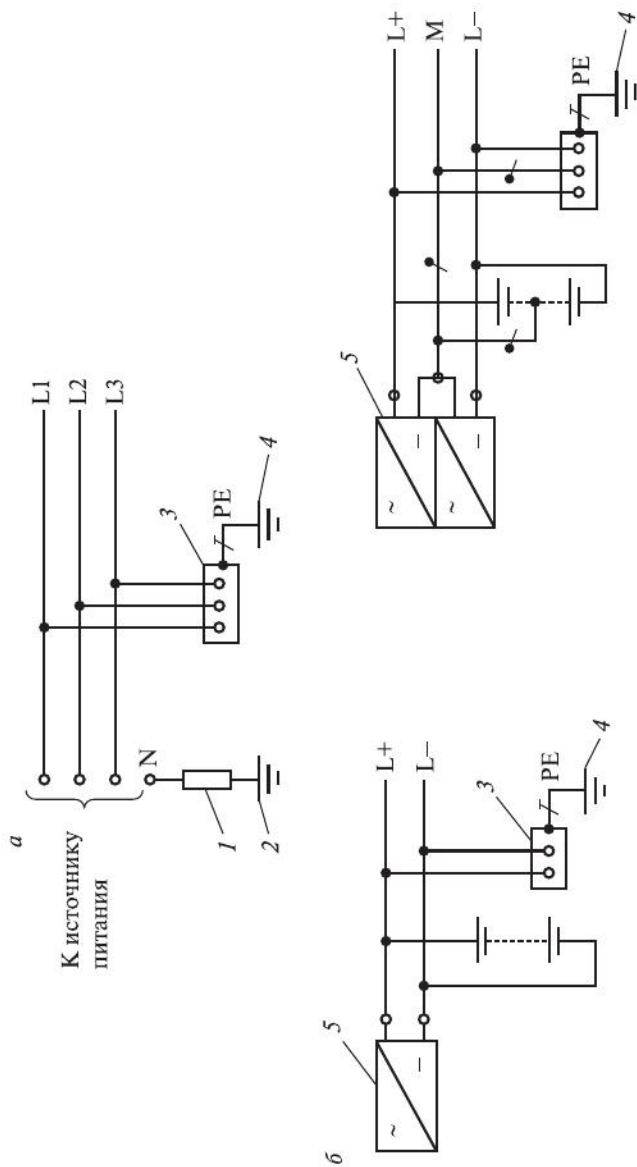
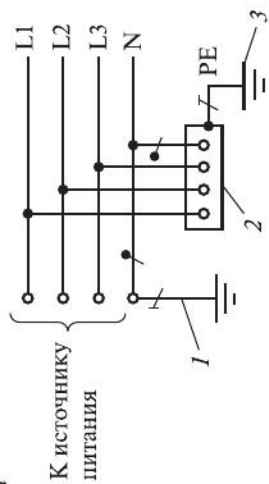
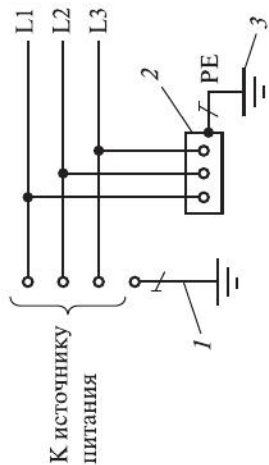


Рис. 1.3. Система П переменного (а) и постоянного (б) тока (открытые проводящие части электроустановки заземлены; нейтраль источника питания изолирована от земли или заземлена через большое сопротивление); 1 — сопротивление заземления нейтрали источника питания (если имеется); 2 — заземлитель; 3 — открытые проводящие части; 4 — заземляющее устройство электроустановки; 5 — источник питания постоянного тока

a



б

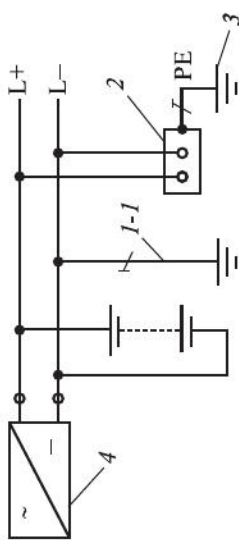
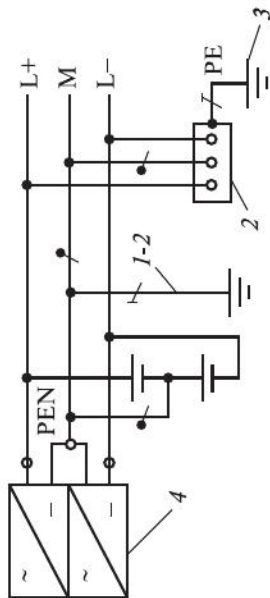


Рис. 1.4. Система ТТ переменного (*а*) и постоянного (*б*) тока (открытые проводящие части электроустановки заземлены при помощи заземления, электрически независимого от заземлителя нейтрали: *1* — заземлитель нейтрали источника переменного тока; *1-1* — заземлитель вывода источника постоянного тока; *1-2* — заземлитель средней точки источника постоянного тока; *2* — открытые проводящие части; *3* — заземлитель открытых проводящих частей электроустановки; *4* — источник питания)

и вагонных депо, служебных и бытовых зданий, электрифицированные механизмы и инструмент путевых бригад. К районным нетяговым потребителям относят нагрузки промышленных и сельскохозяйственных предприятий, расположенных вдоль электрифицированной железной дороги на удалении от нее до 30 км.

Потребители большой мощности питаются электрической энергией по отдельным трехфазным ВЛ напряжением 10, 35 кВ от специально устанавливаемых на тяговых подстанциях трансформаторов. В ряде случаев питание железнодорожных и близлежащих районных потребителей осуществляется от ВЛ 6—10 кВ продольного электроснабжения, располагаемых с полевой стороны на опорах контактной сети. Отбор энергии осуществляется с помощью стационарных или передвижных комплектных трансформаторных подстанций (КТП).

На электрифицированных дорогах однофазного переменного тока электроснабжение нетяговых потребителей осуществляют по системе два провода—рельс (ДПР). С полевой стороны опор контактной сети подвешивают только два провода двух фаз, третьей фазой являются рельсы.

1.2. Практика использования режима нейтрали электрических сетей

Выбор схемы сети и режима нейтрали производится по технологическим требованиям и требованиям безопасности.

В ЭУ до 1 кВ широкое распространение получили разрешенные схемы трехфазных электрических сетей: TN-S, TN-C, TT, а также IT.

По *технологическим* требованиям предпочтение часто отдается сетям TN-S и TN-C, поскольку они позволяют использовать два рабочих напряжения: линейное и фазное. Например, от сети 0,4 кВ можно питать как силовую нагрузку — трехфазную или однофазную, включая ее между фазными проводами на линейное напряжение 380 В, так и осветительную, включая ее между фазными и нулевым проводами на фазное напряжение 220 В. С 2005 года все вновь вводимые в эксплуатацию ЭУ до 1000 В должны выполняться по принятой в Евросоюзе системе TN-S, чем достигается удешевление электроустановки за счет применения меньшего числа трансформаторов, уменьшения сечения проводов и т.п.

Недостатком такой сети является аварийное отключение потребителей при любых однофазных замыканиях на землю, которые являются основными видами повреждений в ЭУ (по статистике составляют до 80–90 % всех повреждений ЭУ), что значительно снижает надежность электроснабжения потребителей.

Иногда устранение этого недостатка достигается в электрических сетях с изолированной нейтралью (в высоковольтных сетях с изолированной нейтралью 6–35 кВ, в низковольтных сетях — ИТ). Однофазное замыкание на землю в таких сетях практически не изменяет качества электрической энергии для трехфазного потребителя (рис. 1.5). Это дает возможность длительное время работать в этом режиме без перерыва питания потребителей до ликвидации повреждения.

Однофазное замыкание в этом случае характеризуется изменением режима напряжения фаз сети относительно земли. Две «здоровые» фазы сети будут иметь в этом режиме линейное напряжение относительно земли u'_2 и u'_3 , а не фазное u_2 и u_3 , как в рабочем режиме, т.е. будут по абсолютной величине в 1,73 раза выше.

В векторном смысле соотношения между напряжениями имеют вид:

$$u_2 - u_0 = u'_2, \quad u_3 - u_0 = u'_3,$$

где u_0 — вектор напряжения нулевой последовательности, разность потенциалов между нулевой точкой источника питания и землей.

Этим объясняется необходимость выполнения усиленной изоляции (с электрическим сопротивлением примерно в два раза выше) в сетях с изолированной нейтралью. Это удорожает выполнение

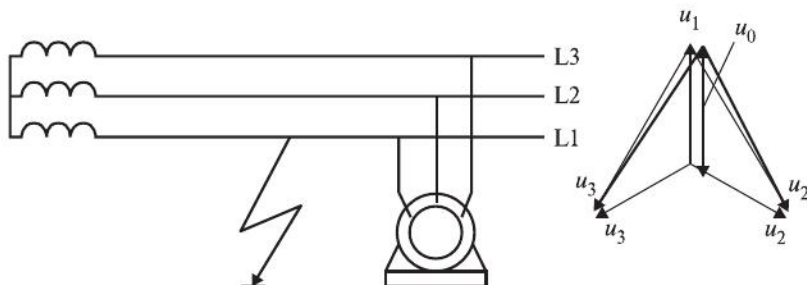


Рис. 1.5. Схема замыкания на землю одной из фаз электрической сети с изолированной нейтралью и векторная диаграмма напряжений в месте замыкания

ние таких сетей более чем в два раза, так как стоимость любых ЭУ в основном определяется стоимостью их изоляции.

Применение такого режима нейтрали осуществляется в электрических сетях для питания внекатегорийных потребителей и потребителей первой категории, т.е. потребителей, к системе электроснабжения которых предъявляются особые требования по надежности электроснабжения. Из-за высокого уровня применяемой изоляции в сетях с изолированной нейтралью они применяются достаточно редко.

По требованиям *безопасности* выбор конструкции сети и режима нейтрали осуществляется с учетом условий обслуживания ЭУ.

Наибольшее распространение на практике получили низковольтные электрические сети с заземленной нейтралью для электроснабжения малых и крупных промышленных предприятий, городских и сельских коммунальных потребителей. На железнодорожном транспорте электроснабжение структурных подразделений инфраструктуры (ремонтных организаций локомотивного и вагонного хозяйства, грузовых дворов и площадок, вокзалов, станционных помещений) осуществлялось с помощью трехфазных четырехпроводных сетей с заземленной нейтралью (TN-C), а на вновь вводимых в эксплуатацию ЭУ до 1000 В сетей TN-S.

Сети с изолированной нейтралью из-за необходимости выполнения более высокого уровня изоляции чаще применяются в тех случаях, когда имеется возможность поддерживать высокий уровень изоляции проводов и когда емкость сети относительно земли незначительна. Такими являются непротяженные малоразветвленные электрические сети, не подверженные воздействию агрессивной среды и находящиеся под постоянным контролем квалифицированного персонала, например сети для питания собственных нужд электростанций и подстанций, линий автоблокировки на железнодорожном транспорте.

В установках выше 1 кВ электрические сети напряжением от 6 до 35 кВ включительно применяются с изолированной нейтралью, а электрические сети 110 кВ — с эффективно заземленной нейтралью, а 220 кВ и выше — с заземленной нейтралью.

Такая конструкция сетей выше 1 кВ связана с рядом причин:

— сети 6—35 кВ наиболее распространены для распределения электроэнергии в больших городах и промышленных центрах, к ко-

торым предъявляются, как правило, повышенные требования по надежности и бесперебойности электроснабжения;

– сети 110 кВ и выше также широко распространены и к ним предъявляются еще большие требования по надежности электроснабжения, но их повреждения — крайне редкое явление; применение же таких сетей с изолированной нейтралью потребует больших капитальных вложений из-за повышенных требований к уровню изоляции.

Требование о нормировании повышенного уровня изоляции сетей с изолированной нейтралью связано с условиями возможной их длительной работы в режиме однофазного замыкания на землю. На рис. 1.5 видно, что напряжение неповрежденных фаз (проводов линий, элементов и частей ЭУ) относительно земли в этом случае возрастает до линейного значения, однако условия электрического питания для трехфазных потребителей не изменяются.

1.3. Особенности устройства электроснабжения электроподвижного состава

Устройства электроснабжения электрических железных дорог (трамвай, метро, промышленный и магистральный электрический транспорт) подразделяются на две системы электроснабжения электроподвижного состава (ЭПС), определяемых родом тока электроснабжения электрической тяги: постоянного тока и переменного тока.

Система электроснабжения электрической тяги постоянного тока может выполняться для электрической тяги различного назначения с разными уровнями напряжения:

– электрическая тяга с номинальным напряжением 3 кВ на токоприемнике электрического локомотива (на питающих шинах источника питания номинальное напряжение 3,3 кВ) применяется для магистрального и промышленного транспорта (исследуется возможность применения повышенных напряжений 6 и 12 кВ);

– электрическая тяга напряжением 1,5; 0,75 и 0,6 кВ на токоприемнике электрического локомотива (на шинах источника питания 1,7; 0,85 и 0,65 кВ) применяется в промышленном транспорте, в метрополитене и трамвае.

Принципиальная электрическая схема питания электрической тяги постоянного тока (рис. 1.6) включает питающую энергосис-

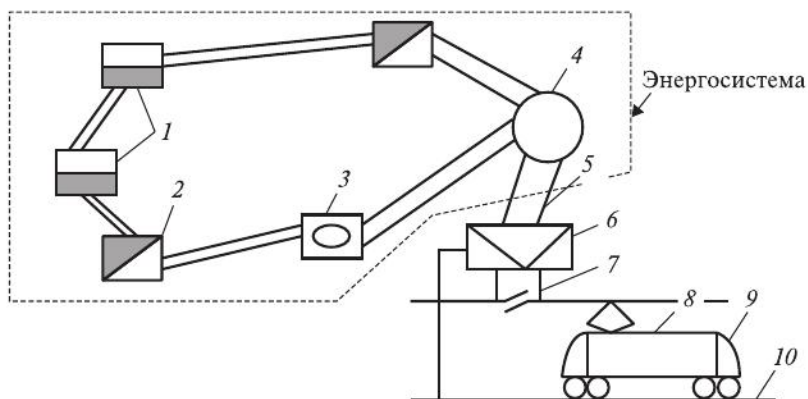


Рис. 1.6. Принципиальная схема электроснабжения электрической тяги: 1 — тепловая электростанция; 2 — гидравлическая электростанция; 3 — атомная электростанция; 4 — районная трансформаторная подстанция; 5 — линии электропередачи; 6 — тяговая подстанция; 7 — питающая линия тяговой сети; 8 — контактная сеть; 9 — электрический локомотив; 10 — рельсовая сеть

тому, в которую в общем случае могут быть включены тепловые 1, гидравлические 2 и атомные 3 электростанции, объединенными линиями электропередачи 5 и распределительными подстанциями. Преобразовательная выпрямительная тяговая подстанция постоянного тока или тяговая подстанция однофазного переменного тока 6 потребляет электрическую энергию от внешней энергосистемы и районной подстанции 4 через двухцепную ЛЭП 5. Передача электрической энергии к электрическому локомотиву (передвижной тяговой электрической установке) 9 осуществляется с помощью питающего фидера 7 контактной сети (контактного провода, контактного рельса в метрополитене) 8 и рельсового пути 10 (рельсовой сети, рельсовой линии), играющего роль «обратного» провода.

Выпрямительная преобразовательная тяговая подстанция постоянного тока включает в себя, как правило, несколько электрических установок различного уровня напряжения:

- открытое распределительное устройство 110 кВ (ОРУ-110) внешнего электроснабжения системы с эффективно заземленной нейтралью (редко 220 кВ и более);
- открытое распределительное устройство 35 кВ (ОРУ-35) для электроснабжения нетяговых потребителей;

– закрытые распределительные устройства 6–10 кВ (ЗРУ-6, ЗРУ-10) для питания выпрямительных установок тягового электроснабжения, потребителей собственных нужд, автоблокировки и нетяговых потребителей;

– распределительное устройство (РУ) тягового электроснабжения, включающее открытую часть (тяговые трансформаторы выпрямительной установки, фидеры и выключатели контактной сети) и закрытую (выпрямительные или выпрямительно-инверторные установки, шины, быстродействующие выключатели) части;

– распределительное устройство собственных нужд трехфазного переменного тока напряжением 220/380 В, как правило, с изолированной нейтралью;

– распределительное устройство собственных нужд постоянного тока напряжением 110 или 220 В, включая аккумуляторную батарею.

Электрическая тяговая сеть включает контактную сеть, рельсовую сеть (рельсы железнодорожного пути) и питающие линии (фидеры), осуществляющие электроснабжение тяговой сети. Контактная сеть (КС) секционируется с помощью секционных изоляторов или изолирующих сопряжений. Питание секций контактной сети осуществляется от тяговых подстанций через автоматические выключатели и мачтовые разъединители контактной сети. В местах секционирования могут устанавливаться посты секционирования (ПС), на которых устанавливаются автоматические выключатели и разъединители контактной сети, и пункты параллельного соединения (ППС) с разъединителями контактной сети. На опорах контактной сети, как правило, подвешиваются дополнительные линии и усиливающие устройства, а также устанавливаются разрядники для защиты от грозových перенапряжений.

Электрический локомотив (электровоз) представляет собой тяговую электрическую установку, основными элементами которой являются: устройства токосъема (пантографы); силовая сеть электровоза, включая быстродействующие выключатели; пусковые резисторы (реостаты); тяговые электродвигатели; устройства переключения силовой цепи тяговых электродвигателей (ТЭД); электродвигатели вспомогательных машин; разрядники; электрическая сеть и приборы управления, защиты и контроля силовых электрических цепей.

Устройства управления элементами силовой цепи локомотива включают электрические и пневматические элементы.

Рельсовый путь на электрифицированных железных дорогах представляет собой силовую электрическую линию (электрическую рельсовую сеть) отрицательного полюса тяговой подстанции постоянного тока, не имеющую хорошего электрического контакта с проводящим электрический ток грунтом (землей). Однако из-за большого протяжения электрических рельсовых сетей их потенциал по отношению к нулевому потенциалу земли при протекании силовых токов электровозов условно (по сравнению с номинальным напряжением) принимают равным нулю. Это обстоятельство служит основанием для использования в ряде случаев рельсов в качестве естественного заземляющего устройства (ЗУ) для конструкций железнодорожного транспорта.

Рельсовая сеть, кроме рельсовых линий, включает дроссель-трансформаторы рельсовых цепей автоблокировки, рельсовые («отсасывающие») фидеры и присоединения ЗУ.

Схема питания железной дороги постоянного тока включает преобразовательные тяговые подстанции, а схема питания переменного тока — тяговые трансформаторные подстанции (рис. 1.7).

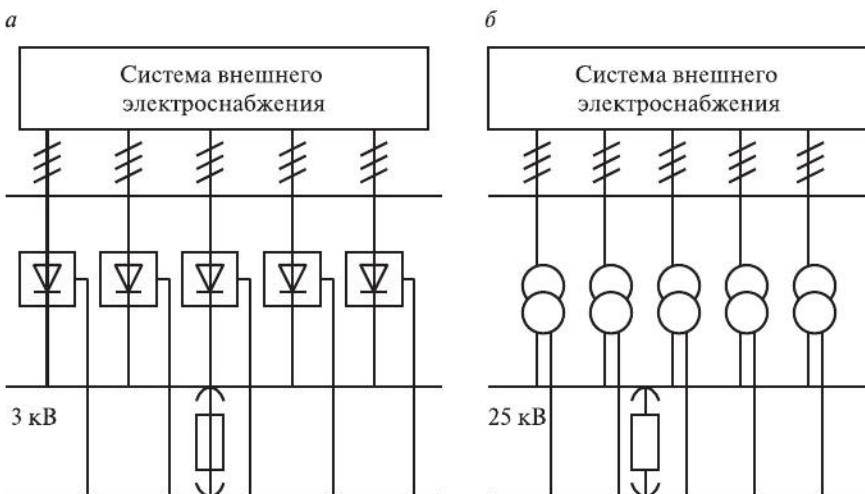


Рис. 1.7. Принципиальные схемы систем внешнего электроснабжения железных дорог постоянного (а) и переменного тока (б)

Далее подробно устройства электроснабжения ЭПС не рассматриваются, так как предполагается, что читатель достаточно подготовлен в этой области и знаком с основными учебниками по электроэнергетическим специальностям.

1.4. Система «человек—электроустановка—среда» на железнодорожном транспорте

Специфика условий труда на железнодорожном транспорте. Железнодорожный транспорт является отраслью, в которой остро проявляются специфика трудовой деятельности и повышенная опасность труда.

Рабочие места многих профессий находятся в опасной зоне или в непосредственной близости от опасной зоны, где осуществляется движение подвижного состава, маневровая работа, сцепка и расцепка движущихся единиц подвижного состава, перемещение грузов при погрузке и выгрузке, а работа электротехнического персонала осуществляется в зоне с опасным уровнем ЭМП, на высоте, в зоне движущихся (вращающихся) частей оборудования (рис. 1.8).

По роду своей деятельности большинство железнодорожников в процессе работы вынуждены пересекать пути на перегоне и в многопутных парках станций или двигаться на больших участках вдоль железнодорожного пути (по прямой необходимости, при следовании на работу и с работы, при командировании специалистов на линейные предприятия и т.п.). В то же время движущиеся поезда, маневровые составы и отцепы с точки зрения безопасности чело-



Рис. 1.8. Основные опасные производственные факторы в технологических процессах железнодорожного транспорта

века на путях являются полностью неуправляемыми, так как даже при их экстренном торможении длина тормозных путей составляет сотни и тысячи метров, а отцепы, пущенные при регулировочном роспуске с горок, не имеют устройств торможения.

Спецификой трудовой деятельности многих железнодорожников является необходимость работы на открытом воздухе в любое время года при наличии *факторов естественного климата*. Это существенно влияет на безопасные условия труда, так как требует применение теплой спецодежды в зимнее время года, что затрудняет координацию движений и восприятие звуковых сигналов; туманы и дождь затрудняют восприятие световых сигналов; обильные осадки в виде снега и дождя ухудшают состояние производственной территории станций.

Наряду с факторами естественного климата, на железнодорожном транспорте имеются *вредные производственные факторы*, которые могут действовать на открытом воздухе и в производственных помещениях (рис. 1.9).



Рис. 1.9. Основные вредные производственные факторы

Около 75 % всего объема работ при эксплуатации ЭУ дистанций электроснабжения железнодорожного транспорта приходится на работы по обслуживанию воздушных линий (ВЛ) и устройств контактной сети (КС).

Работы на контактной сети могут производиться:

- со снятием напряжения и заземлением;
- под напряжением;
- вблизи частей, находящихся под напряжением;
- вдали от частей, находящихся под напряжением.

Работы под напряжением и вблизи частей, находящихся под напряжением, обладают наибольшим риском травмирования персонала. Достаточно напомнить, что практически 100 % смертельных случаев при электротравмировании происходит при выполнении таких работ.

Условия работ связаны с опасными местами из-за наличия вблизи работников частей оборудования, находящихся под разными потенциалами (потенциал контактной сети и земли); кроме того работа ведется на высоте, часто в неудобных позах. Работы жестко лимитируются продолжительностью «окна» в движении поездов и ограниченной зоной безопасности на территориях станций, двухпутных и многопутных участков перегонов, т.е. наличием в непосредственной близости движущегося подвижного состава с опасностью наезда на людей.

При исследовании проблемы предупреждения электрических травм на железнодорожном транспорте установлены (Зельвянский Я.А.) причинно-следственные связи возникновения опасности поражения электрическим током при работах на контактной сети, представленные на рис. 1.10 в виде графа причинно-следственных связей.

Особенностью тяговой сети электрических железных дорог в России является многофункциональное использование рельсового пути (рис. 1.11). Это обстоятельство вызывает специфическую опасность поражения электрическим током от напряжения прикосновения на работах, связанных с прикосновением к элементам рельсовой сети и присоединенных к ним конструкциям, которые выполняют монтеры пути, электромонтеры, электромеханики контактной сети, электромеханики СЦБ и связи.

Исследования показывают, что в переходном режиме к.з., в тяговой сети на рельсах возникают импульсные перенапряжения (пол-

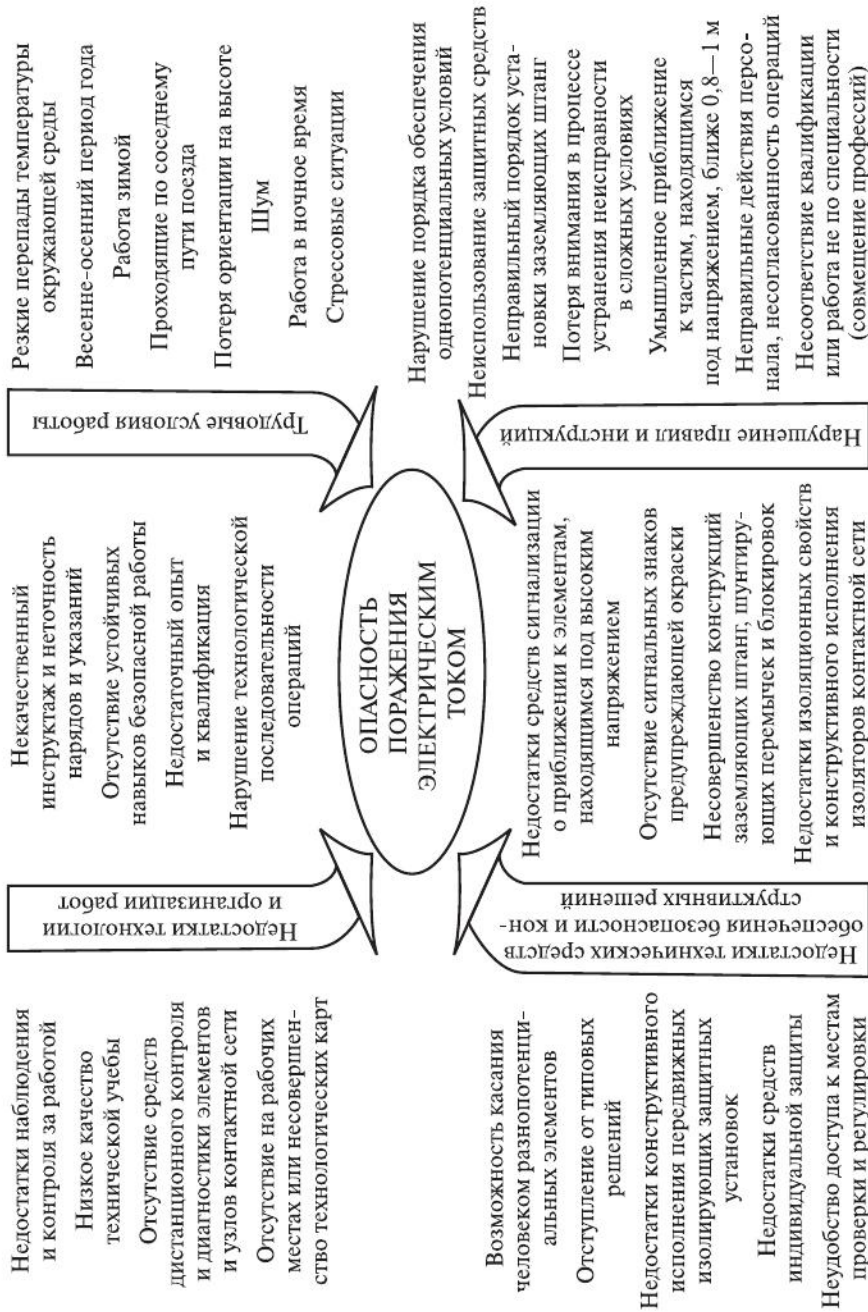


Рис. 1.10. Причинно-следственные связи опасности поражения электрическим током при работах на контактной сети



Рис. 1.11. Многофункциональное использование рельсового пути

ная продолжительность отключения режима к.з. до 0,06 с на постоянном и до 0,12 с на переменном токе); при этом импульсные напряжения прикосновения могут составлять более 1000 В на участках постоянного тока и более 3000 В — на участках переменного.

Опасное напряжение прикосновения на участках переменного тока может возникать на отключенных участках контактной сети, ВЛ или линиях связи и на других протяженных конструкциях; напряжение наводится электромагнитным полем работающего участка контактной сети, расположенного параллельно этим воздушным линиям.

Опасность поражения электрическим током может возникать также при разрыве рельсовой сети работающей тяговой сети, например, при ремонте пути без отключения тяговой сети.

Электротравматизм на железнодорожном транспорте. Анализ статистических данных травматизма в ОАО «РЖД» указывает на значительный удельный вес производственного электротравматизма на железнодорожном транспорте.

По данным анализа Федеральной службы государственной статистики, из более 22 млн среднесписочного числа работников российских предприятий в 2010 г. число травмированных на производстве работников составило 47 772 чел., из них травмы со смертельным исходом получили 2004 чел., коэффициент частоты травматизма составил 2,2, коэффициент частоты смертельного травматизма — 0,094. Электротравматизм в структуре РАО «ЕЭС» в 2009 г. составлял 80 случаев травмирования, из них 30 смертельных.

Основные статистические данные травматизма по ОАО «РЖД» за период 2004—2013 гг. приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Статистические данные травматизма в ОАО «РЖД»

Годы	Количество случаев всего (смертельных)	Количество электро- травм с летальным ис- ходом	Удельный вес электро- травм с летальным ис- ходом, %
2004	1149 (106)	17	16
2005	922 (98)	13	13
2006	757 (96)	15	16
2007	751 (95)	16	17
2008	649 (80)	16	20
2009	620 (78)	15	19,2
2010	534 (73)	16	21,0
2011	418 (68)	12	18,0
2012	358 (50)	12	24,0
2013	343 (45)	8	18,6

Анализ приведенных в таблице данных показывает, что электротравматизм в ОАО «РЖД» имеет тенденцию к росту по удельным показателям (до 24,0 % от смертельного производственного травматизма на транспорте). Следует отметить, что в структуре общего производственного травматизма по всем отраслям народного хозяйства электротравматизм составляет значительно меньший удельный вес (11,8 %), в том числе в электроэнергетике (29 %).

По статистическим данным 2013 г., по функциональным филиалам 37,7 % всех травматических случаев на железнодорожном транспорте приходится на работников Центральной дирекции инфраструктуры, 17 % — дирекции тяги (ЦТ), 11 % — дирекции ремонта локомотивов (ЦТР), 8,9 % — дирекции ремонта пути (ЦДРП), 6,1 % — дирекции движения (ЦД), 3,2 % — дирекции железнодорожных вокзалов.

В табл. 1.3 приведен риск гибели по официальным данным статистики 1982—1990, 1992—1996, 2000—2002 гг. на производстве от любых опасных факторов при эксплуатации железнодорожного транспорта и риск гибели работников в ОАО «РЖД» в 2004—2012 гг., в том числе в результате электрических травм.

Риск гибели на железнодорожном транспорте

Службы железнодорожного транспорта	Риск гибели на производстве, $p \cdot 10^{-6}$ год $^{-1}$		В том числе риск гибели от электротравмы, $p \cdot 10^{-6}$ год $^{-1}$	
	диапазон	средний	диапазон	средний
Железнодорожный транспорт, 1982—1990 гг. (МПС СССР)	95,3—101,9	98,4	24,8—30,9	29,2
Железнодорожный транспорт, 1992—1996 гг. (МПС РФ), в том числе:	111,3—128,6	116,6	17,4—21,6	19,0
локомотивное хозяйство	52,9—84,6	67,6	9,49—24,7	19,5
пассажирское хозяйство	33,4—82,1	57,9	0—15,7	9,3
хозяйство перевозок	76,9—159	136,2	—	—
хозяйство пути	101—209	141,3	0—14,2	6,15
хозяйство электрификации	345—417	384,3	345—380,4	366,4
вагонное хозяйство	60,2—132	82,3	0—12,0	3,0
Железнодорожный транспорт, 2000—2003 гг. (МПС РФ)	102,6—113,8	106,6	19,5—21,8	20,8
ОАО «РЖД» 2004—2012 гг.	58—97	72	9,02—16,7	13,2

Индивидуальный риск гибели является вероятностной категорией и подсчитывался на основании данных официальной статистики и численности работников организации или структурных подразделений железнодорожного транспорта как статистическая вероятность хотя бы одного смертельного несчастного случая в течение года из соотношения

$$R = p_1 = \frac{N_{\text{сл}}}{N_p},$$

где R — риск гибели на железнодорожном транспорте в течение года хотя бы одного работника (индивидуальный риск), равный статистической вероятности p_1 этого события; $N_{\text{сл}}$ — число несчастных случаев с летальным исходом за год в организации или структурном подразделении; N_p — средняя численность работников организации или структурного подразделения в течение года.

Следует иметь в виду, что риск гибели от электротравм в США в конце 1980-х гг. прошлого века составлял $4,0 \cdot 10^{-6}$. Более высокий риск электротравматизма на железнодорожном транспорте по сравнению с промышленным производством в РФ и в развитых странах указывает на актуальность работ, способствующих повышению уровня электробезопасности в ЭУ.

Система обеспечения электробезопасности в электроустановках (СОЭ) может содержать следующие основные составляющие (рис. 1.12):

- организационные мероприятия;
- технические мероприятия;
- блок технических средств защиты персонала;
- регламентные проверки электрооборудования.

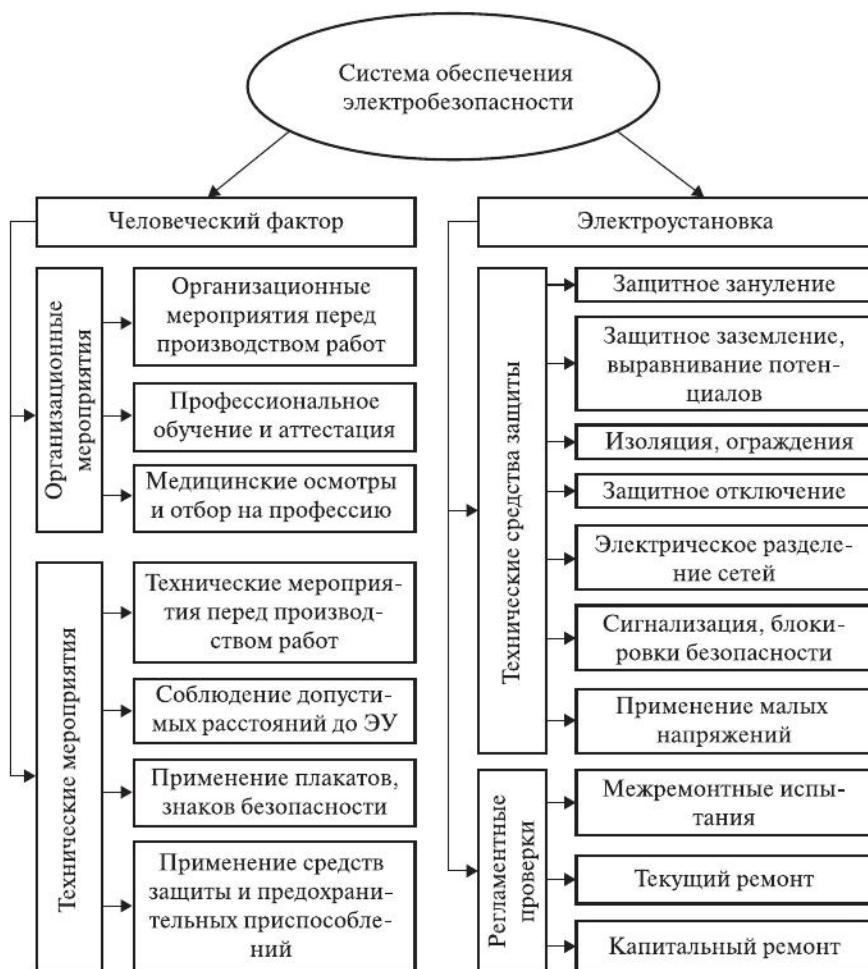


Рис. 1.12. Структура системы обеспечения электробезопасности

Первые две составляющие системы представляют так называемый «человеческий» фактор, две вторые — характеристики технологического процесса или технической конструкции.

Особенностью СОЭ на железнодорожном транспорте является использование в качестве специфического технического средства защиты *защитного присоединения частей, доступных прикосновению, к рельсовой линии (РЛ)*. Защитное присоединение к РЛ включает в себя одновременно (частично или полностью) защитные функции трех технических защитных средств в ЭУ: *заземления, зануления и защитного отключения*. РЛ как техническое защитное средство ЭУ железнодорожного транспорта обладает рядом положительных и отрицательных качеств по сравнению с традиционными конструкциями ЗУ общепромышленных электроустановок (рис. 1.13).

Анализ приведенных данных показывает, что риск получения травмы во время трудовой деятельности на железнодорожном транспорте намного превышает риск природного воздействия на человека, принимаемого в качестве допустимого в настоящее время у нас в стране и за рубежом ($1 \cdot 10^{-6}$).

К качествам РЛ, *повышающим безопасность персонала* железных дорог и лиц, которые могут обращаться (прикасаться) к устройствам, присоединенным к РЛ, в момент нарушения электрической изоляции тяговой сети, относятся (рис. 1.13):

- снижение напряжения прикосновения при замыкании контактной сети на РЛ более чем в три раза по сравнению с напряжением контактной сети;

- надежное отключение поврежденного участка контактной сети из-за создания короткозамкнутой цепи с малым электрическим сопротивлением;

- быстрое отключение поврежденного участка до 0,06 с на постоянном токе и до 0,12 с на переменном токе.

К качествам РЛ, *снижающим безопасность персонала* железных дорог и лиц, которые могут обращаться (прикасаться) к устройствам, присоединенным к рельсовой линии, а также к *вредным факторам*, влияющим на человека и окружающую среду при эксплуатации ЭУ железнодорожного транспорта, относятся:

- наличие напряжения на РЛ в нормальных режимах работы;
- высокий уровень магнитной составляющей ЭМП тяговой сети;
- высокий уровень электрической составляющей ЭМП тяговой сети постоянного тока, вызывающей электрическую корро-



Рис. 1.13. Основные качества защитного присоединения к рельсовой линии

зию (электролитическое растворение) металлов в проводящем пространстве земли и отравление подземных вод;

- воздействие электрических процессов в РЛ на рельсовые цепи СЦБ;
- необходимость отключения заземляющих присоединений от рельса во время ремонта пути.

Одним из важнейших технологических недостатков электрификации железных дорог на постоянном токе является процесс протекания части тягового тока по земле (блуждающие токи) и разрушение подземных металлических конструкций из-за процесса электрической коррозии.

Для защиты стационарных конструкций контактной сети от электрической коррозии применяют различные устройства: искровые промежутки (ИП), групповые объединения опор с диодными заземлителями (ЗД) и групповые объединения опор с комбинацией ЗД и ИП. Эти устройства, как будет показано ниже, существенно влияют на эксплуатационные показатели и процессы к.з. при повреждении изоляции контактной сети.

Передача больших электрических мощностей по РЛ и земле, их многофункциональное использование, несимметричность воздушных линий (в том числе контактных сетей) при протекании токов электрической тяги и распределении напряжений на элементах тяговых сетей, питающих электрические локомотивы, создают условия для возникновения:

- напряжений прикосновения к РЛ и присоединенных к ним конструкциям в рабочих и аварийных режимах работы тяговой сети;
- напряжений прикосновения на защитном заземляющем устройстве тяговых подстанций, в связи с использованием его в качестве элемента тяговой сети, в рабочих и аварийных режимах;
- интенсивного загрязнения биосферы электромагнитным полем, неблагоприятно воздействующим на обслуживающий персонал и население.

Объективное развитие электрификации железнодорожного транспорта требовало решения возникающих проблем защиты человека и окружающей среды от отрицательного воздействия ЭМП. Уже в первых работах по проблемам электрификации железных дорог, на заре ее развития, поднимались и решались проблемы защиты от отрицательных последствий распространения ЭМП в окружающей среде. Первоначально это касалось проводящего пространства земли, так как сначала электрификация велась по системе постоянного тока и проблема сводилась к защите сооружений от воздействия блуждающих токов.

В послевоенные годы в связи с развитием электрифицированного транспорта как на магистральном железнодорожном транспорте, так и в городском хозяйстве, развитием трубопроводного транспорта, усложнением коммуникаций коммунального хозяйства, проблема защиты подземных сооружений от электрической коррозии превратилась в межотраслевую.

Большой вклад в разработку теории, принципов расчета и проектирования защиты от неблагоприятного воздействия токов в рельсах и земле на сооружения, присоединенные к ним конструкции и устройства, внесли специалисты в области электроснабжения электрифицированных железных дорог: И.М. Ершов, В.И. Дмитриев, Р.Н. Карякин, Б.И. Косарев, А.Б. Косарев, А.В. Котельников, А.А. Кудрявцев, Б.Г. Лордкипанидзе, К.Г. Марквардт, Г.Г. Марквардт, Л.С. Панфиль, В.Н. Пупынин, Э.П. Селедцов, Н.Г. Сергеев, С.М. Сердинов, И.В. Стрижевский, М.Г. Шалимов и др.

Основные пути решения проблем совместимости функций защитного заземления и рельсовой линии. В соответствии с исследованиями ВНИИЖТа заземление конструкций и устройств на электрифицированных железных дорогах должно выполнять ряд условий:

- обеспечение надежной работы защиты от токов к.з. в системе тягового электроснабжения;
- обеспечение электробезопасности обслуживающего персонала и других лиц на электрифицированных дорогах;
- обеспечение нормального функционирования рельсовых цепей автоблокировки и электрической централизации (СЦБ);
- ограничение утечки тяговых токов и защиты от электрокоррозии.

В тяговых сетях постоянного тока с работой рельсовой сети (РС) функционально связано обеспечение *надежной работы максимальной токовой защиты*, что реализуется в минимизации электрического сопротивления цепи тока к.з. Это условие достигается:

- соединением конструкций, на которые возможно попадание напряжения контактной сети, с тяговой рельсовой сетью (заземление на тяговую РС);
- минимизацией электрического сопротивления троса группового заземления опор контактной сети;
- непрерывностью тяговой сети, включая РС и заземляющие (отсасывающие) линии;
- двусторонним отводом тока по РС, используя, как правило, обе рельсовые нити, смежные и параллельные пути с помощью соединителей стыков, а также междупутных, междроссельных, дроссельных, стрелочных электрических тяговых соединителей.

Условия обеспечения *электробезопасности персонала* достигаются:

— обеспечением отключения режима к.з. (под режимом к.з. в ЭУ подразумевается электрическое соединение контактной сети и РС через металлический проводник и защитные устройства);

— ограничением напряжения прикосновения на заземляемых конструкциях и устройствах ниже нормируемых значений, принятых действующими нормативными документами для соответствующей продолжительности срабатывания защиты;

— соответствием значений электрического сопротивления защитного ЗУ нормативным значениям для данного типа электроустановок;

— заземлением сооружений и конструкций, расположенных в общедоступных местах, наглухо двумя заземляющими проводниками;

— заземлением устройств, на которых обслуживающим персоналом периодически производятся технологические операции, наглухо двумя заземляющими проводниками, видимыми на всей их длине;

— возможностью включения в цепь заземления защитных устройств, создающих разрыв цепи заземления в нормальном режиме, но обеспечивающие его замыкание при возникновении опасных напряжений на защищаемых конструкциях и устройствах; напряжение срабатывания таких устройств не должно превышать 1200 В, а заземление через диодные заземлители эквивалентно глухому заземлению.

Для функционирования рельсовых цепей (РЦ) автоблокировки и электрической централизации используют оба рельса (обе нити) железнодорожного пути. По способу пропускания тягового тока РЦ могут быть *однониточными*, в которых тяговый ток протекает по одной нити, и *двухниточными*, в которых тяговый ток протекает по двум рельсам (нитям) РЦ.

Обеспечение нормального *функционирования рельсовых цепей автоблокировки и электрической централизации (СЦБ)* достигается:

— ограничением величины электрического сопротивления растеканию конструкций и устройств, подключаемых к тяговым нитям однониточной РЦ, к средним точкам дроссель-трансформаторов или рельсу двухниточной РЦ (не менее 5 Ом — к среднему выводу, не менее 6 Ом для группового ЗУ — к рельсу и 100 Ом для индивидуального ЗУ — к рельсу);

— присоединением к РС конструкций и устройств при малых значениях их электрического сопротивления растеканию тока через

специальные защитные устройства (искровые промежутки, диодно-искровые заземлители, индуктивные защитные дроссели и т. п.);

- присоединением рабочих ЗУ только к средним выводам путевых или специально устанавливаемых дополнительных дроссель-трансформаторов при двухниточных РЦ и к тяговому рельсу при однониточной РЦ;

- предотвращением шунтирования РЦ протяженными металлическими конструкциями или групповым ЗУ опор контактной сети присоединением с этой целью их только к одной точке РЦ.

Обеспечение *уменьшения утечки тяговых токов и защиты от электрокоррозии* на участках, электрифицированных на постоянном токе, достигается:

- изоляцией конструкций, присоединенных к РС, от земли и заземленных металлоконструкций, проложенных в земле;

- нормированием токов утечки в землю через присоединенные конструкции и их сопротивлений относительно земли;

- применением пассивных и активных технических средств защиты от коррозии.

Таким образом, для присоединения конструкции к РС с целью защитного заземления необходимо выполнить не менее 17 условий.

В настоящей работе рассмотрены методы и условия применения технических средств, направленные на обеспечение электробезопасности персонала в электрических установках железнодорожного транспорта.

Глава 2. ОПАСНЫЕ И ВРЕДНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ

2.1. Основные сведения об электромагнитном поле

В конце XIX столетия были открыты и исследованы свойства невидимых электромагнитных волн, способных распространяться на огромные расстояния, проникать сквозь преграды без существенного ослабления. Свойства электромагнитного поля (ЭМП) стали широко использоваться в электрических приборах, для целей электросвязи, для передачи электрической энергии на большие расстояния с помощью линий электропередачи (ЛЭП), для перемещения электрических транспортных средств.

Электромагнитные поля, применяемые для целей радиосвязи, телевидения, радиолокации, радионавигации, радиотелеуправления, иногда называют радиоволнами, так как термин «радио» происходит от слова радиация.

Обобщая обширный опытный материал, собранный естествоиспытателями, английский физик Д. Максвелл создал в 60-х г. XIX в. теорию ЭМП, установившую общую природу световых и электромагнитных волн и законы их распространения в пространстве. В дальнейшем были изучены другие виды излучения: ультрафиолетовое, инфракрасное, рентгеновское, излучения при распаде радиоактивных веществ и др. Исследования показали, что, несмотря на различия между всеми этими видами излучения, они имеют общую электромагнитную природу и обладают в той или иной степени свойствами электромагнитного поля, а особенности их физических проявлений определяются различием в длине волны.

В 1886—1888 гг. Г. Герц экспериментально подтвердил основные выводы теории Д. Максвелла, показав, что законы распространения, отражения и преломления волн аналогичны законам распространения света.

При создании электромагнитной теории света Д. Максвелл сразу же столкнулся с трудностью физического представления мате-

рии ЭМП. Все известные до того времени волнообразные движения материи объяснялись механическими движениями и упругими взаимодействиями частиц тех сред, в которых они происходят. Например, распространение волн на поверхности воды объясняется действием сил внутреннего трения и поверхностного натяжения воды, распространение звука — упругими деформациями в среде или колебаниями молекул газа, а в вакууме распространение этих колебаний невозможно.

Д. Максвелл предположил, что все мировое пространство заполнено каким-то неощутимым видом материи, названной им эфиром, а распространение ЭМП, в том числе и света, объясняется колебаниями частиц эфира. *Это движение или смещение частиц эфира было названо током смещения.*

Действительно, если в вакуумный сосуд поместить две пластины и соединить их с источником переменной электродвижущей силы (ЭДС), то на помещенную поблизости магнитную стрелку будет действовать переменное магнитное поле так, как это происходило бы, если в пространстве между электродами протекал по проводу реальный электронный поток, который принято называть конвекционным током.

Несмотря на то что с количественной стороны опыт дает полное совпадение с теорией, объяснение качественной стороны явлений такой механической модели оказалось необоснованным. Все дальнейшие попытки физиков посредством самых тонких и остроумных экспериментов обнаружить эфир и выявить его свойства не только ничего не дали, но и показали, что, если предположить существование эфира, нельзя объяснить многие физические явления. Поэтому в настоящее время понятие «эфир» считают лишенным какого-либо реального физического смысла.

Вместе с тем экспериментальная физика накапливала все новые и новые данные о свойствах электромагнитных волн. Было обнаружено и измерено давление света (А. Г. Столетов), было доказано, что частица, излучающая электромагнитные волны, теряет часть своей массы. Излучение элементарных ядерных частиц и их реакций показало, что при некоторых условиях могут происходить превращения частиц в электромагнитное излучение и, наоборот, возможно наблюдать переход электромагнитного излучения в электрически заряженные частицы. Было открыто, что электроны,

с одной стороны, ведут себя как элементарные частицы материи, а с другой стороны, они обладают и некоторыми свойствами ЭМП, например, способностью к дифракции, т.е. огибанию препятствий. В свою очередь, некоторое электромагнитное излучение обладает корпускулярными (прерывными) свойствами, т.е. свойствами потока мельчайших частиц. Эти достижения в физических исследованиях привели к выводу, что ЭМП представляет собой особую форму движущейся материи и теория ЭМП Д. Максвелла, за исключением гипотезы об эфире, правильно отражает объективную физическую реальность, являясь обобщением основных законов ЭМП, установленных опытным путем.

Важным выводом теории ЭМП является вывод о том, что переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле, а закон электромагнитной индукции устанавливает обратную зависимость, следовательно, переменные электрические и магнитные поля всегда существуют совместно и связаны друг с другом определенной количественной зависимостью.

Естественное электрическое поле земли напоминает поле в физическом конденсаторе: земля обладает довольно значительным отрицательным электрическим зарядом, а равный ему положительный заряд находится в ионосфере на высоте порядка десятка километров. Этим объясняется, что на высотах 10—20 км электрическое поле практически отсутствует, а напряженность равна нулю.

У поверхности земли величина напряженности электрического поля составляет $E \cong 130$ В/м, магнитного поля $H \cong 24\text{--}40$ А/м.

В исследованиях ЭМП у поверхности Земли указывается на интервал возможной величины напряженности электрического поля Земли в пределах 120—150 В/м, а также на некоторое увеличение напряженности электрического поля в предгрозовой и грозовой периоды. По данным проф. Князевского Б.А. амплитуда напряженности магнитного поля во время магнитных бурь, продолжающихся от нескольких минут до нескольких суток, может возрасти в тысячи, а иногда в десятки тысяч раз.

В данном случае имеется в виду электрическое поле постоянных зарядов (с положительным зарядом в ионосфере и отрицательным в земле) и магнитное поле земли, но при условии резких изменений величины напряженности электрической и магнитной составляющих поля в процессе магнитных бурь, представляющее собой

нестационарное переменное поле. Физиологическое воздействие ЭМП Земли на живой организм нельзя сравнивать с регулярным переменным электрическим полем, например, создаваемым ЛЭП промышленной частоты, из-за разницы физических явлений и физиологических процессов в организме при воздействиях, вызываемых электрическим полем разного рода тока, частоты и длительности воздействия на живую клетку и ткани организма.

Естественное постоянное магнитное поле земли может быть оценено величиной магнитной индукции (плотность магнитного потока), которая составляет

$$B \approx 10^{-4}, \text{ тесла (100 мкТл).}$$

Для оценки величины магнитного поля на практике используются напряженность магнитного поля и индукция, поэтому для пересчета величины магнитной индукции B (тесла) и напряженности магнитного поля H (А/м) целесообразно иметь в виду соотношение

$$B = \mu_0 \mu H \text{ или } B = 4\pi \cdot 10^{-7} \mu H, \text{ Тл,}$$

где μ — магнитная проницаемость среды, в воздухе $\mu \approx 1$; μ_0 — магнитная постоянная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Излучение ЭМП может происходить вследствие изменения уровня энергии электронов при переходе их с одной электронной оболочки атома на другую при различных ядерных реакциях или при взаимодействии различных элементарных частиц. Такое электромагнитное поле часто называют «жестким», так как колебания происходят с чрезвычайно высокой частотой и быстро затухают в пространстве.

Излучение ЭМП может быть вызвано свободными электронами, двигающимися с ускорением. Работа, затрачиваемая на их ускорение, частично преобразуется в энергию ЭМП. Такой вид излучения осуществляется при присоединении каких-либо проводников к зажимам источника переменной ЭДС, под действием которой свободные электроны проводника начинают совершать колебательные движения, создавая ЭМП в окружающем пространстве. Такой проводник, преобразующий энергию источника переменной ЭДС в энергию ЭМП, называется антенной.

В качестве антенн могут служить специальные устройства направленного и ненаправленного излучения ЭМП, применяемые для целей электросвязи, но это могут быть и ЛЭП, и тяговые сети электрического транспорта, в устройствах которых ЭМП, как пра-

вило, промышленной частоты 50 Гц излучается в окружающее пространство непреднамеренно.

Теория Д. Максвелла позволила установить, что скорость распространения электромагнитных волн в какой-либо среде определяется зависимостью

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (2.1)$$

где c — скорость света в вакууме, м/с; ϵ — диэлектрическая проницаемость среды; μ — магнитная проницаемость среды.

Для воздуха $\epsilon \approx \mu \approx 1$ и скорость распространения электромагнитных волн v близка к скорости света:

$$v \approx c \approx 3 \cdot 10^8, \text{ м/с.}$$

Если колебания электронов в антенне создаются источником с периодически изменяющейся ЭДС с периодом T и в некоторый момент t_0 мгновенное значение ЭМП у антенны имеет максимальную величину, то такую же величину оно будет иметь, спустя время T . За это время существовавшее в начальный момент у антенны ЭМП переместится на расстояние

$$\lambda = vT. \quad (2.2)$$

Минимальное расстояние между двумя точками пространства, поле в которых имеет одинаковую фазу, называется длиной волны. Как следует из выражения (2.2), длина волны λ зависит от скорости распространения и периода колебаний электронов в антенне. Так как частота тока $f = 1/T$, то длина волны

$$\lambda = \frac{v}{f}. \quad (2.3)$$

Длина волны существенно зависит от частоты переменного ЭМП, например, для промышленной частоты $f = 50$ Гц длина волны составляет $\lambda = 6\,000\,000$ м, а для частот радиосвязи $f = 300$ МГц соответственно $\lambda = 1$ м.

Электромагнитные волны ЭМП представляют собой волны поперечного типа: в любой момент времени и в любой точке направления действия магнитного и электрического полей (векторы напряженности магнитного и электрического полей: H и E) перпендикулярны направлению распространения волны, при этом направление электрического поля всегда перпендикулярно направлению магнитного поля (рис. 2.1).

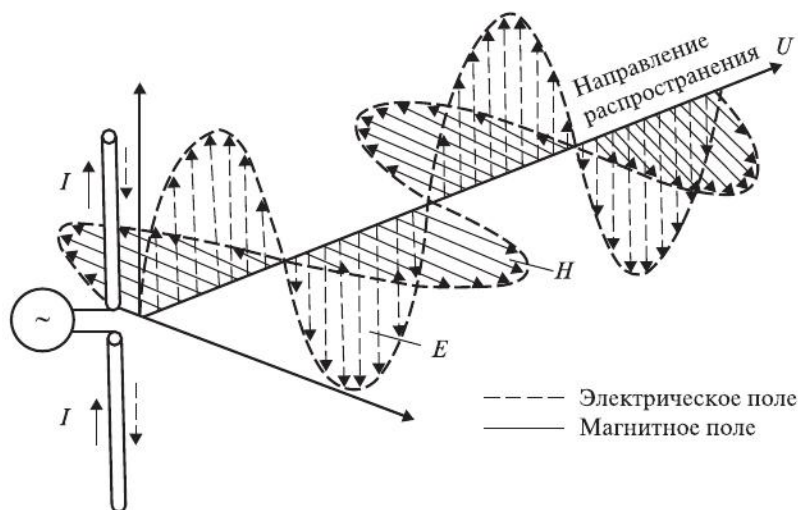


Рис. 2.1. Структура волн ЭМП

В зависимости от частоты волны ЭМП обладают некоторыми характерными особенностями, поэтому их подразделяют:

- на низкочастотные (0—10 000 Гц);
- диапазона радиосвязи (10 кГц — 300 ГГц);
- оптического диапазона (300 ГГц — 300 ПГц);
- ионизирующие (300 ПГц — 30 000 ЭГц).

Таким образом, длина волн ЭМП может изменяться от нескольких километров до долей пикометра (10^{-12} м).

2.2. Электромагнитные волны ЭМП, используемые в электросвязи

Условия распространения электромагнитных волн в окружающем воздушном пространстве существенно различаются в зависимости от длины волны. В электросвязи волны ЭМП (рис. 2.2) условно разделяют на волны, распространяющиеся вдоль земной поверхности (так называемый *земной луч*), и волны, излучаемые под некоторым углом к горизонту (так называемый *пространственный луч*).

Земной луч ЭМП, проходя вдоль поверхности земли, наводит в ней переменные токи, протекание которых встречает тем большее сопротивление, чем выше частота переменного поля, поэтому поглощение энергии ЭМП возрастает с ростом частоты.

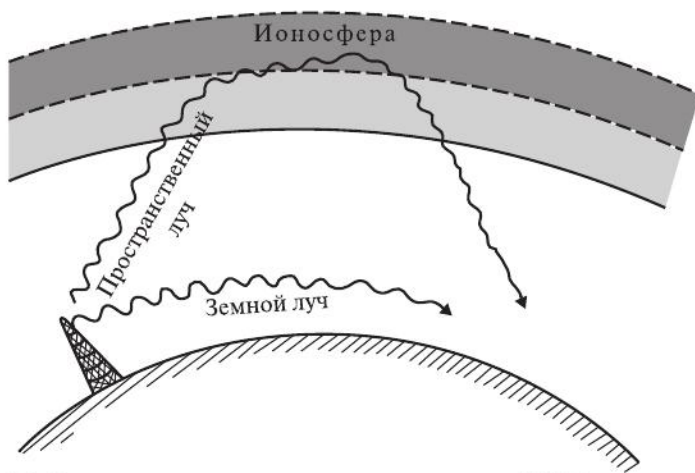


Рис. 2.2. Распространение электромагнитных волн ЭМП электросвязи в окружающем пространстве земли

Пространственный луч попадает в верхние слои атмосферы — ионосферу. Под действием ЭМП свободные заряды ионосферы начинают совершать упорядоченное колебательное движение, что приводит к возникновению дополнительного излучения, часть которого возвращается на землю на большом расстоянии от источника излучения ЭМП. Энергия падающей на ионосферу волны только частично переходит в энергию отраженной волны, часть ее превращается в тепловую и поглощается атмосферой, причем доля поглощенной энергии увеличивается с уменьшением частоты или увеличением длины волны. ЭМП с длиной волны более 3000 м (частота до 100 кГц) называют *длинными волнами*, поглощение их в земной поверхности мало, а в ионосфере велико. В этом случае с помощью земного луча можно осуществлять связь на расстояния в несколько тысяч километров.

ЭМП с длиной волны от 3000 м до 200 м (частота от 100 кГц до 1,5 МГц) называют *средними волнами*, поглощение их в земной поверхности возрастает, но появляется достаточно интенсивная составляющая ЭМП, отраженная от ионосферы, за счет которой дальность связи также может достигать нескольких тысяч километров.

ЭМП *коротковолнового диапазона*, к которому принято относить длины волн от 200 до 10 м (частота от 1,5 до 30 МГц), поглощаются в земле столь интенсивно, что практически связь за счет земно-

го луча становится невозможной на расстояниях свыше нескольких десятков километров. Связь может осуществляться на земной поверхности на любые расстояния с помощью отраженного от ионосферы коротковолнового луча ЭМП.

ЭМП с более короткими длинами волн (менее 10 м) получили название *ультракоротких* (метровые волны с длиной волны от 10 до 1 м, чему соответствуют частоты от 30 до 300 МГц; дециметровые — от 1 до 0,1 м, чему соответствуют частоты от 300 до 3000 МГц; сантиметровые — от 10 до 1 см, чему соответствуют частоты от 3 до 30 ГГц; миллиметровые — от 10 до 1 мм, чему соответствуют частоты от 30 до 300 ГГц).

Ультракороткие волны ЭМП не обладают способностью огибать земную поверхность, поэтому связь с их помощью может практически осуществляться только в пределах зоны прямой видимости. Ультракороткие волны находят широкое применение в устройствах слежения и радиолокации, телевидения, линий телеуправления и в других специальных устройствах электрической связи.

2.3. Электромагнитные поля электроустановок

Электроустановками (ЭУ) называется совокупность машин, аппаратов, линий и вспомогательного оборудования (вместе с сооружениями и помещениями, в которых они установлены), предназначенных для производства, преобразования, трансформации, передачи, распределения электрической энергии и преобразования ее в другой вид энергии.

ЭУ условно можно подразделить по роду тока и устройству на электроустановки:

- трехфазного переменного тока промышленной частоты;
- однофазного переменного тока промышленной частоты;
- постоянного тока;
- специальные электроустановки.

По условиям электрической безопасности ЭУ переменного тока разделяются по действующему значению напряжения на электроустановки до 1000 В и на электроустановки выше 1000 В.

В настоящее время ЭУ разного рода тока по условиям электрической безопасности подразделяют:

- пониженного напряжения (до 50 В переменного и постоянного тока);

– низковольтные (от 50 до 1000 В переменного тока и от 50 до 1500 В постоянного тока);

– высоковольтные (выше 1000 В переменного и 1500 В постоянного тока).

Электрической сетью называется совокупность ЭУ для передачи и распределения электроэнергии, состоящая из подстанций, распределительных устройств, токопроводов, воздушных (ВЛ) и кабельных (КЛ) линий электропередачи, расположенных на определенной территории.

Приемником электроэнергии (электроприемником) называется аппарат, агрегат, механизм, предназначенный для преобразования электроэнергии в другой вид энергии.

Потребителем электрической энергии называется электроприемник или группа ЭП, объединенных технологическим процессом и размещенных на определенной территории. ЭУ, включающие электрические сети и электроприемники, являются источниками ЭМП.

По роду тока электроустановки подразделяются на установки *постоянного* и на установки *переменного* тока.

По способу выполнения электрических сетей ЭУ переменного тока подразделяются следующим образом:

- сети напряжением *до 1 кВ*:

- на трехфазные четырехпроводные с глухозаземленной нейтралью (TN-C, TT);

- то же пятипроводные с глухозаземленной нейтралью (TN-S);

- то же трехпроводные с изолированной нейтралью (IT),

- сети напряжением *выше 1 кВ*:

- на трехфазные трехпроводные с эффективно заземленной или заземленной нейтралью (с большими токами замыкания на землю);

- то же с изолированной нейтралью (с малыми токами замыкания на землю);

- специальные, включая тяговые сети постоянного и однофазного переменного тока, до и выше 1 кВ.

ЭМП линий электрической передачи и открытых распределительных устройств электроустановок существенно зависит от способа выполнения сетей, и в частности, от него зависит соотношение напряженности электрического и магнитного полей в пространстве, окружающем ЛЭП.

Промышленные ЭУ создают вокруг себя ЭМП, вредное воздействие на человека которых определяется следующими основными факторами:

- продолжительностью воздействия;
- расстоянием или размером санитарно-защитной зоны между источником ЭМП и местом расположения человека;
- величиной напряжения ЭУ;
- геометрическим расположением токоведущих проводников в пространстве над поверхностью земли;
- родом тока (постоянного или переменного), частотой переменного тока, величиной тока (передаваемой энергии), протекающего по проводникам ЭУ, спектром синусоидальных гармонических составляющих выпрямленного тока и напряжения;
- несинусоидальностью переменного тока и несимметрией токов в трехфазных электрических сетях;
- магнитной и диэлектрической проницаемостью среды.

2.4. Общие сведения о вредном воздействии ЭМП на человека

Длительное воздействие ЭМП на человека может вызвать повышенную утомляемость, появление сердечных болей, нарушение функций центральной нервной и эндокринной систем, однако в начале 60-х гг. XX в. в исследованиях ученых стали появляться значительно более тревожные сведения. Так, в одной из первых работ в США в этой области была установлена связь между развитием лейкемии у детей в штате Колорадо и воздействием ЭМП сетей промышленной частоты.

Вслед за этим появилась информация об аналогичных исследованиях, проведенных в Швеции в 1958—1973 гг. для населения в возрасте до 18 лет. Измерения ЭМП проводились для построек, расположенных в пределах 150 м вокруг подстанций, трансформаторов, электрических линий железных дорог и ЛЭП. Вокруг 48 жилых домов индукция переменного ЭМП составляла более 0,3 мкТл, и именно в этой группе жителей опухоли и лейкемии встречались в два раза чаще. Позднее с целью проверки гипотезы о возможном развитии опухолей у людей, проживающих вблизи ВЛ, в Швеции была проведена большая эпидемиологическая работа, которая закончилась в 1992 г. Под наблюдением находились до 500 тыс чело-

век, проживающих от одного до 25 лет в 800-метровых коридорах вдоль трасс ВЛ 200 и 400 кВ. Тщательная статистическая обработка данных показала, что существует корреляция между развитием рака, в особенности детской лейкемии, и воздействием полей ВЛ. При повышении индукции магнитного поля выше 0,1 мкТл риск заболевания возрастает почти в четыре раза.

В Дании было обследовано 1707 детей до 16 лет, проживающих вблизи ЛЭП, у которых развились опухоли мозга, злокачественная лимфома и лейкемия. Устойчивая корреляция между развитием опухоли у детей и их проживанием вблизи ЛЭП была установлена при средних значениях индукции ЭМП промышленной частоты 0,3—0,4 мкТл и выше, менее выраженная связь наблюдается и при значениях индукции от 0,1 мкТл.

В Финляндии была обследована группа из 134 800 детей в возрасте до 19 лет, проживающих на расстоянии 500 м от воздушных ВЛ 110—400 кВ. Статистически значимая «избыточность» числа опухолей мозга была отмечена у мальчиков, которые подвергались воздействию магнитного поля с индукцией выше 0,2 мкТл.

Ученые из университета штата Северная Каролина (США) обследовали большое число пациенток, имеющих контакт с электромагнитным излучением, и пришли к выводу, что воздействие полей увеличивает риск развития рака молочной железы.

В США в 1991 г. были опубликованы данные о повышенном риске заболевания лейкозом для детей, которые регулярно пользовались видеоиграми, электрическими одеялами или другими видами электрообогревателей.

В нашей стране, к сожалению, не установлены полные гигиенические нормативы для пребывания в зоне действия ЭМП для различных категорий населения.

Существующие нормативы предельно допустимых уровней (ПДУ) РФ в основном предназначены для обслуживающего персонала ЭУ промышленной частоты и контролируются (при специальной оценке труда) часто только по одному показателю — напряженности электрического поля: 5 кВ/м в течение 8 ч рабочего дня, 10 кВ/м в течение 3 ч в день, 20 кВ/м и выше до 10 мин в день (нормирование параметров ЭМП изложено ниже).

Многие специалисты склоняются к принятию в качестве безопасных норм для людей, постоянно пребывающих вблизи ВЛ пе-

ременного тока промышленной частоты, уровня напряженности электрического поля до 0,5 кВ/м, а индукции переменного магнитного поля до 0,1 мкТл.

По данным проф. К.Р. Малаяна (г. Санкт-Петербург), параметры ЭМП постоянного тока, при которых начинают действовать те или иные механизмы в клетках и организме человека, приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Показатели действия магнитного поля на живые ткани и некоторые его уровни на поверхности земли

Физические механизмы действия на человека, источники и биологические уровни магнитного поля	Напряженность, кА/м	Индукция, мТ
Нарушение пространственной ориентации биомолекул	800	1 000
Магнитогидротормозной эффект	160	200
Изменение электропроводности воды	115	144
Магнитные эффекты в химических реакциях	8—80	10—100
Увеличение вязкости воды	11	13,8
ПДУ при 8-часовом рабочем дне для постоянного магнитного поля	8	10
Курская магнитная аномалия	0,16	0,2
Геомагнитное поле земли	0,025—0,1	0,0314—0,13

В последние годы в школе проф. Кузнецова К.Б. (Белинский С.О., Закирова А.Р., УрГУПС, г. Екатеринбург) выявлены данные о вредном воздействии постоянного (выпрямленного) ЭМП на организм персонала. Выпрямленное напряжение и ток, используемый для электрической тяги, содержат, кроме постоянных составляющих, спектр переменных составляющих, так называемых гармоник переменного тока частотой в диапазоне до 10 кГц.

Исследованиями установлено, что напряженность электрического поля (ЭП), определяемая напряжением тяговой сети 25 кВ переменного тока или 3,3 кВ постоянного с учетом действия постоянной и переменных составляющих не представляет опасности для персонала. Напряженность магнитного поля (МП) в тяговой сети переменного и постоянного тока с учетом постоянной и переменных составляющих может существенно превышать нормируемые значения.

2.5. Стандарты и нормы вредного воздействия ЭМП на человека

Национальными организациями, активно работающими в области нормирования ЭМП, являются Американский национальный институт стандартов (ANSI), Американская конференция государственных промышленных гигиенистов (ACGIH), Немецкий электротехнический союз (VDE), Британский Национальный центр радиологической защиты (NRPB). Среди международных организаций, разрабатывающих рекомендации и нормы на вредное воздействие ЭМП, большую роль играют Международная электротехническая комиссия МЭК (IEC), Всемирная организация здравоохранения ВОЗ (WHO), Ассоциация радиационной защиты (IRPA) в лице ее комиссии по неионизирующим излучениям (INIRC) и ряд других.

Особенно активно разработка международных стандартов ведется в Европе, в связи с образованием Европейского сообщества (ЕС). Европейский комитет по стандартизации в электротехнике (CENELEC) образовал в 1989 г. технический комитет (TC 111) «Действие ЭМП на человека», две рабочие группы которого подготовили проект Европейского стандарта, принятый в виде директивы ЕС (Directive 2004/40/ЕС Электромагнитные поля и волны), которой установлены допустимые уровни напряженностей ЭП и МП для частотного диапазона до 300 ГГц. Предельные значения величин получены из сочетания предложений каждой из рабочих групп (комиссии ICNIRP и комиссии ICNIRP 7/99).

Интересно сформулированы цели и задачи директивы ЕС. Целью является установление минимальных требований к защите работников от рисков для их здоровья и безопасности, возникающих или могущих возникнуть в результате воздействия ЭМП во время их работы. Это относится к рискам из-за известных краткосрочных побочных эффектов в организме человека, вызванных циркуляцией индуцированных токов и поглощением энергии, а также при контакте с током; решения долгосрочных эффектов в ней не предлагаются.

Директива определяет «электромагнитные поля» как статические магнитные и изменяющиеся во времени электрические, магнитные и электромагнитные поля с частотой от 0 до 300 ГГц.

Директива устанавливает предельно допустимые напряженности на различных уровнях частоты, которые, как известно, могут при-

чинить вред здоровью человека, особенно в отношении сердечно-сосудистой системы, центральной нервной системы, а также теплового стресса на организм человека или его частей (особенно тканей). Кроме того, она устанавливает действующие значения, при превышении которых работодатель должен принять меры, указанные в директиве. Действующие значения взяты из руководящих принципов, принятых Международной комиссией по ионизирующим излучениям (ICNIRP).

Директива устанавливает требования к работодателям: они должны оценить, измерить и рассчитать уровни воздействия электромагнитных полей на рабочих. Результаты оценки риска должны быть зафиксированы для подходящей среды и постоянно обновляться на регулярной основе. Кроме того, оценки рисков должны обновляться на регулярной основе, особенно если произошли значительные изменения, которые могут сделать их устаревшими, или если результаты наблюдения за состоянием здоровья показывают, что это необходимо.

При проведении оценки рисков работодатель должен уделять особое внимание уровню, частотному спектру, типу и продолжительности воздействия, помехам для других электронных устройств и возможности пожаров и взрывов в результате воспламенения горючих материалов.

Если действующие значения превышены и если не может быть доказано, что нет никакого риска для здоровья работников, работодатели должны осуществлять план действий по предотвращению воздействия на работников превышения предельно допустимой напряженности. Действия могут включать адекватные технические или организационные меры. Если предельно допустимые напряженности превышены, работодатель обязан немедленно принять меры по снижению их воздействия до уровня ниже предельных значений.

Работодатель должен обеспечить, чтобы работники, которые подвержены рискам от ЭМП на работе, и/или их представители получали любую необходимую информацию и профессиональную подготовку по итогам оценки рисков.

Обращает на себя внимание, что в практике нормирования предельно допустимых уровней ЭМП в странах ЕС на первый план выходят нормы энергетических показателей вредного воздействия ЭМП (табл. 2.2). Предельные вредные значения, указанные в

табл. 2.3, получены на основе предельно допустимых напряженностей в соответствии с принципами, установленными Международной комиссией по неионизирующим излучениям (ICNIRP) в своих рекомендациях, которые предназначены, чтобы ограничить воздействие неионизирующих излучений (ICNIRP 7/99).

В табл. 2.2 и 2.3 приведены некоторые нормы из директивы ЕС.

Таблица 2.2

Предельно допустимые уровни воздействия при выполнении всех условий нормирования

Диапазон частоты f	Плотность тока J (мА/м ²), эффективное среднее значение	Удельная поглощенная мощность SAR для всего тела, Вт/кг, локально	SAR для головы и корпуса, Вт/кг, локально	SAR для конечностей, Вт/кг	Плотность мощности, Вт/м ²
До 1 Гц	40	—	—	—	—
1—4 Гц	$40/f$	—	—	—	—
4—1000 Гц	10	—	—	—	—
1000 Гц — 100 кГц	$f/100$	—	v	—	—
100 кГц — 10 МГц	$f/100$	0,4	10	20	—
10 МГц — 10 ГГц	—	0,4	10	20	—
10 ГГц — 300 ГГц	—	—	—	—	50

Примечания: 1. f — частота переменного тока, измеряемая в герцах.

2. Предельная допустимая плотность тока для защиты от острых последствий воздействия на ткани центральной нервной системы в области головы и туловища. В пределах экспозиции в диапазоне частот от 1 Гц до 10 МГц превышение вызывает неблагоприятное воздействие на центральную нервную систему. Этот тип острых эффектов, как правило, мгновенен и с научной точки зрения нет никаких причин, чтобы изменить ограничения для краткосрочного воздействия. Однако, поскольку пределы воздействия основаны на вредном воздействии на центральную нервную систему, они могут позволить более высокую плотность тока в тканях, отличных от центральной нервной системы при тех же условиях облучения.

3. Из-за электрической неоднородности тела, плотность тока должна быть рассчитана как среднее на площади 1 см² перпендикулярно направлению тока.

4. Для частот до 100 кГц пиковое значение плотности тока может быть получено путем умножения действующего значения на $(2)^{1/2}$.

5. Для частот до 100 кГц и импульсных магнитных полей максимальная плотность тока, связанная с импульсами, может быть рассчитана на основе времени нарастания/спада и максимальной скорости изменения магнитного потока. Тогда индуцированная плотность тока может быть сравнима с соответствующим предельным значением экспозиции. Для импульсов длительностью t_p эквивалентные частоты должны применяться к предельно допустимой плотности, должны рассчитываться по формуле $F = 1/(2t_p)$.

6. Все SAR-значения должны быть усредненными в интервале шести минут.

7. Масса, которую нужно учитывать для расчета локализованной SAR усредняется до 10 г смежных тканей. Так что максимальными значениями SAR должны быть значения, используемые для оценки воздействия. Эти 10 г ткани должны быть массой смежных тканей с почти однородными электрическими свойствами. Следует признать, что понятие «непрерывная масса ткани» может быть использовано в вычислительной дозиметрии, но может представлять трудности для прямых физических измерений. В этом случае можно использовать простую геометрию, такие как кубическая масса ткани, при условии, что расчетная дозиметрические величины имеют более низкие значения, чем указано в руководстве.

8. Для импульсных воздействий в диапазоне частот от 0,3 до 10 ГГц и при локальном воздействии на голову рекомендуется дополнительное значение предела воздействия, чтобы ограничить и избежать слуховые эффекты за счет терморасширения. В этом случае SA не должно превышать в среднем 10 мДж/кг на 10 г ткани.

9. Средние плотности мощности должны быть рассчитаны на открытой площади 20 см² и с интервалом в $68/f^{1,05}$ мин (где f — в ГГц), чтобы компенсировать постепенное уменьшение глубины проникновения параллельно с постепенным увеличением частоты. Максимальная пространственная плотность мощности в 1 см² не должна превышать 50 Вт/м².

10. В отношении импульсных или переходных электромагнитных полей или вообще в отношении одновременного воздействия полей с множеством частот должны применяться соответствующие методы оценки, измерения и/или расчеты, что делает возможным анализ характеристик формы волн и характера биологического взаимодействия с учетом европейских гармонизированных стандартов, установленных Cenelec.

Таблица 2.3

Предельные значения (эффективные значения стабильного поля)

Диапазон частоты	E (В/м)	H (А/м)	B (μТ)	Плотность мощности эквивалентной плоской волны S_{eq} (Вт/м ²)	Конт. ток I_c (mA)	Индук. ток конечн. I_L (mA)
1	2	3	4	5	6	7
0—1 Гц	—	$1,63 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	—	1,0	—
1—8 Гц	20 000	$1,63 \cdot 10^5/f^2$	$2 \cdot 10^5/f^2$	—	1,0	—

1	2	3	4	5	6	7
8—25 Гц	20 000	$2 \cdot 10^4/f$	$2,5 \cdot 10^4/f$	—	1,0	—
0,025— 0,82 кГц	$500/f$	$20/f$	$25/f$	—	1,0	—
0,82— 2,5 кГц	610	24,4	30,7	—	1,0	—
2,5— 65 кГц	610	24,4	30,7	—	$0,4f$	—
65— 100 кГц	610	$1600/f$	$2000/f$	—	$0,4f$	—
0,1— 1 МГц	610	$1,6/f$	$2/f$	—	40	—
1—10 МГц	$610/f$	$1,6/f$	$2/f$	—	40	—
10— 110 МГц	61	0,16	0,2	10	40	100
110— 400 МГц	61	0,16	0,2	10	—	—
400— 2000 МГц	$31f^{1/2}$	$0,008f^{1/2}$	$0,01f^{1/2}$	$f/40$	—	—
2—300 ГГц	137	0,36	0,45	50	—	—

Примечания: 1. f — частота в принятых единицах, указанных в колонке диапазона частот.

2. Для частот от 100 кГц до 10 ГГц средний S_{eq} , E , H , B и I_L должны быть измерены в течение периода времени 6 мин.

3. Для частот выше 10 ГГц средние значения S_{eq} , E , H и B должны быть усреднены по времени за $68/f^{1,05}$ — минутный период (f измеряется в ГГц).

4. Для частот до 100 кГц действующий пик напряженности поля может быть получен путем умножения среднеквадратического значения на $(2)^{1/2}$. Для импульсов длительностью t_p эквивалентные частоты, которые должны применяться к действующим значениям, могут быть рассчитаны по формуле $f = 1/(2t_p)$.

Для частот от 100 кГц до 10 МГц действующий пик напряженности поля рассчитывается путем умножения соответствующих значений эффектов вредности на 10^a , где $a = (0,665 \log(f/105) + 0,176)$, где f измеряется в Гц.

Для частот от 10 МГц до 300 ГГц действующий пик рассчитывается путем умножения соответствующих значений эффектов вредности на 32 и 1000 для плотности мощности эквивалентной плоской волны.

5. Что касается импульсного или переходных электромагнитных полей (или вообще в связи с одновременным воздействием нескольких полей разной частоты) должны применяться соответствующие методы оценки и измерения

и/или расчеты, что делает возможным анализ характеристик составов волн и характера биологического взаимодействия с учетом европейских гармонизированных стандартов, установленных Cenelec.

6. Для пиковых значений модулированных импульсных ЭМП рекомендуется:

- для несущих частот выше 10 МГц среднее значение S_{eq} при длительности импульса не должно превышать в тысячу раз действующее значение S_{eq} ;
- или напряженности поля не должны превышать в 32 раза действующее значение напряженности, связанной с несущей частотой.

Нормы предельных допустимых уровней воздействующих на человека характеристик ЭМП, изложенные в Директиве ЕС и принятые в 28 странах Европы, все же имеют ряд показателей, отличающих их от Российских норм предельно-допустимых уровней не в лучшую сторону.

Во-первых, отсутствует показатель продолжительности воздействия ЭМП на человека. В Российских нормах это один из основополагающих показателей степени вредности воздействия ЭМП. Авторы Европейских норм возможно предполагают, что величины показателей ЭМП ниже установленных норм безвредны для человека при любой продолжительности воздействия, что вызывает большие сомнения. Упоминание, что риски негативного воздействия ЭМП установлены для краткосрочных режимов и «не предлагаются решения долгосрочных эффектов», создает дополнительные неясности, что является краткосрочным или долгосрочным эффектом.

Во-вторых, так называемый контактный ток I_c , который в российской практике принято называть «током прикосновения», для постоянного (0 Гц) и переменного (до 2500 Гц) тока принят величиной 1 мА, что соответствует согласно российскому ГОСТ 12.038-82(96) «ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов» наибольшему допустимому току I_h при нормальном (неаварийном) режиме работы ЭУ (не более 10 мин) только для постоянного тока; для переменного тока российские нормы значительно более жесткие: 50 Гц — 0,3 мА; 400 Гц — 0,4 мА.

Таким образом, значения величины тока 1 мА, представляющего собой уровень так называемого «ощущаемого тока» и по идеологии нормирования ограничивающего любой риск неблагоприятного воздействия на организм человека, в российских и европейских

нормах совпадают. Но в российских нормах нормируется и продолжительность воздействия, а также возможное воздействие на организм человека более высоких токов прикосновения при аварийных кратковременных режимах, о чем речь будет идти ниже.

В России нормы на воздействие ЭМП, разработанные еще в СССР, не перекрывают весь диапазон частот и имеют ступенчатый характер (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Предельно допустимые уровни нормируемых параметров ЭМП

Род и частота тока	Параметры ЭМП	Напряженность электрического поля, В/м	Напряженность магнитного поля, А/м	Индукция магнитного поля, мкТ	Плотность потока мощности, Вт/м ²
Переменный, 50 Гц	E, H, B	$100 \frac{50}{T+2}$ (персонал ЭУ) 500 (население)	Локальное: 800 — 8 ч, 1600 — 4 ч, 3200 — 2 ч, 6400 ≤ 1 ч; общее: 80 — 8 ч, 400 — 4 ч, 800 — 2 ч, 1600 ≤ 1 ч	Локальное: 1000 — 8 ч, 2000 — 4 ч, 4000 — 2 ч, 8000 ≤ 1 ч; общее: 100 — 8 ч, 500 — 4 ч, 1000 — 2 ч, 2000 ≤ 1 ч	—
Переменный до 10 кГц	E, B	Не нормируется	—	Не нормируется	—
Переменный: 30(60)—300 кГц	E	50 (30)	—	—	—
60—1500 кГц	H	—	5	—	—
0,3—3 МГц	E	50 (10)	—	—	—
3—30 МГц	E	20 (4)	—	—	—
30—50 МГц	E, H	10 (2)	0,3	—	—
50—300 МГц	E	5 (2)	—	—	—
0,3—300 ГГц	S	—	—	—	$2/T(0,05)$
Электростатические поля, постоянный	E, H	$100 \frac{50}{T+2}$	8000	—	—

Примечания: 1. В соотношениях нормируемых показателей ЭМП параметр T означает продолжительность рабочего дня или продолжительность пребывания вблизи источников ЭМП.

2. В скобках указаны значения нормируемых показателей для жилых массивов (зона 2).

Введенные в 2001 г. в России «Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок» (ПОТ РМ-016-2001) позволили существенно продвинуться вперед в области нормирования ЭМП для электроустановок промышленной частоты: впервые в правилах по охране труда при эксплуатации электроустановок зафиксированы нормы допустимых уровней вредного воздействия ЭМП на работников в соответствии с санитарными нормами (СанПиН 2.2.4. 1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях).

С 2014 г. нормативный документ имеет название «Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок».

Интересно сравнить предельно допустимые показатели нормируемых значений ЭМП для ЭУ переменного тока промышленной частоты в российских нормативных документах и в странах Евросоюза (табл. 2.5).

Таблица 2.5

Нормируемые показатели ЭМП для промышленной частоты (50 Гц) в России и странах Евросоюза

Страна	Длительность, ч	Электрическая напряженность, В/м	Магнитная напряженность, А/м	Магнитная индукция, мкТ
Россия	8	5000 (500 население)	80	100
Евросоюз	—	10 000	400	500

Даже эти неполные данные показывают, что в странах Евросоюза установлены значительно менее жесткие нормы показателей ЭМП в сравнении с российскими показателями. При этом не нормируется длительность пребывания при экспозиции ЭМП и очевидно в то же время проявляется более жесткое нормирование при кратковременных воздействиях, при которых российские нормы могут существенно превышать европейские.

Обращает на себя внимание нормирование для частотного диапазона 1 Гц — 100 МГц эффективного среднего значения плотности тока J мА/м² (см. табл. 2.2), характеризующей удельный уровень тока смещения в окружающем пространстве от электрической составляющей ЭМП. В практике российского нормирования параметров ЭМП этот показатель не применяется.

Виды воздействия ЭМП на человека подразделяются на:

- прямое воздействие (общее или локальное);
- косвенное воздействие.

Косвенное воздействие может происходить при касании предметов, находящихся в поле, на которых могут быть наведенные заряды (потенциалы) в соответствии с законами электростатической или электромагнитной индукции.

Во многих нормативных документах различаются контролируемые зоны, на которые они распространяются:

- производственная среда (производственные участки) — контролируемая зона (зона 1);
- жилые помещения, территория жилой застройки — неконтролируемые зоны (зона 2);
- специальные зоны (зоны морских судов, шахт, расположения радиолокационных антенн, линий электропередачи и т.п.).

Специфические, наиболее жесткие требования предъявляются к ЭМП при воздействии ЭМП на медицинский персонал и пациентов при основном или побочном воздействии, а также на лиц с имплантатами, чувствительными к действию ЭМП (особенно стимуляторами сердечной деятельности).

Предельно допустимые уровни (ПДУ) нормируемых параметров существенно различаются в нормативных документах и определяются рядом причин:

- различными критериями оценки вредности;
- принятыми коэффициентами запаса (от 3 до 100);
- различиями в результатах исследований;
- характером контролируемой зоны.

На выбор величин ПДУ оказывает влияние статус нормативных документов. Например, в США стандарты на действие ЭМП носят не обязательный, а рекомендательный характер и подразумевают консенсус заинтересованных лиц; в других странах регламентируется обязательность соблюдения норм и стандартов.

При прямом воздействии в качестве нормируемых параметров принимаются:

- напряженность невозмущенного однородного электрического поля E (В/м или кВ/м);
- напряженность магнитного поля H (А/м) или магнитная индукция B (Тл);
- плотность мощности излучения (потока мощности) S (Вт/м²);
- экспозиционная энергетическая доза D_s (Дж/м²);

- доза квадрата напряженности электрического поля D_e ($\text{В}^2\text{с}/\text{м}^2$);
- доза квадрата напряженности магнитного поля D_n ($\text{А}^2\text{с}/\text{м}^2$);
- удельная поглощенная энергия SA ($\text{Дж}/\text{кг}$);
- удельная поглощенная мощность SAR ($\text{Вт}/\text{кг}$).

В некоторых документах (СанПиН 2.2.4.1192-03) дозу квадрата напряженности электрического и магнитного полей называют энергетической экспозицией (ЭЭ), а в качестве единиц измерения используют соответственно единицы: для энергетической экспозиции электрического поля (ЭЭ_е) — $\text{В}^2\text{ч}/\text{м}^2$ и магнитного поля (ЭЭ_н) — $\text{А}^2\text{ч}/\text{м}^2$.

Нормируемыми значениями переменного ЭМП могут быть:

- амплитудные (пиковые);
- эффективные (действующие) или среднеквадратичные значения, осредненные на определенном временном отрезке; характерными значениями интервала осреднения принимаются 1 с, 6 мин, 30 мин.

Рассмотрим более подробно сущность нормируемых показателей высокочастотного ЭМП.

Плотность мощности излучения (обозначается S , единица измерения $\text{Вт}/\text{м}^2$) — характеризует плотность потока мощности высокочастотного излучения в точке пространства, подверженного воздействию ЭМП. В некоторой нормативной литературе эта величина имеет термин «плотность потока энергии», что уместно при жесткой связи мощности излучения с его продолжительностью.

Основные нормируемые показатели ПДУ напряженностей электрического и магнитного полей диапазона частот 1—300 ГГц Европейского союза и России приведены выше, а для диапазона частот 10 кГц — 300 ГГц на рис. 2.3.

Основные нормируемые показатели ЭМП представлены также в табл. 2.4.

Сравнение Европейских и Российских норм в настоящее время показывает, что нормируемые параметры для высокочастотных установок (пунктир на рис. 2.3) значительно более жесткие, чем российские.

Нормируемые параметры ЭМП рассматриваются как первичные (базовые) параметры, а остальные — как производные, связь которых с первичными определяется продолжительностью и условиями воздействия.

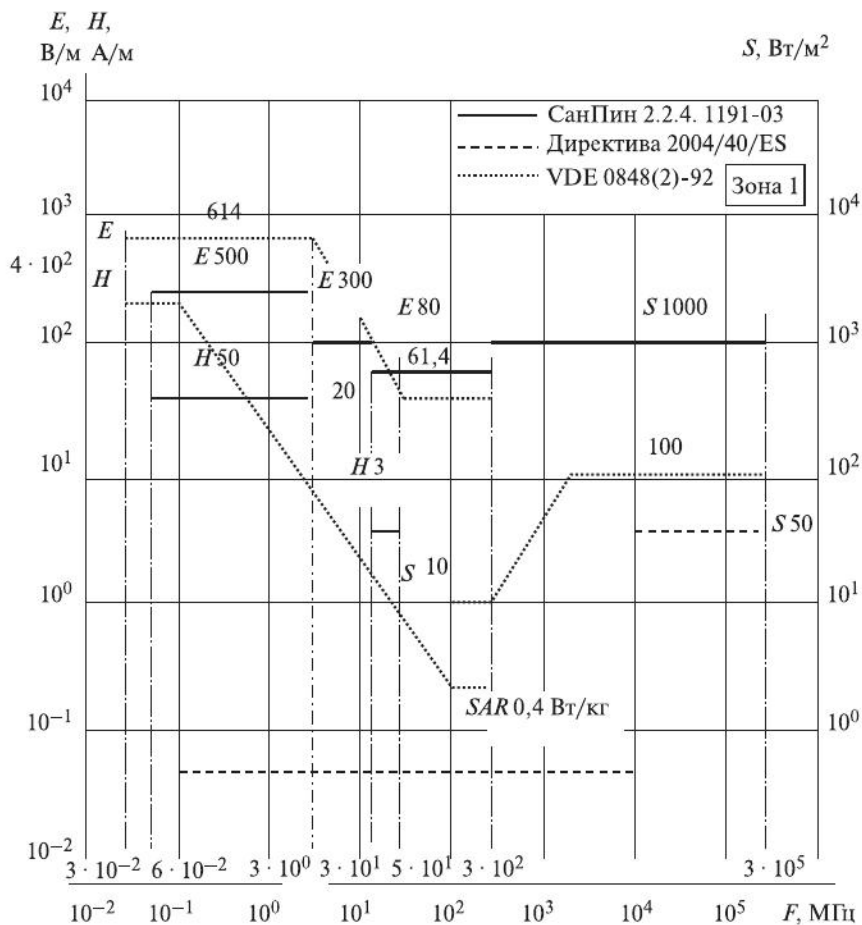


Рис. 2.3. Предельно допустимые уровни ЭМП для диапазона частот 10 кГц—300 ГГц

Нормы установлены для монохроматического излучения. Наличие в излучении составляющих с несколькими частотами (гармоники, наличие нескольких источников и т.п.) учитывается с помощью эквивалентных параметров, определяемых методом наложения как для линейных (E , H), так и для квадратичных параметров.

Экспозиционная энергетическая доза (энергетическая нагрузка) — плотность проникающей энергии ЭМП, обозначается D_s , единицы измерения Дж/м².

Удельная поглощенная энергия — поглощение одного джоуля энергии ЭМП в одном килограмме массы вещества, обозначение SA , единицы измерения Дж/кг.

Доза квадрата напряженности электрического и магнитного поля представляет собой интегральный показатель квадрата напряженности электрического D_e или магнитного D_H поля за определенный промежуток времени:

$$D_s = \int_{t_1}^{t_2} S(t)dt, \text{ Дж/м}^2; \quad D_e = \int_{t_1}^{t_2} E^2(t)dt, \text{ В}^2\text{с/м}^2; \quad (2.4)$$

$$D_H = \int_{t_1}^{t_2} H^2(t)dt, \text{ А}^2\text{с/м}^2. \quad (2.5)$$

Удельная поглощаемая мощность — мощность ЭМП, проникающего через один килограмм массы вещества, обозначается SAR , единицы измерения Вт/кг:

$$SA = dW/dm = dW/\rho dV, \text{ Дж/кг};$$

$$SAR = d(SA)/dt = d(dW/\rho dV)/dt, \text{ Вт/кг}.$$

Эффективные (среднеквадратичные) значения величин на определенном интервале времени могут определяться из соотношений:

$$\bar{S} = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} S(t)dt \quad \text{— для мощностей};$$

$$H = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} H^2(t)dt} \quad \text{— для линейных величин}.$$

Предельные значения энергетических нагрузок из практики российского нормирования приведены в табл. 2.6.

Определение значений ПДУ напряженностей электрического и магнитного полей E и H в зависимости от энергетической нагрузки находят из соотношений:

$$E_{\text{ПДУ}} = \sqrt{\frac{\text{ЭН}_e}{T}}, \quad H_{\text{ПДУ}} = \sqrt{\frac{\text{ЭН}_H}{T}}, \quad (2.6)$$

где T — продолжительность рабочего дня, ч.

В последние годы наметилась тенденция на снижение нормируемых параметров неионизирующих электромагнитных излучений в практике гигиенического нормирования России.

Таблица 2.6

Предельные значения энергетической нагрузки и ПДУ ЭМП

Параметры	Максимально допустимые уровни в диапазоне частот, МГц				
	до 0,03—3	до 3—30	до 30 — 50	до 50—300	до 300—300 000
$\text{ЭЭ}_e, \text{В}^2\text{ч}/\text{м}^2$	20 000	7000	800	800	—
$\text{ЭЭ}_H, \text{А}^2\text{ч}/\text{м}^2$	200	—	0,72	—	—
$E, \text{В}/\text{м}$	500	300	80	80	—
$H, \text{А}/\text{м}$	50	—	3,0	—	—
$\text{ЭЭ}_{\text{ППЭ}}, (\text{мкВт}/\text{см}^2)\cdot\text{ч}$	—	—	—	—	200
$\text{ППЭ}, \text{мкВт}/\text{см}^2, (10^{-2} \cdot \text{Вт}/\text{м}^2)$	—	—	—	—	1000 5000 (локальное для кистей рук)

2.6. Опасное воздействие ЭПМ на живые организмы

В зависимости от механизма воздействия электромагнитного поля на живые организмы различают опасное и вредное воздействие ЭМП.

Опасным воздействием ЭМП на живые организмы называют такое, при котором в результате его кратковременного действия возникает травма или другое нарушение деятельности тканей или органов живого организма.

Вредным воздействием ЭМП на живые организмы называют такое, при котором в результате длительного действия возникает обусловленное этим воздействием заболевание или снижение работоспособности.

Опасное воздействие ЭМП на живые организмы проявляется обычно в воздействии на них силовых электрических установок при попадании живого организма в электрическую цепь этих установок. Эта ситуация может возникнуть при случайном прикосновении к частям электроустановки, находящимся под напряжением, при повреждении электроустановок и появлении электрического напряжения электроустановки на корпусах электрооборудования или поверхности земли, на которых при нормальном режиме

работы электроустановки ЭМП отсутствовало. При кратковременном опасном воздействии ЭМП на человека различают *напряжение прикосновения* и *напряжение шага*.

Как уже указывалось, следует различать напряжения прикосновения и шага, а также холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (к.з.), т.е. до и после включения в цепь электрического сопротивления тела человека. В некоторых электрических цепях, образующихся в этих случаях, эти напряжения могут существенно отличаться по величине, поэтому в первом случае их называют напряжением до прикосновения, а во втором — напряжением прикосновения. Далее будет специально оговорено, если речь пойдет о напряжении до прикосновения.

Напряжением прикосновения называют разность потенциалов между двумя точками электрической цепи, которых касается человек.

Напряжением шага называют разность потенциалов поверхности земли на расстоянии шага.

Исход опасного воздействия ЭМП на человека при случайном прикосновении к токоведущим частям электрооборудования или частям, которые при нарушении изоляции могут оказаться под напряжением ЭМП, может быть различным. В одних случаях прикосновение человека к указанным частям электрооборудования будет сопровождаться прохождением через тело человека малых токов и окажется без опасных последствий, в других — токи могут достигать значений, способных вызвать электрическую травму и даже смертельное поражение человека.

В указанных случаях воздействие электрического тока на организм человека принято называть электрическим ударом.

Степень опасного воздействия ЭМП на человека определяют следующие основные факторы: род и величина напряжения и тока; частота электрического тока; путь тока через тело человека; продолжительность воздействия электрического тока или ЭМП на организм человека; условия внешней среды.

Схемы включения человека в электрическую цепь электроустановок при обслуживании электрооборудования могут быть различными:

- двухфазное прикосновение в трехфазных электрических сетях промышленной частоты 50 Гц;
- однофазное прикосновение в электрических сетях с заземленной нейтралью промышленной частоты;

- однофазное прикосновение в электрических сетях с изолированной нейтралью промышленной частоты;
- прикосновение к двум точкам электрической цепи с разными потенциалами ЭМП в специальных установках;
- однополюсное прикосновение в электрической сети постоянного тока;
- то же — двухполюсное.

Двухфазное прикосновение в трехфазных электрических сетях — наиболее опасный случай, так как к телу человека прикладывается наибольшее в данной ситуации напряжение электрической сети — линейное, а электрический ток через тело человека I_h имеет наибольшее значение, так как практически ничем не ограничивается:

$$I_h = \frac{\sqrt{3}U_{\Phi}}{R_h}, \quad (2.7)$$

где $\sqrt{3}U_{\Phi}$ — линейное напряжение, т.е. разность потенциалов ЭМП между фазами проводниками электрической сети, В; U_{Φ} — фазное напряжение трехфазной электрической сети, В; R_h — электрическое сопротивление тела человека, Ом.

Случаи двухфазного (двухполюсного) прикосновения являются чрезвычайно редкими, поэтому в практике анализа исследуются однофазные и однополюсные случаи прикосновения, возникающие при повреждении изоляции корпусов электрического оборудования, к которому по необходимости обращается человек в условиях производства, или в ситуации прикосновения человека одновременно к токоведущей части и заземленной конструкции.

Величина напряжений шага и прикосновения при повреждении электрической изоляции может характеризоваться коэффициентом прикосновения и шага:

$$\alpha_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{U_{\text{КО}}}; \quad \alpha_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{ш}}}{U_{3У}},$$

где $U_{\text{пр}}$, $U_{\text{ш}}$ — напряжения прикосновения и шага соответственно, В; $U_{\text{КО}}$ — напряжение корпуса оборудования относительно нулевого потенциала, В; $U_{3У}$ — напряжение на заземляющем устройстве относительно нулевого потенциала, В.

Коэффициенты прикосновения и шага представляют собой по существу относительные напряжения прикосновения и шага, отнесенные к максимально возможной разности потенциалов между оборудованием и нулевым потенциалом и выраженные в относительных единицах.

При возникновении контакта между токоведущими частями и корпусом электрооборудования на корпусе относительно нулевого потенциала земли появляется потенциал $U_{\text{КО}}$, величина которого составляет часть напряжения электроустановки. При наличии заземляющего присоединения корпуса к защитному заземляющему устройству потенциалы корпуса и ЗУ относительно нулевого потенциала будут равны, а ЗУ будет местом замыкания на землю.

Замыканием на землю называют случайное электрическое соединение, находящихся под напряжением частей электроустановки, с заземляющим устройством или землей, например, при падении провода воздушной ВЛ на землю.

Ток, стекая с ЗУ в землю, образует значительную область растекания. Область проводящего грунта вблизи ЗУ, где потенциалы точек земли не равны нулю, называют *зоной растекания тока*.

Заземляющее устройство может быть сложной формы, а электрические свойства грунта неоднородны, поэтому распределение электромагнитного поля в земле вблизи заземляющего устройства может определяться сложными зависимостями. С целью анализа распределения электромагнитного поля вблизи заземляющего устройства допустим, что ток стекает в землю через одиночный элемент заземляющего устройства — заземлитель полушаровой формы, расположенный в однородном грунте. Другой полюс цепи замыкания находится на бесконечно большом расстоянии от заземлителя. В этом случае линии тока в земле будут радиальными, а плотность тока j на расстоянии x от центра заземлителя определяется как отношение тока замыкания на землю $I_{\text{КЗ}}$ к площади полушаровой поверхности с радиусом x :

$$j = \frac{I_{\text{КЗ}}}{2\pi x^2}.$$

Для определения потенциала в точке А (рис. 2.4) выделим в поле растекания тока с полушарового электрода элементарный слой dx . Падение напряжения в этом слое dU равно

$$dU = Edx,$$

на основании уравнения Максвелла, называемое законом Ома, в дифференциальной форме

$$E = j\rho,$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м.

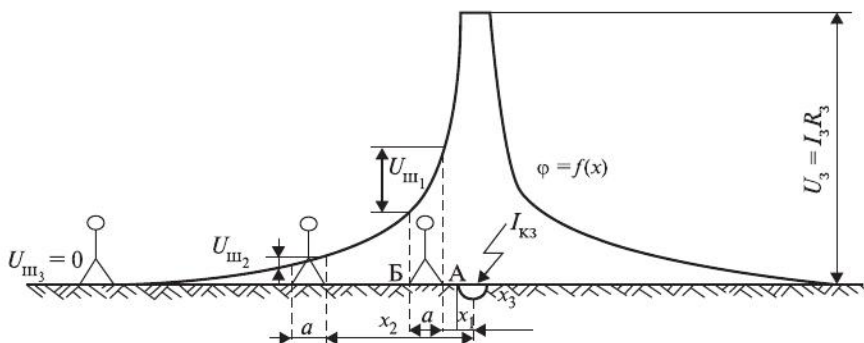


Рис. 2.4. Изменение потенциалов поверхности Земли по закону дробно нелинейной функции $1/x$

При удалении от полушарового электрода в бесконечность плотность тока, напряженность и потенциал электрического поля обращаются в нуль.

Потенциал земли в произвольной точке А, находящейся на расстоянии x от центра электрода, можно определить сложением падений напряжения dU на слоях земли с бесконечно малой толщиной dx от точки x до ∞ :

$$\varphi_A = U_A = \int_x^{\infty} dU = \frac{\rho I_{кз}}{2\pi} \int_x^{\infty} \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho I_{кз}}{2\pi x}, \quad (2.8)$$

где $I_{кз}$ — ток короткого замыкания на землю, который определяется структурой полной цепи замыкания, А; x — расстояние от центра электрода до произвольной точки пространства, м.

Из соотношения (2.8) видно, что потенциал точек поверхности земли уменьшается при удалении от места замыкания (от заземляющего электрода). Уменьшение напряжения определяется дробно-нелинейной функцией $1/x$ и в пределе стремится к нулю. Область земли, потенциал которой равен нулю, часто называют *электротехнической землей*, вкладывая в это понятие — место (точку) с нулевым потенциалом.

Кривая распределения потенциалов на поверхности земли у вертикального заземляющего устройства (электрода) имеет вид, подобный кривой распределения потенциалов на поверхности земли для заземлителя полушаровой формы.

Из кривой рис. 2.5 видно, что потенциал заземляющего устройства имеет максимальное значение, но уже на расстоянии 1 м

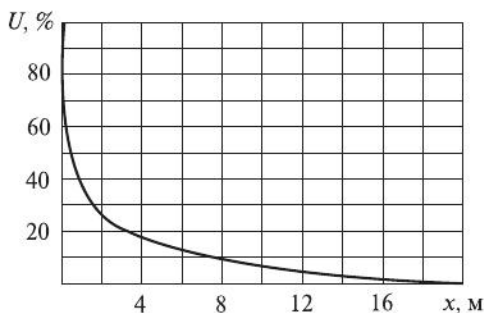


Рис. 2.5. Характер распределения потенциалов в земле при стекании тока с вертикального заземляющего устройства (электрода)

от места стекания тока с заземлителя потенциал снижается на 68 % ($\alpha_{\text{пр}} = 0,68$), в конце десятого метра снижение достигает 92 %, а на расстоянии 20 м потенциал точек земли практически равен нулю.

Заметное электрическое сопротивление току замыкания оказывает объем грунта, находящегося в радиусе 20 м от центра заземляющего устройства. За пределами этого участка земля представляет собой проводник с бесконечно большим поперечным сечением и незначительной проводимостью для протекающего электрического тока.

При попадании человека в зону растекания тока в земле его ступни касаются разных потенциалов электрического поля на поверхности. Разность потенциалов поверхности земли на расстоянии шага ($a = 1$ м, см. рис. 2.4) называют шаговым напряжением.

Величина шагового напряжения для одиночных заземлителей осесимметричной формы может быть получена аналитически. Для полусферического заземлителя (см. рис. 2.4) шаговое напряжение может быть определено из следующих соотношений:

$$U_{\text{ш1}} = \varphi_{\text{А}} - \varphi_{\text{Б}} = \frac{I_{\text{кз}} \rho}{2\pi x_1} - \frac{I_{\text{кз}} \rho}{2\pi(x_1 + a)} = \frac{I_{\text{кз}} \rho a}{2\pi x_1 (x_1 + a)},$$

$$U_{\text{ш2}} = \varphi_{\text{В}} - \varphi_{\text{Г}} = \frac{I_{\text{кз}} \rho a}{2\pi x_2 (x_2 + a)}. \quad (2.9)$$

Из соотношений (2.9) видно, что $U_{\text{ш1}} > U_{\text{ш2}}$ при $x_2 > x_1$, т.е. по мере удаления от места замыкания опасность воздействия на человека шаговых напряжений уменьшается.

При прикосновении человека к заземленному корпусу электрооборудования, оказавшемуся под напряжением, напряжение прикосновения может быть определено из соотношения

$$U_{\text{пр}} = \varphi_{\text{р}} - \varphi_{\text{н}} = \frac{I_{\text{кз}} \rho}{2\pi x_3} - \frac{I_{\text{кз}} \rho}{2\pi x} = \frac{I_{\text{кз}} \rho}{2\pi x_3} \cdot \frac{x - x_3}{x}, \quad (2.10)$$

где $\varphi_{\text{р}}$ и $\varphi_{\text{н}}$ — потенциалы рук (корпуса, заземлителя) и ступней ног (поверхности земли); x_3 — расстояние от центра до поверхности заземлителя, м; x — координата расположения человека, м.

Выражение (2.10) можно представить в виде $U_{\text{пр}} = U_3 \cdot \alpha_1$, где коэффициент прикосновения $\alpha_1 = \frac{x - x_3}{x} \leq 1$. По мере удаления от заземлителя напряжение прикосновения возрастает и на достаточном удалении практически становится равным напряжению на корпусе (при $x \gg x_3$ $\alpha_1 \approx 1$).

Таким образом, при повреждении изоляции (электрическом пробое) на корпусах оборудования могут возникать опасные *напряжения прикосновения*, а на проводящих основаниях помещений и на территориях (поверхности земли) *шаговые напряжения*. Полное напряжение прикосновения и его относительное значение в виде коэффициента напряжения прикосновения по мере удаления от места замыкания возрастают, а шаговое напряжение и коэффициент шагового напряжения — снижаются.

2.7. Опасность прикосновения к частям электроустановок в электрических сетях с заземленной нейтралью

Прикосновение к частям ЭУ вызывает изменение режима работы электроустановки, вызванное несанкционированным подключением к токоведущему проводу сети электрического сопротивления значительно меньшей величины, чем сопротивление изоляции ЭУ.

Обычно принято режим работы ЭУ до включения нагрузочного сопротивления называть режимом холостого хода, а режим после подключения — режимом нагрузки. Режим включения на зажимы источника тока близкого к нулю малого нагрузочного сопротивления называют режимом короткого замыкания.

Прикосновение человека к частям ЭУ не является ни режимом нагрузки, ни режимом короткого замыкания, поэтому при рас-

смотрении вопросов безопасности эксплуатации электроустановок различают:

- режим до прикосновения,
- режим прикосновения.

Особенностью режима прикосновения к частям ЭУ в однофазных и трехфазных сетях с заземленной нейтралью является равенство напряжения до прикосновения и напряжения прикосновения, т.е. разность потенциалов «фазный провод—земля» в режиме до прикосновения и в режиме прикосновения практически не меняется (рис. 2.6).

В трехфазной четырехпроводной сети с глухозаземленной нейтралью (TN-C) вычисление тока через тело человека и напряжения прикосновения к одной из фаз производят символическим (комплексным) методом. Аналогичный расчет характеризует процесс прикосновения и в сети TN-S, так как нулевой рабочий проводник (N) этой системы в электрическую схему для расчета тока прикосновения не входит и в процессе протекания тока не участвует.

Прикосновение человека к частям ЭУ может происходить по ряду причин:

- ремонтные работы под напряжением с применением неисправных защитных средств;

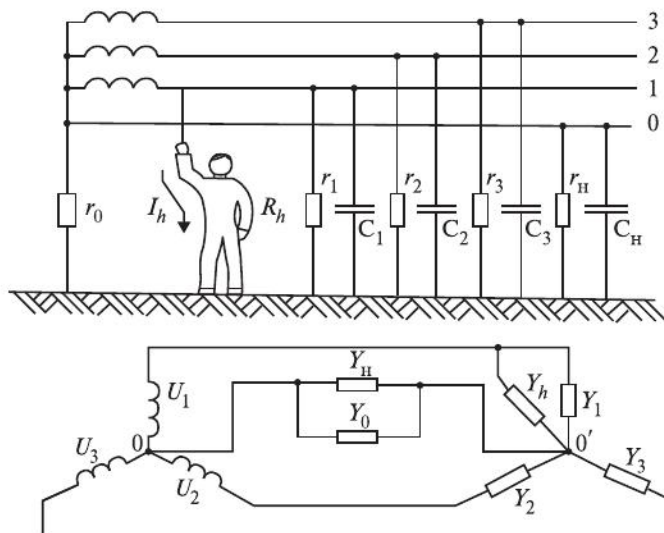


Рис. 2.6. Ситуация прикосновения человека к фазному проводу трехфазной четырехпроводной сети с заземленной нейтралью и ее схема замещения

- повреждение изоляции корпусов электрооборудования, на которых производятся работы (ручной электроинструмент, станки, бытовые электроприборы и т.п.);
- случайное прикосновение к частям ЭУ, находящимся под напряжением;
- ошибочное включение напряжения на отключенную для производства работ электроустановку.

В общем случае, когда распределенные вдоль линии сопротивления изоляции проводов и емкости проводов относительно земли заменяются сосредоточенными элементами электрической сети и они не равны между собой

$$r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq r_n, C_1 \neq C_2 \neq C_3 \neq C_n,$$

полные проводимости фазных и нулевого проводов относительно земли можно выразить в комплексной форме:

$$y_1 = \frac{1}{r_1} + j\omega C_1, y_2 = \frac{1}{r_2} + j\omega C_2, y_3 = \frac{1}{r_3} + j\omega C_3, y_n = \frac{1}{\kappa_n} + j\omega C_n.$$

При допущении о том, что проводимость электрической цепи через тело человека можно принять активной, активные проводимости заземления нейтрали питающего трансформатора и электрической цепи через тело человека определяются соответственно соотношениями:

$$y_0 = \frac{1}{r_0}, y_h = \frac{1}{R_h}.$$

При прикосновении человека к одной из фаз (например, к 1, см. рис. 2.6) напряжение, которое будет к нему приложено, определится векторной суммой фазного напряжения первой фазы U_1 и напряжением нулевой последовательности U_0 , которое возникнет из-за нарушения равенства проводимостей, включенных между фазами и землей, вызванного прикосновением человека к фазному проводу 1:

$$U_h = U_1 - U_0,$$

а ток через тело человека будет равен:

$$I_h = U_h y_h = (U_1 - U_0) y_h,$$

где U_1 — напряжение фазы 1 в комплексной форме, U_0 — напряжение нулевой последовательности или разность потенциалов нейтрали источника тока и нулевого потенциала земли, $В$.

Используя первый закон Кирхгофа для разветвленной цепи для точки 0' схемы замещения, найдем:

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_h = I_0$$

или

$$(U_1 - U_0)(y_h + y_1) + (U_2 - U_0)y_2 + (U_3 - U_0)y_3 = U_0(y_h + y_0). \quad (2.11)$$

Для векторов напряжений фаз симметричной трехфазной системы справедливы соотношения:

$$U_1 = U_\phi, U_2 = U_\phi a^2, U_3 = U_\phi a,$$

где $a = e^{-j \cdot 120^\circ} = 1/2 + j\omega\sqrt{3}/2$ — фазовый оператор трехфазной системы векторов напряжения, учитывающий сдвиг их фаз в пространстве на 120° , с учетом которого из соотношения (2.11) получим

$$U_0 = U_\phi \frac{y_1 + a^2 y_2 + a y_3 + y_h}{y_1 + y_2 + y_3 + y_h + y_0 + y_h}. \quad (2.12)$$

Искомое уравнение для напряжения прикосновения, воздействующего на человека, получим, подставляя в выражение для U_h значения составляющих из (2.12) и $U_1 = U_\phi$:

$$U_h = U_\phi \frac{y_2(1-a^2) + y_3(1-a) + y_h + y_0}{y_1 + y_2 + y_3 + y_h + y_0 + y_h}. \quad (2.13)$$

Ток, проходящий через тело человека, можно определить умножением напряжения прикосновения на проводимость электрической цепи через тело человека y_h :

$$I_h = U_\phi y_h \frac{y_2(1-a^2) + y_3(1-a) + y_h + y_0}{y_1 + y_2 + y_3 + y_h + y_0 + y_h}. \quad (2.14)$$

При *нормальном режиме* работы электрической сети проводимостью изоляции нулевого провода относительно земли y_h можно пренебречь, а проводимость изоляции фазных и нулевого проводов относительно земли по сравнению с проводимостью заземления нейтрали y_0 имеют малые значения (на несколько порядков ниже), что позволяет при определении напряжения прикосновения и электрического тока через тело человека с известным допущением приравнять их нулю:

$$y_1 = y_2 = y_3 \approx 0 \text{ или } y_1 + y_2 + y_3 + y_h \ll y_0.$$

В этом случае уравнения (2.13) и (2.14) значительно упрощаются, при этом напряжение прикосновения и ток через тело человека могут быть получены из выражений:

$$U_h \approx U_\Phi \frac{y_0}{y_0 + y_h} \quad \text{или} \quad U_h \approx U_\Phi \frac{R_h}{R_h + R_0}, \quad I_h \approx \frac{U_\Phi}{R_h + R_0}. \quad (2.15)$$

Таким образом, напряжение *доприкосновения* равно фазному напряжению электрической сети, а напряжение *прикосновения* определяется соотношением (2.15).

На практике ток через тело человека ограничивается не только сопротивлением нейтрали R_0 , но и другими, значительно большими по величине электрическими сопротивлениями. К этим сопротивлениям относятся: электрическое сопротивление обуви $R_{об}$, электрическое сопротивление пола или основания $R_{п}$, на котором находится человек. Выражения (2.15) в этом случае приобретут вид

$$U_h = U_\Phi \frac{R_h}{R_h + R_0 + R_{об} + R_{п}}, \quad I_h = \frac{U_\Phi}{R_h + R_0 + R_{об} + R_{п}}, \quad (2.16)$$

где $R_{об}$ — электрическое сопротивление обуви, имеет существенное значение при применении защитной диэлектрической обуви (>2 МОм); $R_{п}$ — электрическое сопротивление опорной поверхности ступней ног, которое может быть определено как электрическое сопротивление растеканию тока с равновеликих ступням по площади металлических дисков в проводящей среде.

Сопротивление растеканию тока для круглой пластины можно определить из соотношения

$$R_{п1} = \frac{\rho}{2d}, \quad R_{ппр} = \frac{\rho}{4d}, \quad R_{пш} = \frac{\rho}{d},$$

где $R_{п1}$ — сопротивление растеканию тока для одной ступни, Ом; ρ — удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м; d — диаметр площади круга, эквивалентного площади ступни ($d \approx 0,14$ м); $R_{ппр}$ — сопротивление растеканию тока для ступней ног при воздействии напряжения прикосновения, Ом; $R_{пш}$ — сопротивление растеканию ступней ног, Ом.

Согласно требованиям сопротивление заземления нейтрали R_0 питающих трансформаторов, генераторов и повторных заземлителей нулевого провода в четырехпроводных сетях до 1 кВ зависит от напряжения электроустановки и не превышает 8 Ом, а сопротивление цепи через тело человека R_h не может быть ниже нескольких сотен ом и в расчетах при напряжениях выше 50 В принимается равным так называемому внутреннему 1000 Ом, что позволяет

без большой погрешности в знаменателях уравнений (2.15), (2.16) величиной R_0 пренебрегать.

Таким образом, при прикосновении к одной из фаз трехфазной четырехпроводной сети с заземленной нейтралью тело человека оказывается под воздействием фазного напряжения сети U_Φ , а ток, проходящий через него, определяется этим напряжением и электрическим сопротивлением цепи через тело человека.

Одним из основных индивидуальных защитных средств защиты в процессе работы под напряжением при необходимости прикосновения к токоведущим частям является применение основных и дополнительных изолирующих защитных средств, что представляет собой включение последовательно с электрическим сопротивлением R_h больших сопротивлений, ограничивающих ток I_h до безопасной величины.

Это обстоятельство позволяет с достаточной степенью точности определять ток через тело человека и при случайном прикосновении к частям ЭУ:

$$I_h = \frac{U_\Phi}{R_h + R_{об} + R_{п} + R_0}, \quad (2.17)$$

где U_Φ — фазное напряжение ЭУ, В; $R_{об}$ — электрическое сопротивление обуви, кОм; $R_{п}$ — сопротивление растеканию тока для ступней ног на поверхности пола, земли и других изолирующих или проводящих основаниях, кОм; R_0 — сопротивление растеканию тока для заземляющего устройства нейтрали питающего трансформатора, которое при определении тока через тело человека без существенной погрешности может не учитываться из-за малого значения по сравнению с остальными слагаемыми знаменателя ($R_0 = 2-8$ Ом); I_h — электрический ток через тело человека, мА.

Анализ соотношения показывает, что величина тока через тело человека определяется в этом случае исключительно напряжением ЭУ и электрическим сопротивлением тела человека, которое может быть ограничено сопротивлением обуви, пола, а также сопротивлением растеканию ступней ног на поверхности пола или земли.

Факторы, ограничивающие протекание тока через тело человека, используются в практике эксплуатации ЭУ. В качестве индивидуальных защитных средств используются диэлектрическая обувь, перчатки, коврики, дорожки, изолирующие подставки и т.п.

Из уравнения (2.14) можно сделать вывод, что при равной проводимости изоляции фазных и нулевого проводов относительно зем-

ли и значительно меньшей их величине по сравнению с проводимостью заземления нейтрали ток через тело человека практически не изменяется с изменением активной и емкостной проводимости всех трех фаз электрической сети относительно земли.

Допустим, что при замыкании фазы 3 на землю проводимости изоляции неповрежденных проводов равны нулю, т.е. $y_1 = y_2 = y_3 = 0$. Тогда при аварийном режиме короткого замыкания одной из фаз ЭУ на землю через относительно малое активное сопротивление $r_{3М}$ формула (2.13) примет вид

$$U_h = U_\Phi \frac{y_3(1-a) + y_0}{y_3 + y_h + y_0}.$$

Полученное выражение с учетом соотношений $y_3 = 1/r_{3М}$, $y_0 = 1/r_0$, $y_h = 1/R_h$ преобразуется в выражение для напряжения прикосновения в действительной форме:

$$U_h = U_\Phi R_h \frac{\sqrt{r_{3М}^2 + 3r_{3М}r_0 + (\sqrt{3}r_0)^2}}{r_{3М}r_0 + R_h(r_{3М} + r_0)}. \quad (2.18)$$

Выражение (2.18) можно упростить с учетом очевидного неравенства:

$$3r_{3М}r_0 < 2\sqrt{3}r_{3М}r_0.$$

Заменяя в числителе подкоренного выражения (2.18) слагаемое левой части неравенства правой частью, получим окончательно несколько большую величину:

$$U_h \leq U_\Phi R_h \frac{r_{3М} + r_0\sqrt{3}}{r_{3М}r_0 + R_h(r_{3М} + r_0)}. \quad (2.19)$$

Таким образом, напряжение до прикосновения равно линейному напряжению сети, а напряжение прикосновения определяется выражением (2.19).

Ток через тело человека в этом случае можно определить из соотношения

$$I_h \leq U_\Phi \frac{r_{3М} + r_0\sqrt{3}}{r_{3М}r_0 + R_h(r_{3М} + r_0)}. \quad (2.20)$$

Анализ выражения (2.19) показывает, что при замыкании на землю с малым электрическим сопротивлением в месте замыкания, когда $r_{3М}$ можно считать равным нулю, оно примет вид $U_h = \sqrt{3}U_\Phi$.

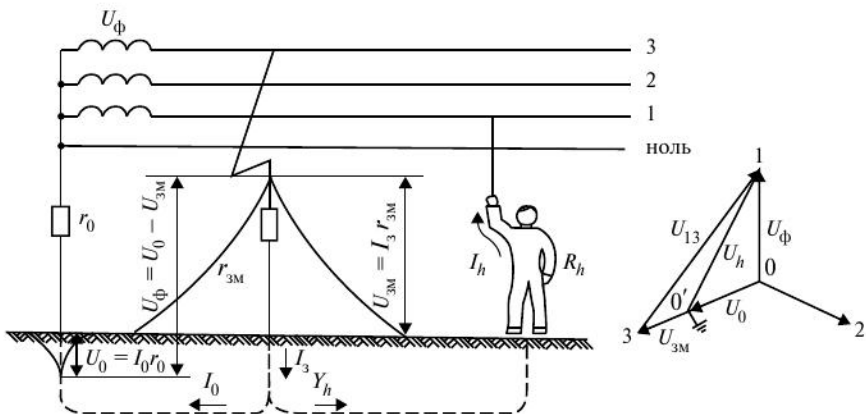


Рис. 2.7. Схема прикосновения человека к фазному проводу трехфазной четырехпроводной сети с заземленной нейтралью при аварийном режиме

Если выполнить заземление нейтрали трансформатора r_0 с малым сопротивлением растеканию таким, что его приближенно по сравнению с другими слагаемыми можно принять равным нулю, выражение (2.19) примет вид $U_h = U_\phi$, т.е. в этом случае напряжение прикосновения будет меньшим или равным фазному напряжению ЭУ.

В практических условиях r_{3M} и r_0 больше нуля, поэтому напряжение при прикосновении к исправному фазному проводу трехфазной сети с глухозаземленной нейтралью в случае аварийного режима замыкания одной из фаз на землю *меньше линейного, но больше фазного значения напряжения ЭУ*:

$$U_\phi \sqrt{3} \geq U_h \geq U_\phi. \quad (2.21)$$

Это обстоятельство иллюстрируется векторной диаграммой, приведенной на рис. 2.7 и соответствующей рассмотренному случаю.

Таким образом, прикосновение человека к исправной фазе трехфазной электрической сети с глухозаземленной нейтралью в период аварийного режима более опасно, чем при нормальном режиме.

2.8. Опасность прикосновения в электрических сетях с изолированной нейтралью

В трехфазной трехпроводной сети с изолированной нейтралью при *нормальном режиме* работы напряжение прикосновения $U_{пр}$ и

ток цепи через тело человека I_h определяются уравнениями (2.13) и (2.14), в которых в случае касания к фазе 1 нужно принять $y_n = y_0 = 0$.

Для данного случая ток в комплексной форме можно получить из следующего соотношения:

$$I_h = U_\phi y_h \frac{y_2(1-a^2) + y_3(1+a)}{y_1 + y_2 + y_3 + y_h}. \quad (2.22)$$

Анализ полученного соотношения интересен для следующих примеров.

Пример 1. Симметричная трехфазная ЭУ (рис. 2.8) с равными между собой сопротивлениями изоляции и емкостями фаз относительно земли

$$y_1 = y_2 = y_3 = y.$$

Для указанных условий выражение (2.22) в комплексной форме примет вид

$$I_h = \frac{U_\phi}{\frac{1}{y_h} + \frac{1}{3y}} \quad \text{или} \quad I_h = \frac{U_\phi}{R_h + \frac{Z}{3}}, \quad (2.23)$$

где Z — полное сопротивление одной фазы относительно земли в комплексной форме, т.е.

$$Z = 1/y = 1/(1/r + j\omega C).$$

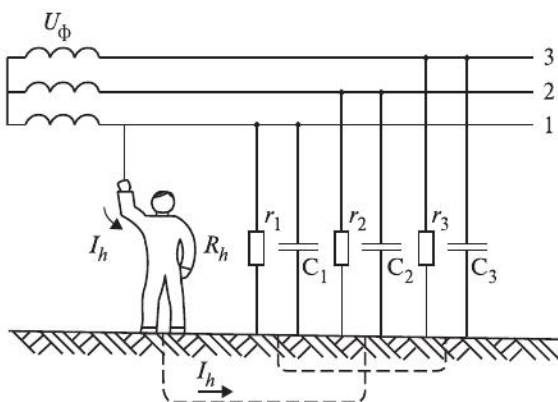


Рис. 2.8. Схема прикосновения человека к трехфазной трехпроводной сети с изолированной нейтралью

В действительной форме выражение (2.23) будет иметь вид

$$I_h = \frac{U_\Phi}{R_h} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r(r+6R_h)}{9R_h^2(1+r^2\omega^2C^2)}}}. \quad (2.24)$$

Анализ выражений (2.23) и (2.24) показывает, что ток в цепи через тело человека в этом случае ограничивается суммарным электрическим сопротивлением изоляции фазных проводов сети относительно земли (при допущении о равенстве сопротивлений изоляции фаз между собой определяется величиной $Z/3$).

Пример 2. В коротких неразветвленных электрических сетях без большой погрешности для определения тока в электрической цепи через тело человека из-за малой емкости между проводами и землей можно принять

$$y_1 = y_2 = y_3 = y, \quad \omega C_1 = \omega C_2 = \omega C_3 = \omega C \ll y \text{ или } C_1 = C_2 = C_3 = 0.$$

В этом случае ток, протекающий по электрической цепи через тело человека, можно получить в действительной форме из соотношения (2.24):

$$I_h = \frac{U_\Phi}{R_h + r/3}, \quad (2.25)$$

где r — активное сопротивление изоляции фаз электрической сети с изолированной нейтралью относительно земли, Ом.

Пример 3. В разветвленных кабельных электрических сетях при большой емкости проводов относительно земли или малом емкостном сопротивлении по сравнению с активным сопротивлением изоляции, можно принять

$$1/\omega C_1 = 1/\omega C_2 = 1/\omega C_3 = 1/\omega C \ll r, \quad r_1 = r_2 = r_3 = r \rightarrow \infty.$$

В этом случае ток в электрической цепи через тело человека можно выразить соотношением

$$I_h = \frac{U_\Phi}{R_h} \sqrt{\frac{9\omega^2 C^2}{y_h^2 + 9\omega^2 C^2}}. \quad (2.26)$$

Анализ формулы показывает, что при большой емкости фаз электрической сети относительно земли второе слагаемое знаменателя становится несоизмеримо больше первого слагаемого:

$9\omega^2 C^2 \gg y_h^2$, тогда слагаемым в знаменателе подкоренного выражения y_h^2 можно пренебречь:

$$I_h = U_\Phi / R_h, \quad U_h = U_\Phi,$$

т.е. с достаточной степенью точности можно утверждать, что в разветвленных сетях с изолированной нейтралью с большой емкостью фаз относительно земли напряжение прикосновения равно фазному напряжению и напряжение доприкосновения равно напряжению прикосновения.

Выражения (2.24) и (2.26) показывают, что в сетях с изолированной нейтралью опасность для человека, прикоснувшегося к одной из фаз при нормальной работе электрической сети, зависит от уровня сопротивления изоляции ЭУ и величины электрической емкости относительно земли (протяженности разветвленных сетей). С увеличением сопротивления изоляции опасность уменьшается, с увеличением емкости (протяженности сетей) опасность увеличивается.

При аварийном режиме замыкания одной из фаз на землю (рис. 2.9) в сети с изолированной нейтралью через малое активное сопротивление r_{3M} в выражении (2.22) проводимости двух «здоровых» фаз относительно земли $y_1 \ll y_3$, $y_2 \ll y_3$, $y_1 \ll y_h$, $y_2 \ll y_h$, поэтому значениями y_1 и y_2 в выражении (2.22) можно пренебречь, т.е. $y_1 = 0$, $y_2 = 0$.

Приняв указанные допущения в уравнении (2.22), получим в комплексной форме

$$I_h = U_\Phi y_h \frac{y_3(1-a)}{y_3 + y_h}.$$

Полученное соотношение в действительной форме с учетом того, что $y_3 = 1/r_{3M}$, $y_h = 1/R_h$ будет иметь вид

$$I_h = \frac{\sqrt{3}U_\Phi}{R_h + r_{3M}}. \quad (2.27)$$

Напряжение прикосновения в этом случае можно получить из соотношения

$$U_h = I_h r_h = \sqrt{3}U_\Phi \frac{R_h}{R_h + r_{3M}}. \quad (2.28)$$

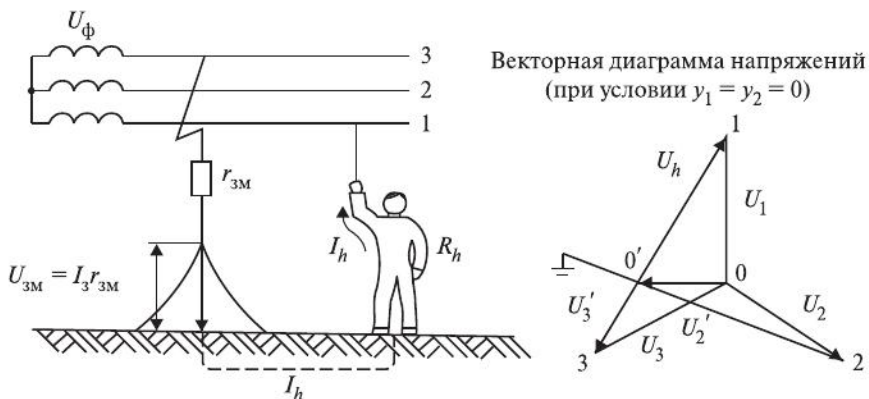


Рис. 2.9. Схема прикосновения человека к фазе трехфазной сети с изолированной нейтралью при аварийном режиме

В режимах короткого замыкания можно допустить, что $r_{3M} \ll R_h$, тогда значением r_{3M} в знаменателе выражения (2.28) можно пренебречь и напряжение прикосновения в этом случае будет практически равно линейному напряжению ЭУ: $U_h = \sqrt{3}U_\phi$.

Таким образом, прикосновение человека к исправной фазе ЭУ сети с изолированной нейтралью в период аварийного режима замыкания другой фазы на землю вызывает протекание по электрической цепи через тело человека тока значительно большего, чем во всех рассмотренных случаях. Этот ток определяет напряжение прикосновения, которое значительно больше фазного напряжения и несколько ниже линейного напряжения сети. Случайное прикосновение к токоведущим частям в режиме аварийной работы сети (такая работа сетей с изолированной нейтралью допускается достаточно длительное время) значительно более опасно, чем в режиме нормальной работы сети.

2.9. Электричество живых клеток, механизм электрической травмы

Еще в середине прошлого века была высказана мысль, что поверхность живой клетки имеет общие свойства с электродом в гальванической ячейке. Это оставалось гипотезой до середины 20-х годов прошлого столетия, когда стало ясно, что клетки окружены тонкой мембраной весьма сложной структуры. Отдельные час-

ти мембраны обладают полупроводниковыми или ионоселективными свойствами, т.е. пропускают ионы одного знака или одного элемента (например, либо калия либо натрия). На такой избирательности основано появление мембранного потенциала, от которого зависит работа информационных и энергопреобразующих систем организма.

Нервная клетка, нейрон, представляет собой звездообразное тело и состоит из тонких отростков — дендритов и аксона — длинного отростка. Конец аксона переходит в тонкие волокна, которые оканчиваются в мышцах или синапсах — местах соединения с другой клеткой. Клетка отделена от окружающей ее среды мембраной, играющей особую роль в образовании и передаче нервного импульса.

Внутри клетки концентрация ионов калия намного больше, чем вне клетки, а концентрация ионов натрия — меньше. Благодаря этому на стенке клетки возникает двойной электрический слой. Так как мембрана в состоянии покоя хорошо проницаема для ионов калия и менее проницаема для ионов натрия, между внутренней частью клетки и внешней средой возникает разность потенциалов, составляющая 60—100 милливольт, причем внутренняя часть клетки заряжена отрицательно по отношению к околочлеточной жидкости.

При раздражении клетки двойной электрический слой частично разряжается и, когда потенциал покоя снижается до 15—20 милливольт, пропускная способность мембраны по отношению к ионам натрия резко возрастает и они устремляются внутрь клетки. Как только положительная разность потенциалов между внутренней и внешней поверхностями мембраны достигнута, поток ионов натрия иссякает. В тот же миг открываются каналы для ионов калия и потенциал сдвигается в отрицательную сторону. Это, в свою очередь, уменьшает проводимость ионов натрия, и потенциал в конце достигает значения потенциала покоя. Мембранный потенциал обеспечивает как передачу нервных импульсов, с помощью которых мозг командует работой органов и тканей, так и преобразование химической энергии в механическую.

Возникающий в клетке электрический сигнал распространяется по нервным клеткам за счет проводимости находящегося в них электролита. Если нервные клетки имеют особую изоляцию — миелиновую оболочку, то электрический импульс проходит эти участки значительно быстрее и общая скорость определяется величиной

и количеством изолированных участков нервных клеток. Таким образом, скорость распространения электрических нервных импульсов, управляющих всеми органами человеческого тела, определяется не только электронной и ионной проводимостью тканей человеческого организма, но и процессами перезарядки клеточной мембраны и наличием или отсутствием изолированных оболочек нервных тканей.

Возбуждение и сокращение мышц связано с переносом ионов натрия и калия через мембрану, окружающую мышечные волокна. Природа потенциала действия здесь та же, что и в нервных клетках, только основную роль играют ионы кальция. После возбуждения электрическим импульсом концентрация кальция внутри мышечной ткани резко увеличивается, это вызывает резкое сокращение отдельных мышечных волокон — миофибрилл, состоящих из параллельно расположенных тонких нитей — белка актина и толстых нитей — белка миозина. По окончании сокращения и возбуждения электрическим импульсом кальций выводится обратно. Движение белковых нитей по отношению друг к другу лежит в основе сокращения мышц. Энергия для сокращения мышц создается за счет гидролиза универсального горючего биологических систем — аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ), которая, в свою очередь, синтезируется благодаря присутствию на внутренних поверхностях мембраны ферментов, осуществляющих реакцию окисления питательных веществ, поступающих в мышечные ткани через кровь и кровеносные сосуды.

Таким образом, тело человека представляет собой некую электроэнергетическую систему, в которой имеется управляющая система в виде центральной нервной системы, вырабатывающей с помощью головного мозга управляющие электрические импульсы (биотоки мозга), которые распространяются по нервным тканям и управляют работой органов человеческого тела и любыми двигательными реакциями с помощью мышечной системы.

С точки зрения величин, характеризующих внутреннее электромагнитное поле человека или внутреннюю «электрическую цепь», состоящую из нервных тканей, следует иметь в виду, что внутренний потенциал в клетках не превышает 100 мВ, а биотоки 30 мкА.

Структура внутренних электромагнитных явлений в организме животного и человека определяет закономерности воздействия на

организм внешнего электромагнитного поля при непосредственном облучении или через посредство включения человека в электрическую цепь при случайном прикосновении к частям электроустановок, находящихся под напряжением. Здесь и далее под *случайным прикосновением* к ЭУ мы будем понимать любые возможные случаи возникновения электрической цепи через тело человека: при неосторожном прикосновении к неизолированным токоведущим частям; при пользовании приемниками электрической энергии и электроустановками, в которых произошло повреждение изоляции и замыкание на корпус или на заземляющее устройство и т.п.

При случайном прикосновении уровень воздействия ЭМП на человека и исход электрической травмы зависят от следующих основных факторов:

- величины напряжения прикосновения и тока через тело человека;
- рода тока (постоянный или переменный) и частоты переменного тока;
- продолжительности протекания тока по телу человека (в практике нормирования напряжений прикосновения и токов рассматриваются случаи только кратковременного прикосновения до 10 с);
- пути протекания тока по телу человека (при нормировании напряжений прикосновения и токов принимаются только характерные или чаще всего возникающие случаи протекания тока по путям: ладонь—ладонь, ладонь—ступни, ладони—ступни, ступня—ступня);
- условий внешней среды (высокая влажность, наличие токопроводящей пыли, высокая температура воздуха и др.).

Величина напряжения прикосновения и ток через тело человека зависят от условий прикосновения, типа ЭУ, величины изоляции и других факторов, что подробно рассмотрено выше.

С точки зрения *физиологического действия* на организм человека следует различать два уровня напряжений и токов, при которых происходят существенно различающиеся явления, сопровождающие протекание тока через тело человека при случайных прикосновениях, а именно:

- низкий уровень — кратковременное *раздражающее и болевое действие*, характеризующееся напряжениями прикосновения до 600 В и токами менее 500 мА, протекающими по нервным и мышечным тканям организма;

— высокий уровень — *разрушающее* тонкую структуру тканей *действие* (тепловое и электролитическое разрушение), вызывающее электрический пробой живой ткани с образованием узкого канала, по которому протекает весь ток, характеризующееся напряжениями выше 600—1000 В и токами более 0,5 А.

Наличие *двух уровней физиологического действия* напряжений прикосновения и токов по существу явилось причиной разделения в прошлом веке ЭУ в отношении мер безопасности на ЭУ до и выше 1000 В (см. правила техники безопасности при эксплуатации электротехнических установок промышленных предприятий, изд. 1954 г.).

Разный уровень физиологического действия и специфика последствий электрической травмы при этих уровнях послужили причиной существовавшего длительное время необъяснимого «феномена электрической травмы», когда удельное число смертельных исходов при получении электрических травм напряжением выше 1000 В оказывалось меньшим по сравнению с удельным числом смертельных исходов при получении электрических травм при напряжениях до 1000 В. При этом, как правило, при прикосновениях в ЭУ выше 1000 В смертельный исход не наступал даже при наличии тяжелых ожоговых травм, тогда как в ЭУ ниже 1000 В часто наступал смертельный исход при отсутствии каких-либо ожогов или электрических знаков.

Действие на организм человека переменного тока промышленной частоты *низкого уровня* наблюдается: в ЭУ до 1000 В — при случайных прикосновениях, в ЭУ выше 1000 В — при возникновении на заземленных конструкциях при повреждении изоляции напряжений прикосновения, а на территории ЭУ — шаговых напряжений.

Действие на организм человека переменного тока промышленной частоты *высокого уровня* наблюдается при случайных прикосновениях в ЭУ выше 1000 В. В этих случаях электрическая травма сопровождается тяжелыми ожогами и тепловыми повреждениями тканей конечностей, приводящими, как правило, к их ампутации. Отсутствие летального исхода наблюдаются только в том случае, если тепловые и электролитические явления при протекании электрического тока не нанесли органам тела повреждения, несовместимые с жизнедеятельностью организма.

В зависимости от патологических процессов, возникающих при поражениях электрическим током, как указывалось ранее, принята классификация электрических травм по степени их тяжести на 4 степени опасности от малой до максимальной (вплоть до летального исхода).

Действие электрического тока на организм человека связано с возникновением **ожогов** в месте прикосновения и особенно при возникновении электрической дуги.

При действии на организм электрического тока *высокого уровня* значительные ожоги возникают на поверхности кожи и внутри тела вдоль канала протекания тока по организму человека.

При действии на организм электрического тока *низкого уровня* часто (до 25 % всех случаев) возникают ожоги различной степени в месте прикосновения. По многолетним статистическим данным электрические ожоги вообще не наблюдаются при напряжениях прикосновения 65 В, в 55 % случаев при напряжении 127 В, в 41,5 % случаев при напряжении 220 В и в 29,5 % случаев при напряжении 380 В.

Специфическими видами электрических травм являются электрические знаки (метки) и металлизация кожи.

Электрические знаки возникают обычно при хорошем контакте в месте прикосновения и по внешнему виду представляют собой точечные изменения цвета поверхности кожи серого или бело-желтого цвета поперечным размером до 5 мм с резко очерченными краями. Как правило, они безболезненны и не вызывают последующих воспалительных процессов.

Металлизация кожи представляет собой проникновение в структуру кожи паров металла со специфической окраской места прикосновения: зеленой — при контакте с красной медью, сине-зеленой — при контакте с латунью, серо-желтой при контакте со свинцом. В большинстве случаев металлизированная кожа с течением времени сходит, не оставляя следов.

При кратковременном **воздействии переменного тока** промышленной частоты при случайном прикосновении в ЭУ ниже 1000 В опасность для человеческого организма заключается в специфическом раздражающем эффекте действия тока, заключающемся в обратимом нарушении функций мышц, включая нервно-мышечный аппарат сердца и грудной клетки, участвующий в работе сердца и дыхания.

Нарушение дыхания может продолжаться в течение всего времени, пока организм находится под действием электрического тока. После отключения тока дыхание может восстановиться, если его расстройство было непродолжительным.

Глубокое нарушение дыхания наступает при токах, вызванных напряжением 220 В и выше, в этом случае остановка дыхания из-за нарушения протекания к мышцам биотоков нервной системы может наблюдаться и после прекращения действия тока прикосновения. Длительное отсутствие дыхания в этом случае может привести к летальному исходу, если не оказать пострадавшему своевременную помощь.

Наиболее опасное последствие для жизнедеятельности организма может иметь реакция сердечно-сосудистой системы на действие тока прикосновения промышленной частоты, так как деятельность сердца легко нарушается под влиянием внешнего электрического воздействия, но в отличие от нарушения дыхания эта деятельность не восстанавливается самостоятельно после прекращения протекания тока прикосновения.

Действие внешнего электрического тока на нервно-мышечный аппарат сердечно-сосудистой системы зависит не только от продолжительности воздействия тока, но и от момента воздействия тока по отношению к периоду полного цикла сердечной деятельности (кардиоцикла).

На рис. 2.10 показана электрокардиограмма человека. Полная длительность периода кардиоцикла составляет около 1 с и характеризуется частотой пульса и характерными фазами, обозначаемыми

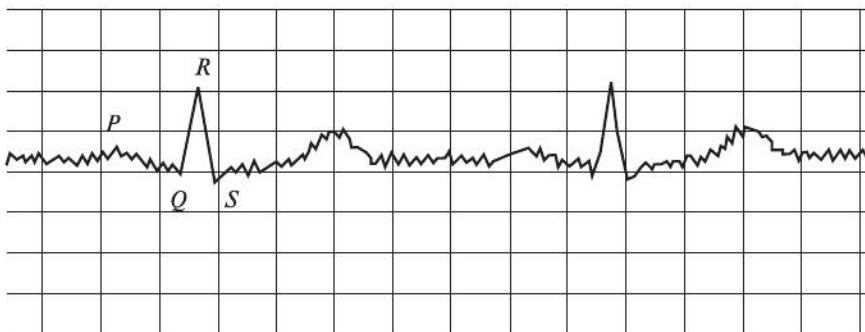


Рис. 2.10. Электрокардиограмма человека

буквами латинского алфавита *P, Q, R, S, T*. Действие тока в различные фазы цикла различно, наиболее опасным оно является в момент начала возбуждения сердечной мышцы *T*.

Воздействие постоянного тока на организм человека в отличие от переменного тока характеризуется еще и болевыми ощущениями в суставах организма. По мнению некоторых исследователей исход электрической травмы при постоянном токе может происходить при токе прикосновения в несколько десятков миллиампер от болевого шока, который представляет собой реакцию нервной системы человека на боль, что, в свою очередь, может привести к остановке сердца и дыхания.

2.10. Пороговые значения токов, протекающих по телу человека и характеризующих степень их воздействия на организм

Воздействие переменного электрического тока промышленной частоты низкого уровня, вызывающего специфическое раздражающее действие на организм человека, по реакциям организма при протекании тока может характеризоваться рядом *пороговых уровней*:

– *порог ощущения* — величина тока, при которой 99,9 % людей ощущают протекание тока ладонями рук (около 1 мА);

– *порог отпускания* — величина тока, при которой у 100 % людей не возникает эффект «приковывания жертвы» к месту прикосновения, т.е. любой, даже самый слабый человек, может самостоятельно оторваться от места прикосновения при протекании по конечностям и телу тока данной величины (около 6 мА);

– *порог неотпускания* — величина тока, при которой 100 % людей не могут самостоятельно оторваться от места прикосновения при протекании по конечностям и телу тока данной величины (около 22 мА);

– *порог фибрилляции сердца и остановки дыхания* — величина тока, при которой может возникнуть фибрилляция сердца и остановка дыхания, существенно зависит от продолжительности протекания тока; при длительном протекании тока может быть равна неотпускающему току.

Протекание по телу человека токов промышленной частоты величиной выше ощущаемых (более 1 мА), вызванных напряжениями прикосновения в несколько вольт или десятков вольт, созда-

ет условия для поглощения этими токами меньших по уровню более чем в 30 раз (максимальные биотоки в организме человека до 0,03 мА) управляющих биотоков мозга. Этим объясняется эффект «приковывания жертвы», когда головной мозг человека посылает биоэлектрический сигнал на отпусkanie конечности от места прикосновения, а осязательные и двигательные рецепторы не воспринимают сигнала из-за высокого уровня «помехи» в виде тока промышленной частоты, поглощающего биотоки нервных тканей.

Аналогичный механизм имеет электрическая травма, вызывающая фибрилляцию сердца или остановку дыхания.

Фибрилляция сердца — процесс некоординированных сокращений сердечных мышечных волокон из-за отсутствия или недостаточной величины биопотенциалов (биотоков) кардиоцикла, ведущий к остановке сердечной деятельности. Кардиоцикл представляет собой процесс координированных, циклически повторяющихся фаз возбуждения и расслабления сердечных мышц под действием биотоков нервной системы.

Как было сказано выше, при протекании тока промышленной частоты по телу человека, включая часть нервной системы, участвующей в биоэлектрическом управлении работой сердечной мышцы, малые величины биотоков поглощаются высоким уровнем воздействующих на организм токов прикосновения. Сердечная мышца перестает получать координированные биотоки, возникает процесс фибрилляции, т.е. отдельные мышечные волокна (фибриллы — сокращаемые волокна мышц), находясь в возбужденном состоянии, кратковременно некоординированно и хаотично сокращаются (процесс фибрилляции), после чего сердце останавливается.

Для восстановления работы практически здорового сердца необходимо осуществить процесс дефибрилляции — в виде механического или электрического возбуждающего воздействия на сердечную мышцу.

Таким образом, величина тока, проходящего через тело человека, имеет решающее значение в исходе электротравмы. Эта величина тока определяется сопротивлением электрической цепи через тело человека и приложенным напряжением. Электрическое сопротивление тела человека с точки зрения электротехники является специфическим — нелинейным и зависящим от частоты переменного тока, а также от индивидуальных особенностей человека: веса, роста, состояния кожного покрова ладоней рук и ступней ног.

Внутренние ткани организма имеют различное удельное электрическое сопротивление (табл. 2.7).

Таблица 2.7

Удельное объемное электрическое сопротивление тканей человеческого организма

№	Наименование тканей	Удельное электрическое сопротивление, Ом · м
1	Кожа сухая	$3 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5$
2	Костная ткань (без надкостницы)	$10^4 - 2 \cdot 10^5$
3	Жировая ткань	300—600
4	Мышечная ткань	15,0—30,0
5	Кровь	10,0—20,0
6	Спинномозговая жидкость	5,0—6,0

Анализ данных табл. 2.7 показывает, что кожа, входящая в непосредственное соприкосновение, как правило, с металлическим контактом (электродом) электрической цепи, обладает наивысшим удельным электрическим сопротивлением и может определять электрическое сопротивление всей цепи через тело человека, однако это оказывается справедливым только для малых значений напряжения электрической цепи (до 50 В).

Сравнительно большую величину электрического сопротивления кожи составляет электрическое сопротивление ее достаточно тонкого (до 0,1 мм) наружного рогового слоя (эпидермиса), а внутренний слой обладает электрическим удельным сопротивлением близким по значению жировой и мышечной ткани (до 200 Ом·м).

Наружный слой кожи, располагающийся между электродом электрической цепи и сравнительно хорошо проводящей внутренней областью кожи (рис. 2.11), для анализа электрической цепи через тело человека можно представить в виде электрической схемы замещения, состоящей из несовершенного конденсатора C_H , включенного параллельно с активным сопротивлением R_H . Как показывают экспериментальные исследования, величина удельной емкости контакта колеблется в пределах $0,0047 - 0,0152$ мкФ/м² в зависимости от изменения толщины эпидермиса и его относительной диэлектрической проницаемости.

Электрическую схему замещения всего тела человека можно представить в виде последовательной электрической схемы (рис. 2.12). В соответствии с этой схемой можно рассматривать характерные пути протекания тока: ладонь—ладонь, ступня—ступня, ладони—ступни,

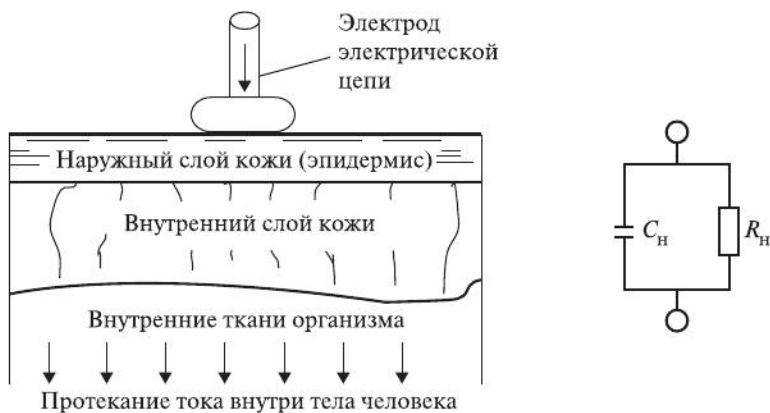


Рис. 2.11. Структура контакта электрода электрической цепи и кожи человека и электрическая схема замещения этого контакта в виде несовершенной емкости

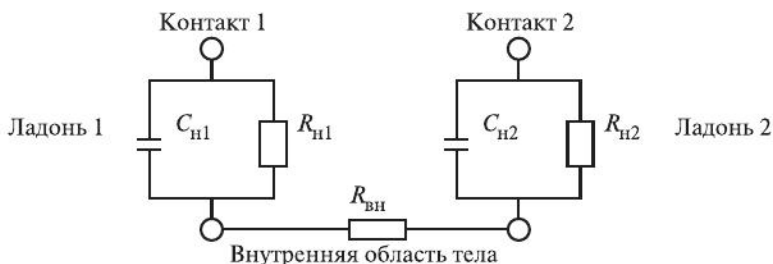


Рис. 2.12. Электрическая схема замещения тела человека

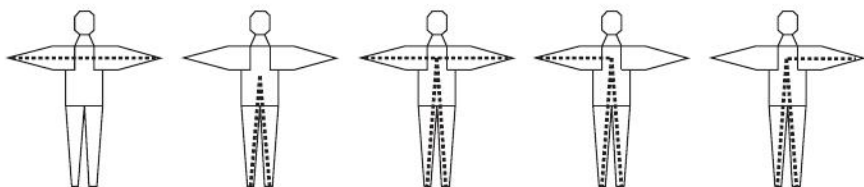


Рис. 2.13. Характерные пути протекания тока по организму человека

ладонь—ступни (рис. 2.13) с учетом электрической схемы замещения каждого контакта и внутреннего электрического сопротивления живых тканей организма $R_{вн}$ при напряжениях и токах, существенно превышающих внутренние биотоки и биопотенциалы организма.

Тело человека в электрической цепи может рассматриваться как простой физический проводник только при определенных допуще-

ниях, потому что при протекании тока в теле человека происходят сложные биофизические процессы.

Как было показано в п. 2.9, процесс протекания тока в живых тканях значительно сложнее процесса протекания тока в металлах, изоляции, электролитах и полупроводниках.

Большое значение имеет *путь протекания тока*. Схема замещения отражает только характерные пути протекания тока. Названия этих путей протекания, например ладонь—ладонь, ступня—ступня, являются более точными по сравнению с часто применяемыми в технической литературе названиями рука—рука, нога—нога. Дело в том, что при рассмотрении электрической схемы замещения тела человека не рассматриваются любые пути протекания тока, кроме названных точек мест прикосновения.

Как показано в трудах Манойлова В.Е., воздействие, например, электрического тока на акупунктурные точки человеческого тела, слизистые оболочки, область головы может вызвать летальный исход при очень малых значениях тока. Электрическая схема замещения в этом случае будет иметь особенности с точки зрения учета малой проводимости нервных клеток или специфики внутреннего сопротивления электрической цепи. Такие сложные электрические воздействия на организм человека могут быть предметом специального исследования и в данной работе не рассматриваются.

При указанных допущениях активное сопротивление контакта человека и электрической установки и емкость наружного слоя кожи может быть определена из соотношений

$$R_{\text{н}} = \frac{\rho d}{S}, \text{ Ом}; C_{\text{н}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \text{ Ф}, \quad (2.29)$$

где d — толщина наружного слоя кожи, м; ρ — удельное электрическое сопротивление наружного слоя кожи, Ом·м; S — поверхность контакта электрической установки и тела человека, м²; ε — относительная диэлектрическая проницаемость наружного слоя кожи; ε_0 — электрическая постоянная, $\varepsilon_0 = 1/36\pi \cdot 10^{-9}$ Ф/м.

Пример 1. Примем средние значения удельного электрического сопротивления кожи $\rho = 1,15 \cdot 10^5$ Ом·м; диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 6,9$; толщины наружного слоя кожи $0,1 \cdot 10^{-3}$ м. Площадь контакта $12 \cdot 10^{-3}$ м² (ориентировочное значение площади ладони) и $0,8 \cdot 10^{-3}$ м² (ориентировочная площадь провода, зажатого в ладони).

На основании соотношений (2.29) получим: $R_{H1} = 958 \text{ Ом}$, $R_{H2} = 14\,385 \text{ Ом}$; $C_{H1} = 7335 \text{ пФ}$, $C_{H2} = 488 \text{ пФ}$.

Активное сопротивление R_H и емкость C_H составляют полное сопротивление наружного слоя кожи Z_H . Внутреннее сопротивление тела человека R_B в основном зависит от пути протекания тока (см. рис. 2.13) и может колебаться в пределах 300—800 Ом. Экспериментальными исследованиями, проведенными на основе выборки, состоящей из 87 человек (Вайлов А.М., МИИТ), получены средние значения внутренних сопротивлений в зависимости от пути протекания тока по телу человека (табл. 2.8).

Таблица 2.8

Средние значения внутреннего электрического сопротивления тела человека

Путь тока по телу человека	$R_{вн}$, Ом
Ладонь—ладонь (рука—рука)	660
Ладонь—ступни (рука—ноги)	510
Ладони—ступни (руки—ноги)	330
Ступня—ступня (нога—нога)	520

Полное электрическое сопротивление тела человека по характерным путям протекания, принимая допущение о равенстве площадей и условий возникновения контактов тела человека и электрической цепи, например, по пути ладонь—ладонь или ступня—ступня, может быть выражено соотношением

$$Z = 2Z_H + R_{вн},$$

где Z — полная комплексная величина электрического сопротивления тела человека, Ом; Z_H — комплексное значение величины электрического сопротивления наружного слоя кожи человека в месте контакта, Ом; $R_{вн}$ — внутреннее электрическое сопротивление тела человека, Ом.

Зависимость модуля полного электрического сопротивления тела человека от частоты ω , емкости контакта C_H , значений наружного R_H и внутреннего R_B сопротивлений можно выразить соотношением

$$Z = \sqrt{\left(R_B + \frac{2R_H}{1 + \omega^2 R_H^2 C_H^2} \right)^2 + \left(\frac{2\omega R_H^2 C_H}{1 + \omega^2 R_H^2 C_H^2} \right)^2}. \quad (2.30)$$

Анализ формулы (2.30) показывает, что с возрастанием частоты $\omega = 2\pi f$ модуль сопротивления Z уменьшается, а в пределе при

$\omega \rightarrow \infty$ модуль полного сопротивления становится равным внутреннему сопротивлению $Z \rightarrow R_B$.

Это обстоятельство используется при проведении лабораторного опыта по определению внутреннего электрического сопротивления тела человека, используя малое напряжение (до 3 В), но высокую частоту, с помощью лабораторного звукового генератора частоты. Полное электрическое сопротивление тела человека при малых напряжениях прикосновения практически становится равным внутреннему сопротивлению при частоте 10—20 кГц.

На рис. 2.14 показаны зависимости средних значений полного электрического сопротивления тела человека (эта величина существенно различается у каждого человека) по пути рука—рука в зависимости от частоты и площади контактов, полученные впервые профессором А.П. Киселевым (МИИТ). Верхняя зависимость соответствует площади контакта при сжимании в руках проводов диаметром 10 мм, а нижняя (400 см^2) площади рук, опущенных в электролит по локоть.

Полное электрическое сопротивление тела человека в значительной мере зависит от величины приложенного напряжения, так как наружное сопротивление кожи носит несовершенный характер, т.е. при повышении приложенного напряжения величина наружного сопротивления снижается, а при напряжении выше 100 В практически полностью пробивается. При такой величине приложенного напряжения полное электрическое сопротивление тела человека становится равным только внутреннему сопротивлению (рис. 2.15). Эта кривая представляет собой интерполяцию, полученную в том числе на реальных данных протекания тока по телу человека при электрической травме, которые удалось зафиксировать приборами.

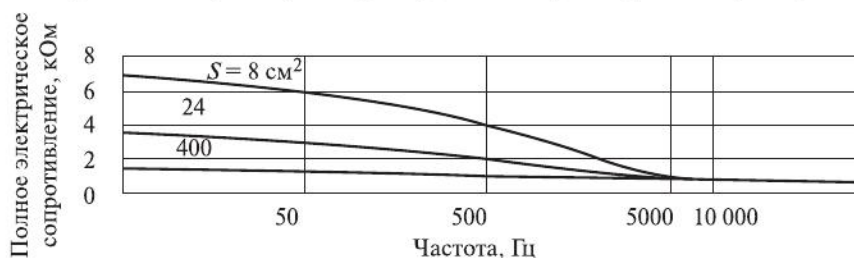


Рис. 2.14. Зависимость средних значений полного сопротивления тела человека от частоты тока и площади контактов

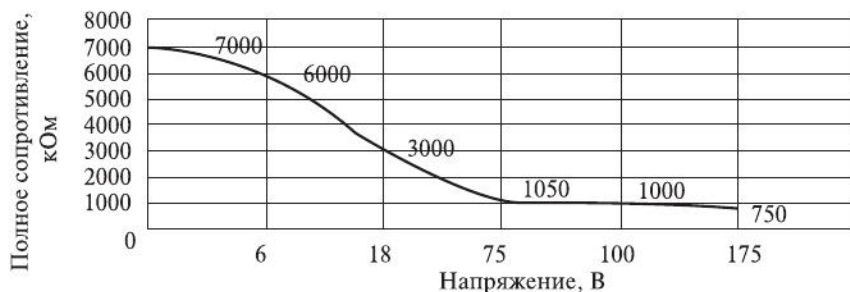


Рис. 2.15. Зависимость средних значений полного электрического сопротивления тела человека от величины приложенного напряжения

Таким образом, степень воздействия электрического тока промышленной частоты на организм человека зависит от величины этого тока. Величина тока, в свою очередь, зависит от величины полного электрического сопротивления электрической цепи через тело человека, а величина этого сопротивления зависит от ряда факторов: пути протекания, величины напряжения, площади контактов.

При изменении частоты переменного тока величина полного электрического сопротивления тела человека снижается.

При кратковременном протекании **постоянного электрического тока** по телу человека величина тока также определяется величиной электрического сопротивления тела человека постоянному току, которое зависит от пути протекания, величины приложенного напряжения и площади контактов.

Как уже указывалось, действие постоянного тока связано с болевым воздействием на суставы тела человека, а исход воздействия определяется болевым шоком.

При кратковременном протекании тока через тело человека безопасность будет обеспечена, если величина тока не достигнет минимальной величины, при которой возможны остановка дыхания, фибрилляция сердца, рефлекторный шок.

2.11. Стандарты и нормы по ограничению опасного воздействия ЭМП на человека

Напряжения и токи прикосновения представляют собой основные опасные факторы ЭМП.

На протяжении всего XX в. вместе с развитием электроэнергетики ученые вели плодотворное изучение влияния ЭМП на че-

ловека и животных. Это привело к выделению в медицине специальной отрасли знаний — электромедицины, а в биофизике — электробиофизики. Лечение с помощью электричества привлекло большую часть физиологов в область электрофизиологии, которая занималась, как правило, малыми уровнями воздействий ЭМП на человека, что привело к ограниченному кругу исследователей и ученых физиологов, занимающихся проблемами вредных и особенно опасных уровней воздействий ЭМП на человека. Этим можно объяснить, что только к середине и концу века появились серьезные исследования, позволившие установить основные безопасные уровни параметров ЭМП, а исследования многих безопасных параметров ЭМП еще ждут своих исследователей.

Безопасные значения токов, не вызывающие фибрилляцию сердца, были установлены в Руководящих указаниях Американского общества инженеров электриков по защитным заземлениям переменного тока благодаря работам лаборатории Дальзиела (Dalziel C.F.), его коллег и учеников в 50-х гг. XX в.:

$$I_{\text{нф}} \leq \frac{165}{\sqrt{t}}, \text{ мА,}$$

где t — продолжительность протекания тока по организму человека, с.

Величина безопасного значения тока была установлена в лаборатории Дальзиела на основе обширного материала, в который входили не только собственные испытания на подопытных животных (обезьяны), но также материалы о воздействии предельных величин токов на человека по результатам казни на электрическом стуле в США и трофейные материалы нацистской Германии об измерениях предельных величин токов на плененных людях во время войны 1939—1945 гг.

В России и других странах для испытаний по определению тока, не вызывающего фибрилляцию сердца, использовались различные подопытные животные. Одним из первых биологических исследований в этой области было установлено, что тяжелые реакции на воздействие электрического тока наблюдаются у животных (собак) при следующих соотношениях продолжительности действия и величины тока: 300 мА в течение 0,15 с, 100 мА в течение 0,25 с, 50 мА в течение 1 с и более.

Смертельные поражения не встречались, если продолжительность воздействия тока была меньше 0,1 с.

Исследования, проведенные различными авторами в разных странах на животных при кратковременных воздействиях тока (60 Гц) от 1/120 до 5 с (Ferris L.P., Kouwenhoven W.V. и др.), показали, что ток, вызывающий фибрилляцию сердца, в значительной мере зависит от продолжительности воздействия на организм животных.

Критическая величина переменного тока (60 Гц), которая приводит к фибрилляции сердца в опытах на овцах, в зависимости от продолжительности воздействия тока по данным К. Бергера приведена на рис. 2.16.

На рис. 2.16 темными точками показаны действующие значения переменного тока, вызывающего фибрилляцию сердца в опытах на овцах. Прямая *A* соответствует вероятности 99,5 % появления случаев фибрилляции сердца, прямая *B* — 50 %, прямая *C* — 0,5 % для животных и людей весом 70 кг, прямая *D* — 0,5 % для животных.

Достаточно кропотливая работа ученых и различных организаций в области определения безопасных (допустимых) токов через тело человека, начатая в конце 60-х гг. в СССР, позволила создать

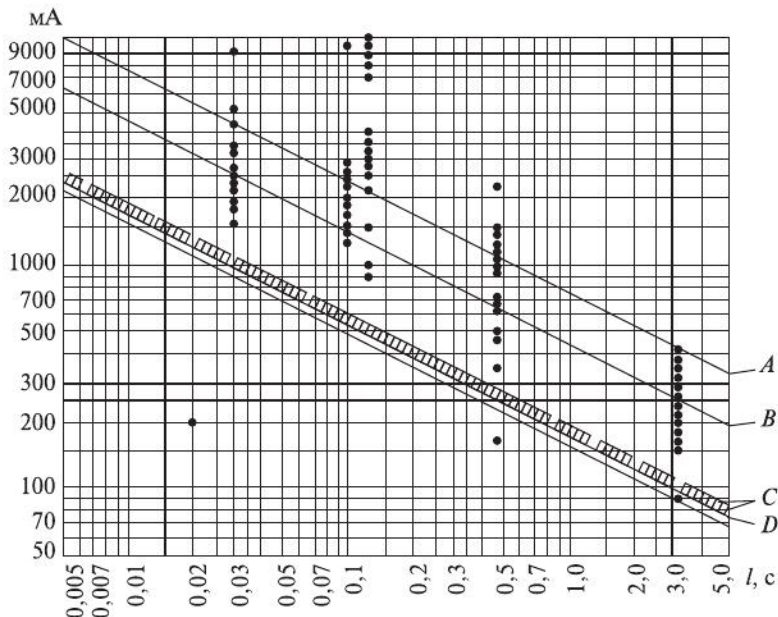


Рис. 2.16. Зависимость токов, вызывающих фибрилляцию сердца, от продолжительности воздействия в опытах на животных

первый нормативный документ системы стандартов безопасности труда в этой области ГОСТ 12.1.038-82 (2001) «ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов».

Нормирование предельно допустимых уровней напряжений прикосновения и токов предназначено для проектирования способов и средств защиты людей при взаимодействии с электроустановками производственного и бытового назначения постоянного и переменного тока частотой 50 и 400 Гц и осуществляется отдельно для каждого из следующих условий:

- нормальный (неаварийный) режим работы любой электроустановки;

- аварийный режим производственных электроустановок напряжением до 1000 В с глухозаземленной или изолированной нейтралью и выше 1000 В с изолированной нейтралью;

- аварийный режим производственных электроустановок выше 1000 В переменного тока 50 Гц с эффективно заземленной нейтралью;

- аварийный режим бытовых электроустановок напряжением до 1000 В переменного тока 50 Гц.

Аварийный режим электроустановки — работа неисправной электроустановки, при которой могут возникнуть опасные ситуации, вызывающие электрические травмы людей, взаимодействующих с ней.

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

Предельно допустимые уровни напряжений и токов прикосновения установлены для путей протекания тока через тело человека: ладонь—ладонь (рука—рука) и ладонь—ступни (рука—ноги).

Для *нормального (неаварийного) режима* работы нормы установлены исходя из реакции ощущения (порога ощущаемого тока) и соответствуют продолжительности воздействия тока на организм человека не более 10 мин в сутки.

Предельные уровни напряжений и токов прикосновения для нормального (неаварийного) режима (табл. 2.9) должны умень-

шаться в 3 раза для лиц, выполняющих работу в условиях высоких температур (выше 35 °С) и влажности (относительная влажность более 75 %).

Таблица 2.9

Наибольшие допустимые напряжения прикосновения $U_{пр}$ и токи I_h , проходящие через человека при нормальном (неаварийном) режиме работы электроустановки (не более 10 мин)

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

Примечания: 1. Напряжения прикосновения и токи приведены при продолжительности воздействий не более 10 мин в сутки и установлены исходя из реакции ощущения.

2. Напряжения прикосновения и токи для лиц, выполняющих работу в условиях высоких температур (выше 25 °С) и влажности (относительная влажность более 75 %), должны быть уменьшены в три раза.

Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов при *аварийных режимах* производственных электроустановок установлены для электроустановок напряжением до 1000 В с глухозаземленной или изолированной нейтралью и выше 1000 В с изолированной нейтралью продолжительностью не более 10 с (табл. 2.10, 2.11).

Таблица 2.10

Наибольшие допустимые напряжения прикосновения $U_{пр}$ и токи I_h , проходящие через человека

Род тока	Нормируемая величина	Предельно допустимые значения, не более, при продолжительности воздействия тока t , с											
		0,01—0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Свыше 1,0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Переменный 50 Гц	U , В	550	340	160	135	120	105	95	85	75	70	60	20
	I , мА	650	400	190	160	140	125	105	90	75	65	50	6
Переменный 400 Гц	U , В	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	36
	I , мА	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	8
Постоянный	U , В	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	40
	I , мА	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	15

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Выпрямленный двухполупериодный	$U_{ампл}, В$	650	500	400	300	270	230	220	210	200	190	180	—
	$I_{ампл}, МА$	650	500	400	300	270	230	220	210	200	190	180	—
Выпрямленный однополупериодный	$U_{ампл}, В$	650	500	400	300	250	200	190	180	170	160	150	—
	$I_{ампл}, МА$	650	500	400	300	250	200	190	180	170	160	150	—

Примечание. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека при продолжительности воздействия более 1 с, приведенные в табл. 2.9, соответствуют отпускающим (переменным) и неболевым (постоянным) токам. При продолжительностях более 1 с (до 10 с) предельно допустимые токи соответствуют порогу отпускающего переменного тока и неболевого постоянного тока. Для переменных токов во всех случаях указываются действующие значения, а для выпрямленных — амплитудные.

Таблица 2.11

Наибольшие допустимые напряжения прикосновения при аварийном режиме производственных электроустановок переменного тока 50 Гц напряжением выше 1000 В с эффективно заземленной нейтралью

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

Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов в аварийных режимах в бытовых электроустановках установлены значительно ниже подобных предельных уровней для промышленных электроустановок. Это объясняется тем, что в этом случае электроприемниками электроустановок могут пользоваться дети. В указанных нормируемых величинах (табл. 2.12) значения напряжений и токов прикосновения установлены для детей с массой тела 15 кг.

Таблица 2.12

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

Нормируемая величина	Продолжительность воздействия t , с											
	0,01—0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Более 1,0
$U_{пр}, В$	220	200	100	70	55	50	40	35	30	27	25	12
$I_h, А$	220	200	100	70	55	50	40	35	30	27	25	2

Совпадение значений напряжения прикосновения в вольтах и токов в миллиамперах по абсолютной величине для значений напряжений $U_{\text{пр}} \geq 50$ В объясняется принятым расчетным значением сопротивления тела человека для этого случая $R_h = 1000$ Ом, при этом $U_{\text{пр}} = 1000I_h$.

2.12. Расчет уровней ЭМП и основные технические средства защиты от их вредного и опасного воздействия

Для *защиты от вредного воздействия* ЭМП на человека применяют различные методы:

- *ограничение продолжительности* пребывания людей в зоне распространения ЭМП, уровни которого превышают безвредные;
- выбор *безопасного расстояния* от источника ЭМП;
- выбор *оптимальных* геометрических *параметров* конструкций ВЛ и ОРУ с минимизацией уровня ЭМП;
- применение заземленных *экранирующих тросов и устройств*;
- применение *специальной экранирующей одежды*.

В соответствии с рассмотренными нормами ПДУ ЭМП в диапазоне частот 60 кГц — 300 МГц определяется с учетом продолжительности пребывания в зоне вредного воздействия на основе расчета или измерения так называемой *энергетической экспозиции ЭЭ*, которая определяется для электрической и магнитной составляющих ЭМП из следующих соотношений:

$$\mathcal{E}\mathcal{E}_e = E^2 t \text{ и } \mathcal{E}\mathcal{E}_H = H^2 t,$$

где t — продолжительность воздействия ЭМП на человека.

При наличии периодов воздействия с различными величинами электрического и магнитного полей энергетическая экспозиция может быть найдена из соотношений

$$\mathcal{E}\mathcal{E}_e = \sum_i E_i^2 t_i \text{ и } \mathcal{E}\mathcal{E}_H = \sum_i H_i^2 t_i. \quad (2.31)$$

Одновременное воздействие электрического и магнитного полей в диапазоне частот 0,06—3 МГц считается допустимым при условии

$$\frac{\mathcal{E}\mathcal{E}_e}{\mathcal{E}\mathcal{E}_{e\text{ПДУ}}} + \frac{\mathcal{E}\mathcal{E}_H}{\mathcal{E}\mathcal{E}_{H\text{ПДУ}}} \leq 1, \quad (2.32)$$

где $\mathcal{E}\mathcal{E}_e$, $\mathcal{E}\mathcal{E}_{e\text{ПДУ}}$ — энергетическая экспозиция от электрической составляющей ЭМП, воздействующая на человека, и ее предельно допустимый уровень соответственно; $\mathcal{E}\mathcal{E}_H$, $\mathcal{E}\mathcal{E}_{H\text{ПДУ}}$ — энергетическая экспозиция от магнитной составляющей ЭМП, воздействующая на человека, и ее предельно допустимый уровень.

Ограничение *продолжительности* пребывания людей в зоне распространения вредных уровней ЭМП может осуществляться с помощью расчета приведенного допустимого времени.

При нахождении персонала в течение рабочего дня в зонах с различными напряженностями ЭМП определяют приведенное время пребывания в зоне действия ЭМП, которое должно отвечать условию $T_{\text{пр}} \leq 8$ ч, из соотношения

$$T_{\text{пр}} = 8(t \cdot E_1 / T \cdot E_I + t \cdot E_2 / T \cdot E_2 + \dots + t \cdot E_n / T \cdot E_n), \quad (2.33)$$

где t и T соответственно фактическое и допустимое время пребывания в зонах с напряженностью электрического поля $E_1, E_2 \dots E_n$.

В качестве расчетных принимаются зоны с напряженностью электрического поля не менее 1 кВ.

Для оценки допустимой продолжительности пребывания в электростатическом поле (в том числе в ЭУ постоянного тока) без защитных мер в зависимости от величины фактической напряженности электрического поля $E_{\text{факт}}$ следует пользоваться соотношением

$$t_{\text{доп}} = \left(\frac{E_{\text{пред}}}{E_{\text{факт}}} \right)^2,$$

где $t_{\text{доп}}$ — допустимая продолжительность пребывания персонала в электростатическом поле, ч; $E_{\text{пред}}$ — предельное значение напряженности поля при продолжительности воздействия 1 ч (60 кВ/м).

Оценка эквивалентных параметров (вредности) ЭМП при наличии нескольких составляющих ЭМП по частоте переменного тока осуществляется из соотношений:

$$\sum_i \frac{E_i^2}{E_{fi}^2} \leq 1 \text{ и } \sum_j \frac{H_j^2}{H_{fj}^2} \leq 1. \quad (2.34)$$

Оценку вредности комплексного воздействия электрического и магнитного поля можно осуществлять по обобщенному критерию:

$$\sum_i \frac{E_i}{E_{fi}} + \sum_j \frac{H_j}{H_{fj}} \leq 1 \quad (2.35)$$

$$\text{или } \sum_i \frac{D_{si}}{D_{sfi}} + \sum_j \frac{D_{ej}}{D_{efj}} \leq 1, \quad \sum_i \frac{D_{si}}{D_{sfi}} + \sum_j \frac{D_{hj}}{D_{h fj}} \leq 1,$$

где $E_i, H_j, D_{si}, D_{ej}, D_{hj}$ — значения параметров ЭМП: напряженностей электрического и магнитного полей, экспозиционной энергетической дозы и доз

квадратов напряженностей электрического и магнитного полей; f — индекс частоты переменного тока при значениях параметров, соответствующих ПДУ этих параметров.

При получении в неравенствах (2.31), (2.32) в левой части значений больше единицы необходимо *увеличить расстояние* до источника ЭМП или применять другие методы защиты.

Для действующих ЛЭП и ОРУ напряженности поля в различных зонах можно получать измерением или расчетом. В стандартах уточняется, что при выполнении работ без подъема на конструкции или оборудование, измерения напряженности электрического поля должны производиться при отсутствии защитных средств на высоте 1,8 м от поверхности земли, при наличии коллективных средств защиты — на высоте 0,5; 1,0 и 1,8 м от поверхности земли. При выполнении работ с подъемом на конструкции или оборудование измерения напряженности электрического поля (независимо от наличия средств защиты) должны производиться на высоте 0,5; 1,0 и 1,8 м от площадки рабочего места и на расстоянии 0,5 м от заземленных токоведущих частей электрооборудования.

При проектировании ВЛ на стадии разработки необходимо так выбирать *геометрические параметры* конструкций (высоту подвеса, расстояние между фазами и т.п.), чтобы обеспечить оптимальные значения ЭМП вблизи линии. Расчет характеристик электрических и магнитных полей ЛЭП и контактных сетей будет рассмотрен ниже.

Исследования показали, что наиболее предпочтительным вариантом конструкции трехфазной ВЛ с точки зрения обеспечения защиты от электрического поля является треугольное расположение проводов. У ВЛ такого исполнения значительно сокращается зона с высокими уровнями напряженности электрического поля. Это обусловлено суммарной компенсацией полей от всех трех фаз трехфазной системы по продольной оси ВЛ.

Основным техническим средством защиты работников от воздействия ЭМП является *экранирование* заземленными устройствами.

Одним из практических способов уменьшения действия ЭМП на персонал, обслуживающий ОРУ, является снижение напряженности поля с помощью заземленных тросов, которые подвешиваются в рабочей зоне под токоведущими проводами. Анализ различных вариантов подвески заземленных тросов показывает, что на-

иболее существенное влияние напряженности ЭМП в рабочей зоне оказывают высота подвески тросов и расстояние между ними. В частности, применением заземленных тросов, подвешенных на высоте 2,5 м над землей под фазными проводами соединительных шин ОРУ-750 кВ, удается уменьшить потенциал в рабочей зоне на высоте 1,8 м с 30 до 13 кВ.

Экранирующие устройства могут представлять собой козырьки, навесы, перегородки, изготовленные из металлической сетки с ячейками не более 50×50 мм, укрепляемые на стальной раме и надежно соединенные с защитным заземляющим устройством.

Экранирующие устройства подразделяются на стационарные и временные. Стационарные предназначены для защиты персонала при эксплуатационных работах — осмотрах оборудования, оперативных переключениях, ревизиях выключателей, проверках и настройке релейной защиты, проверке и испытаниях изоляции и т.п. Временные экранирующие устройства применяют для защиты от воздействия электрического поля на персонал, выполняющий в течение определенного промежутка времени эксплуатационные, ремонтные и монтажные работы на участках действующей ЭУ, не защищенных стационарными экранами.

Установка стационарных и временных экранов (ограждений) должна осуществляться с соблюдением допустимых изоляционных расстояний до токоведущих частей.

Представляет практический интерес выполнение временного экрана в виде экранирующего зонта, выполненного из металлизированной ткани, снабженного телескопической рукояткой, шарниром и заземляющим проводником (предложение А.Ф.Кайданова, 1979 г.), который может устанавливаться как на поверхности земли, так и на высоте с созданием оптимальной защитной зоны от электрической составляющей ЭМП (рис. 2.17).

В помещениях (пульт управления, ремонтные помещения, аккумуляторные и пр.), имеющих заземленную металлическую кровлю или выполненных из железобетона, вредный уровень напряженности электрического поля отсутствует, поэтому в таких помещениях применение средств защиты от воздействия электрического поля не требуется. По этим же соображениям металлические помещения, в том числе металлический подвижной состав железнодорожного транспорта, полностью защищают находящихся в таких по-

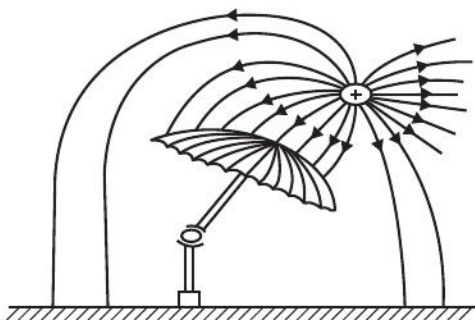


Рис. 2.17. Временное экранирующее устройство в виде экранирующего зонта

мешениях людей от электрической составляющей внешнего ЭМП. Во всех случаях металлические конструкции подлежат заземлению.

Средством индивидуальной защиты от вредного воздействия электрической составляющей ЭМП является *специальная экранирующая одежда* — костюм из проводящей металлизированной ткани.

Экранирующий костюм состоит из куртки и брюк (или комбинезона), сшитый из ткани, представляющей собой обычное волокно с проводящей, чаще всего медной, гибкой нитью, образующей сетку. Все части защитного костюма надежно соединены между собой. В комплект входят экранирующий головной убор и специальная обувь.

Головной убор — металлическая или пластмассовая металлизированная каска в теплое время года или шапка ушанка с прокладкой из металлизированной ткани — в холодное время года.

Специальная обувь — кожаные ботинки с подошвой из электропроводной резины, применяются также ботинки, сапоги и галоши, целиком изготовленные из такой резины, обеспечивающие хороший контакт с основанием.

Все части экранирующего костюма должны иметь между собой электрическую связь, костюм имеет специальный зажим для присоединения к заземляющему устройству. Костюм одевается на белье, чтобы тело было изолировано от него.

Для обеспечения электробезопасности и *защиты от опасного воздействия* ЭМП при случайных прикосновениях к токоведущим частям должны применяться отдельно или в сочетании друг с другом следующие технические способы и средства защиты: защитное заземление; зануление; выравнивание потенциалов; малое

напряжение; электрическое разделение сетей; защитное отключение; изоляция токоведущих частей (рабочая, дополнительная, усиленная, двойная); компенсация токов замыкания на землю; оградительные устройства; предупредительная сигнализация, блокировка, знаки безопасности; средства защиты и предохранительные приспособления.

В последние годы в нормативных документах (ПУЭ) осуществляется разделение видов прикосновения и средств защиты от них на:

- прямое прикосновение — электрический контакт людей или животных с токоведущими частями, находящимися под напряжением;

- косвенное прикосновение — электрический контакт людей или животных с открытыми проводящими частями, оказавшимися под напряжением при повреждении изоляции.

Вопросы устройства, расчета и проектирования технических средств защиты в электроустановках железнодорожного транспорта подробно рассматриваются в последующих главах книги.

Глава 3. ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ И ЗАКОНОДАТЕЛЬНЫЕ МЕРЫ ЗАЩИТЫ ОТ ОПАСНОГО И ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭМП

3.1. Понятие и оценка риска при эксплуатации электроустановок

Все электроустановки отличаются повышенной опасностью. Это обстоятельство определяет высокий риск получения в процессе их работы специфической электрической травмы или заболевания, вызванного вредным длительным воздействием электромагнитного поля.

Встречается различное толкование понятия «риск», иногда в это понятие вкладывают довольно сильно отличающийся друг от друга смысл. Общим во всех представлениях о риске является то, что это понятие должно включать в себя:

- оценку неувверенности произойдет или нет нежелательное событие;
- возможный ущерб от неблагоприятного события или состояния.

С понятием риска (рис. 3.1) связывают представление о возможных или грозящих событиях с катастрофическими последствиями, поэтому иногда существует ошибочная точка зрения, что такое катастрофическое событие можно и нужно избежать любой ценой. Такое представление о нежелательных событиях часто явно формулируется, например, в правилах и инструкциях по технике безопасности.

Как нельзя создать вечный двигатель, так нельзя создать и технику, свободную от риска выхода из строя. Полностью свободной от риска выхода из строя техники, несмотря на самые большие затраты на ее разработку, не существует. Риск выхода из строя (отказа) технических устройств является одной из характеристик надежности технических устройств. Создание образцов высоконадежной техники является одной из задач технологического про-

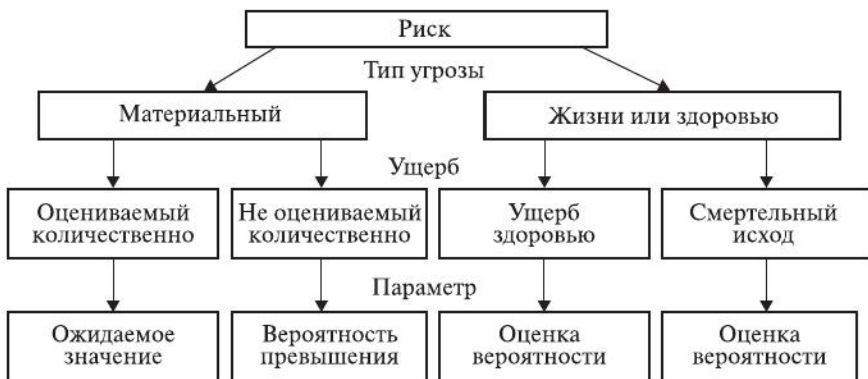


Рис. 3.1. Риск при оценке технических решений

гресса. Многие образцы технологической продукции в последнее время обладают высокой степенью надежности, это относится и к электроустановкам.

Безопасность эксплуатации ЭУ определяется не только надежностью электрооборудования, но иногда в большей степени правильной деятельностью человека (персонала). Так же как в технике нельзя исключать риск ошибки человека. В первой главе рассматривалась система «человек—машина—окружающая среда» или «человек—электроустановка», в которой подразумевается под термином «человек» оператор или другой представитель персонала, участвующий в технологическом процессе, а под термином «машина», «электроустановка» — технологический процесс, в частности процесс обслуживания ЭУ.

Актуальным является сравнение надежности машин и аппаратов, входящих в технологический процесс, с «надежностью человека», участвующего в качестве составляющей части технологического процесса. Часто причиной негативных явлений в технологическом процессе оказывается так называемый «человеческий фактор». Необходимо отметить, что такое сравнение надежности оказывается не в пользу человека. Оказывается, что человек с точки зрения надежности является самым слабым звеном системы «человек—машина».

В качестве характеристики надежности человека применяют вероятность его ошибочных действий, которая издавна привлекала внимание многих специалистов в области инженерной психоло-

гии. На основе экспериментальных психофизиологических исследований работников выявлена величина вероятности их ошибочных действий, которая в среднем составляет около $p_o = 1 \cdot 10^{-4}$, в одном из исследований этого показателя в электроэнергетике было получено значение $p_o = 1,57 \cdot 10^{-4}$.

Для сравнения можно привести пример вероятности ошибочного действия современного процессора, которая составляет $p_{оп} \leq 1 \cdot 10^{-22}$, т.е. вероятность ошибочных действий процессора меньше на 18 порядков (10^{-18}) ошибочных действий работника.

Очевидно, что в технологических процессах, где от персонала требуется быстрота и правильная последовательность действий, большое запоминание информации, многочисленность функций, безопасные действия и т.п., наиболее эффективным является внедрение и применение компьютерно-процессорной техники с использованием ее возможностей и освобождением персонала от части сложных функций.

Менее продуктивным в этом смысле являются распространенные в последнее время методы профессионального отбора на профессию, потому что за счет этого эффективность деятельности персонала может увеличиться в лучшем случае на десятки процентов, а внедрение процессоров может дать многократный эффект.

Для выбора оборудования, сравнения различных образцов техники по *опасности их эксплуатации* существует необходимость количественной оценки понятия риска.

Риск это мера определенного, чаще всего негативного, случайного события. Например, в категории безопасности это риск получения травмы, возникновения заболевания, гибели человека, возникновения пожара и т.п.; в экономике — риск дефолта, падения цены акций, падение курса валют, других событий, связанных с потерей материальных ценностей.

При этом нужно иметь в виду, что величина риска является вероятностной категорией и подчиняется законам теории вероятности.

Существует ряд законодательно закрепленных в России определений термина «риск».

Риск — вероятность причинения вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью

животных и растений с учетом тяжести этого вреда. (Федеральный закон «О техническом регулировании» от 27.12.2002 г. № 184-ФЗ).

Пожарный риск — мера возможности реализации пожарной опасности объекта защиты и ее последствий для людей и материальных ценностей.

Индивидуальный пожарный риск — пожарный риск, который может привести к гибели человека в результате воздействия опасных факторов пожара.

Социальный пожарный риск — степень опасности, ведущей к гибели группы людей в результате воздействия опасных факторов пожара.

Допустимый пожарный риск — пожарный риск, уровень которого допустим и обоснован исходя из социально-экономических условий (Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 2008 г. № 123-ФЗ).

Оценка риска аварии — процесс, используемый для определения вероятности (или частоты) и степени тяжести последствий реализации опасностей аварий для здоровья человека, имущества и/или окружающей природной среды. Оценка риска включает анализ вероятности (или частоты), анализ последствий и их сочетания.

Риск аварии — мера опасности, характеризующая возможность возникновения аварии на опасном производственном объекте и тяжесть ее последствий. Основными количественными показателями риска аварии являются:

— *технический риск* — вероятность отказа технических устройств с последствиями определенного уровня (класса) за определенный период функционирования опасного производственного объекта;

— *индивидуальный риск* — частота поражения отдельного человека в результате воздействия исследуемых факторов опасности аварий;

— *потенциальный территориальный риск* (или *потенциальный риск*) — частота реализации поражающих факторов аварии в рассматриваемой точке территории;

— *коллективный риск* — ожидаемое количество пораженных в результате возможных аварий за определенный период времени;

— *социальный риск*, или F/N кривая — зависимость частоты возникновения событий, в которых пострадало на определенном уровне

не менее F человек, от числа N человек, подверженных опасности. Характеризует тяжесть последствий (катастрофичность) реализации опасностей;

– *ожидаемый ущерб* — математическое ожидание величины ущерба от возможной аварии, за определенный период времени (Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 г. № 116-ФЗ в ред. от 04.03.2013 г. с изменениями, вступившими в силу 15.03.2013 г.).

В условиях нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения пределы доз облучения в течение года устанавливаются исходя из следующих значений *индивидуального пожизненного риска* (единица измерения 1/год):

- для персонала — $1 \cdot 10^{-3}$;
- для населения — $5 \cdot 10^{-5}$.

Уровень пренебрежимо малого риска составляет 10^{-6} (СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009»).

Величина риска $R_{\text{и}}$ определяется как произведение величины события на меру возможности его наступления

$$R_{\text{и}} = Aq, \quad (3.1)$$

где A — максимально возможные последствия нежелательного события (экономические, социальные потери, травмы и гибель людей, потери этических ценностей); q — вероятность наступления нежелательного события.

Если речь идет о риске, в качестве последствия события, при котором может произойти жертва хотя бы одного индивидуума, то выражение для риска примет вид

$$R_{\text{и}} = 1 \cdot q, \text{ или } R_{\text{и}} = q, \quad (3.2)$$

т.е. риск будет численно равен вероятности наступления нежелательного события. В российской практике оценки рисков эту вероятность называют индивидуальным риском.

Как правило, статистическая вероятность события оценивается за период, равный одному году, поэтому размерность индивидуального риска в этом случае составляет 1/год. Риск оценивается количественным показателем ущерба в год, например, риск гибели железнодорожников в ОАО «РЖД» составил в 2012 г. 50 (50 чел/год), вероятность гибели или индивидуальный риск при оценке численности работников A ОАО «РЖД», составлявшая около 1 млн человек, $R_{\text{и}} = 55 \cdot 10^{-6}$ 1/год.

Для оценки вероятностной категории, которой является риск, необходимо иметь хотя бы самые *общие представления о теории вероятностей*, на основе которой осуществляется расчет риска.

Определить понятие — это значит свести его к другим более известным.

Событие — всякий факт, который в результате опыта может произойти или не произойти. Например:

A — появление герба при бросании монеты;

B — появление трех гербов при трехкратном бросании монеты;

C — травмирование работника в результате многократного обращения к опасному узлу;

D — появление туза при вынимании карты из колоды;

E — загрязнение водного объема промышленным раствором до предельно допустимого выброса;

F — наступление несчастного случая в организации в течение года работы.

Каждое событие обладает разной степенью возможности наступления. Сравнив события по степени возможности наступления, можно связать их с определенным числом, которое тем больше, чем более возможно событие. Это число и называют вероятностью события.

Понятие вероятности события в своей основе связано с опытным, практическим понятием частоты события.

Единицей измерения возможности наступления события принята вероятность достоверного события, т.е. такого события, которое в результате опыта непременно должно произойти. Приняв вероятность достоверного события за единицу, возможные, но недостоверные вероятности события будут меньше единицы, составляющими долю от единицы. Противоположностью по отношению к достоверному событию будет невозможное событие.

Единица измерения вероятностей — вероятность достоверного события, а диапазон изменения вероятностей любых событий — числа от 0 до 1.

При симметричности исходов опытов для расчета вероятностей можно применить непосредственный подсчет вероятностей.

Для опытов, в которых возможные исходы симметричны и одинаково возможны, применяют непосредственный подсчет вероятностей. На опытах, обладающих симметрией возможных ис-

ходов, легче всего познакомиться с основными свойствами вероятностей.

Вспомогательные понятия:

– *полная группа* событий (герб и решка при бросании монеты; попадание и промах в цель и др.);

– *несовместные* события (если они не могут появиться вместе, например, герб или решка и др.);

– *равновозможные* события (герб и решка; появление любой карты из колоды при однократном вынимании и др.).

Благоприятное случайное событие называется таким, которое влечет за собой появление данного события.

Если при выпадении игральной кости возможны появления 1, 2, 3, 4, 5, 6 очков, то при рассмотрении события — выпадения четного числа — благоприятным будет выпадение любого четного числа очков из трех (2, 4, 6), а неблагоприятными остальные три случая.

Вероятность события A при непосредственном подсчете можно оценить по относительной доле благоприятных случаев

$$P(A) = \frac{m}{n}, \quad (3.3)$$

где $P(A)$ — вероятность события A ; n — общее число случаев; m — число случаев, благоприятных событию A .

Так как число благоприятных случаев всегда заключено между $m = 0$ (невозможное событие) и $m = n$ (достоверное событие), то вероятность события является рациональной правильной дробью

$$0 \leq P(A) \leq 1.$$

Формулу (3.3) называют классической формулой определения вероятности события.

Однако, не всякий опыт может быть сведен к схеме случаев, существует обширный класс событий, вероятности которых нельзя вычислить по «классической формуле». В техносферной безопасности многие события нельзя свести к схеме случаев (травмирование работников за год, дневной выброс вредных веществ в течение года и т.п.). Способы определения вероятностей при этом основываются на опыте, экспериментах, в которых выясняется частота события и специфика связи между частотой и вероятностью.

Если при проведении n опытов, в каждом из которых могло появиться или не появиться событие A , то *частотой события A* называется отношение числа опытов, в которых появилось событие A , к общему числу произведенных опытов.

Частота события (статистическая вероятность) в отличие от «математической вероятности» на основании опыта определяется

$$P^*(A) = \frac{m}{n},$$

где m число появлений события A ; n — общее число произведенных опытов.

Величина X_n *сходится по вероятности* к величине a , если при сколь угодно малом ε вероятность неравенства $|X_n - a| < \varepsilon$ с увеличением n неограниченно приближается к единице. Это обстоятельство можно пояснить иначе: статистическая вероятность приближается к теоретической при увеличении числа опытов вплоть до бесконечности.

Это свойство частоты и вероятности составляет содержание *теоремы Бернулли*.

Теория вероятности располагает способами определения вероятности события косвенно (не непосредственно в результате опыта) через вероятности других событий, с ними связанных.

Случайной величиной называется величина, которая в результате опыта может принять то или иное значение, причем неизвестно заранее, какое именно. Случайные величины, принимающие только отделенные друг от друга значения, которые заранее можно перечислить, называются *дискретными случайными величинами*. Случайные величины, возможные значения которых непрерывно заполняют некоторый промежуток значений, называются *непрерывными случайными величинами*.

Практически невозможным событием называется событие, вероятность которого не в точности равна нулю, но весьма близка к нему.

Практически достоверным событием называется событие, вероятность которого не в точности равна единице, но весьма близка к ней.

Принципом практической уверенности руководствуются, если вероятность некоторого события A в данном опыте E весьма мала. Можно быть практически уверенным в том, что при однократном выполнении опыта E событие A не произойдет.

К основным теоремам теории вероятностей относятся теорема сложения вероятностей и теорема умножения вероятностей.

Вспомогательными понятиями теории являются понятия о *сумме событий* и *произведении событий*.

Суммой двух событий A и B называется событие C , состоящее в выполнении события A или события B , или обоих вместе. Если события *несовместны*, то суммой двух событий будет выполнение события A или события B , т.е. событие A не может сопровождать событие B или происходить с ним одновременно.

Произведением двух событий A и B называется событие C , состоящее в совместном выполнении события A и события B . В этом случае события A и событие B называют *совместными*.

Произведением нескольких событий называется событие, состоящее в совместном появлении всех этих событий.

Вероятность суммы *двух несовместных* событий равна *сумме* вероятностей этих событий:

$$P(A + B) = P(A) + P(B).$$

Следствие 1: если события A_1, A_2, \dots, A_n образуют полную группу несовместных событий, то сумма их вероятностей равна единице.

Следствие 2: сумма вероятностей противоположных событий равна единице:

$$P(A) + P(\hat{A}) = 1,$$

где \hat{A} — событие, противоположное A .

Событие A называется *независимым* от события B , если вероятность события A не зависит от того, произошло событие B или нет.

Вероятность произведения двух *независимых* событий равна *произведению* вероятностей одного из них на условную вероятность другого, вычисленную при условии, что первое произошло:

$$P(AB) = P(A) \cdot P(B/A).$$

Следствие 1 — если событие A не зависит от события B , то и событие B не зависит от события A .

Следствие 2 — вероятность произведения двух *независимых* событий равна произведению вероятностей этих событий.

Следствие 2 распространяется и на произвольную группу событий, т.е. *вероятность произведения независимых событий равна произведению вероятностей этих событий*.

В практике рассмотрения статистической вероятности и вероятностей при оценке риска эксплуатации электроустановок могут встречаться несовместные, совместные, равновозможные, независимые события, поэтому определение вероятности сложных собы-

тий необходимо считать с учетом основных закономерностей теории вероятностей.

Технологические системы и сложные технические сооружения имеют, как правило, несколько или много составных частей (n). Если выход из строя только всех составных частей приводит к выходу из строя всей системы или сооружения, то в этом случае риск при эксплуатации всей системы может быть оценен через вероятности выхода из строя отдельных i ее элементов, т.е. вероятностей отдельных *несовместных* событий на основе их суммы

$$R_{\text{сист}} = A \sum_{i=1}^n q_i. \quad (3.4)$$

Если выход из строя всей системы определяется выходом из строя любой из составных частей системы, т.е. вероятностей *независимых* событий, риск эксплуатации всей системы будет определяться *произведением* вероятностей выхода из строя этих составных частей:

$$R_{\text{сист}} = A \prod_{i=1}^n q_i.$$

Описание характера риска требует определенного порядка и стадий исследования проблемы риска (рис. 3.2). Разобраться и правильно оценить риск можно только с помощью системного анализа. Вспомогательное средство для такого анализа — дерево отказов технического средства, которое будет рассмотрено ниже.

Последовательность анализа технических решений с учетом риска состоит из последовательных шагов: анализ событий (имеющейся информации о причинных связях, результатах статистических исследований, экономических расчетов и т.п.); оценка риска на основе имеющихся данных, построения математической модели процесса и расчета гипотетических вариантов задачи; решение задачи на основе минимального риска, минимизации или оптимизации риска.

При системном анализе и оценке риска прежде всего исключают все нерациональные варианты решения, при которых и материальные затраты (ущерб) и вероятность опасности (отказа) — наивысшие R_n (рис. 3.3). В отдельных случаях после этого первого шага может остаться единственное оптимальное решение.

В общем случае необходимо из оставшихся рациональных вариантов R_p выбрать один лучший.

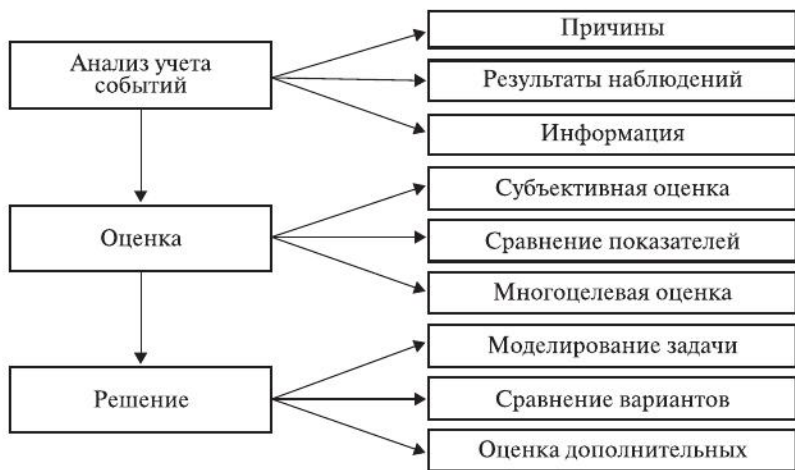


Рис. 3.2. Порядок и стадии выбора технического решения с риском

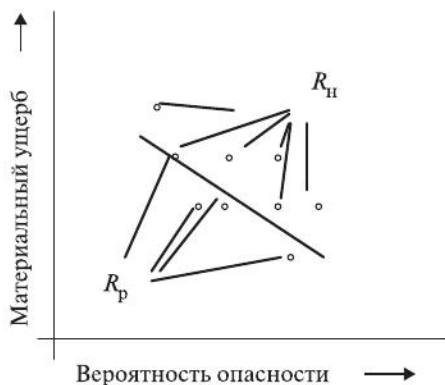


Рис. 3.3. Анализ возможных рисков

Процедуры принятия решений с риском идут по общим правилам теории принятия решений, однако выбранные варианты дополнительно делят следующие на группы:

- уменьшения риска;
- минимизации риска;
- оптимизации риска.

Любые решения, принятие которых связано с риском, всегда остаются для инженера сомнительными, поэтому приходится идти на необходимый, но оправданный риск. Для этого нужно знать уровень оценок риска принимаемых решений.

Уровни оценок риска могут быть найдены на основе *апостериорных исследований* (на основе опыта, экспериментов, анализа статистических данных травматизма и т.п.) или могут задаваться исследователем на основе определенных допущений, нормативов, т.е. *априорных* (до опыта) *данных*.

В зарубежных источниках информации в 70-х гг. прошлого века приведены статистические данные вероятности летального исхода по данным американских страховых компаний для 20,2 млн застрахованных лиц. Большой интерес представляли данные об уровнях риска летального исхода при различных видах деятельности в США, в различных отраслях народного хозяйства, при различных условиях деятельности (табл. 3.1, 3.2, 3.3).

Таблица 3.1

Вероятность летального исхода в отраслях хозяйства США

Отрасль народного хозяйства	$q \cdot 10^{-6}$, 1/год
Горные работы	2630
Транспорт	2630
Строительство	1750
Добыча полезных ископаемых	876
Эксплуатация газового и гидрооборудования	526
Металлургия	526
Деревообработка	526
Пищевая промышленность	438
Целлюлозно-бумажная промышленность и печать	350
Электротехника, точная механика, оптика	350
Химия	350
Торговля, коммунальные услуги	350
Текстильная и кожевенно-обувная промышленность	263
Здравоохранение	175
Средняя величина для 20,2 млн застрахованных	613

Таблица 3.2

Вероятность летального исхода при различных видах деятельности

Вид деятельности	$q \cdot 10^{-6}$, 1/год
Профессиональная деятельность	2630—175
Участие в движении транспорта	8760—4380
Занятие домашним хозяйством	438
Тяжелые заболевания	2630—8,76

Очевидно, что риск гибели на всех видах транспорта в США в течение года для 20,2 млн застрахованных составлял: $R = 20,2 \times 10^6 \cdot 2630 \cdot 10^{-6} = 53\,126$ чел. (см. табл. 3.1), что выше среднего риска $R_{\text{ср}} = 12\,382$ чел., а индивидуальный риск гибели в автокатастрофе для любого гражданина, пользующегося в США авто-транспортом в течение года, по данным табл. 3.3 составлял $R_1 = 270 \cdot 10^{-6}$ чел./год. В течение года практически при авариях автомашин погибал один из каждых 5000 чел.

Таблица 3.3

Вероятность летального исхода при различных источниках опасности или условиях деятельности в США и СССР

Источник или условия деятельности	США, $q \cdot 10^{-6}, 1/\text{год}$	СССР $q \cdot 10^{-6}, 1/\text{год}$
Аварии автомашин	270	300
Огонь и взрывы (пожар и ожог)	40	40
Водоемы (утонувшие)	28	30
Обращение с механизмами	10	10
Воздушное сообщение	7,5	9
Электричество	5,1	6,0
Железная дорога	—	4
Молния	0,55	0,5
Общественный транспорт	0,045	—
Радиоактивное излучение	0,005	0,0002

По статистическим данным, производственный риск в СНГ в 1992 году составил $R_1 = 100 \cdot 10^{-6}$ 1/год (14 тысяч погибших на 140 млн работающих).

На рис. 3.4 показана статистика смертельного травматизма в Российской Федерации по данным различных Федеральных органов исполнительной власти.

Расхождение в цифрах связано с рядом объективных обстоятельств:

- Росстат ведет анализ только по 21,23 млн работников (на июнь 2013 г.) из примерно 70 млн человек в целом по всем видам экономической деятельности (ВЭД);
- Фонд социального страхования не учитывает нестраховые случаи и случаи, не предъявленные для материального возмещения;
- Федеральная инспекция труда ведет наиболее полную оценку всех несчастных случаев, которые подвергались расследованию.

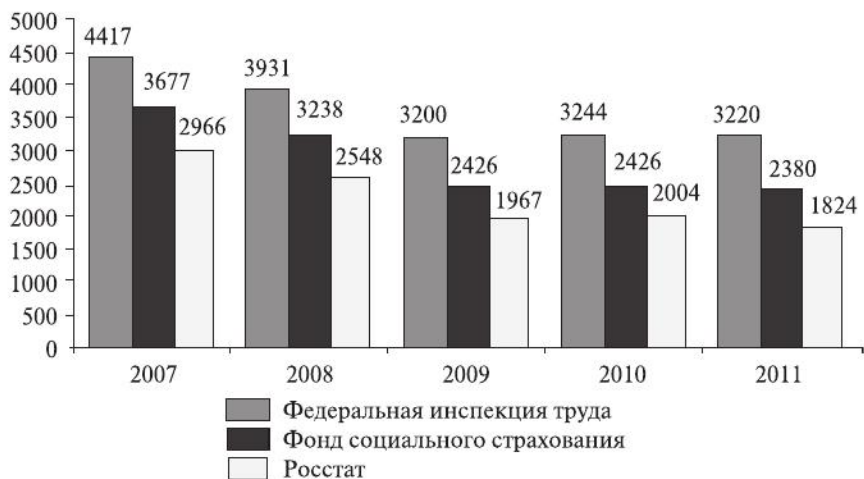


Рис. 3.4. Динамика численности пострадавших со смертельным исходом в Российской Федерации (по данным различных источников)

Численность экономически активного населения в июне 2013 г., по данным Росстата РФ, составила 75,5 млн человек или около 53 % от общей численности населения страны. В их числе 71,4 млн человек, или 94,6 % экономически активного населения были заняты в экономике и 4,1 млн человек (5,4 %) не имели занятия, но активно его искали (в соответствии с методологией Международной Организации Труда они классифицируются как безработные). В государственных учреждениях службы занятости населения зарегистрировано в качестве безработных 1,0 млн человек.

На основе данных статистики и рис. 3.4 можно ориентировочно подсчитать индивидуальный риск гибели работников в России и сравнить его с индивидуальным риском гибели на железнодорожном транспорте в ОАО «РЖД» (табл. 3.4) за пятилетний период.

Таблица 3.4

Ориентировочные данные индивидуального риска ($T_{см} \cdot 10^{-6}$) смертельного травмирования

Годы	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
По всем ВЭД России	63,1	56,2	45,7	46,3	46,0	—	—
ОАО «РЖД»	82	67	74	78	73	55	50

Данные табл. 3.4 показывают, что индивидуальный риск гибели в среднем по ВЭД России и в ОАО «РЖД» многократно пре-

вышает допустимый индивидуальный риск, принятый в качестве такового за рубежом и в нашей стране ($1 \cdot 10^{-6}$).

В ОАО «РЖД» индивидуальный риск смертельного травмирования превышает показатель среднего по всем ВЭД России, потому что железнодорожный транспорт является зоной повышенного риска травмирования, в том числе риском травмирования электрическим током на линиях электрифицированного транспорта.

Требует пояснения понятие «допустимый риск». Вторая половина XX века характеризовалась многими технологическими прорывами в различных областях техники и технологий, появились технологические процессы, сопровождающиеся применением новых материалов, высоких энергий, высоких скоростей и ядерных превращений. Это вызвало большой интерес к проблеме оценки технологий с точки зрения их безопасности и, в частности, определения уровня допустимого риска опасного воздействия на человека и окружающую среду.

Были предложены модели оценки допустимого риска. Одна из первых моделей основывалась на экономической концепции, основой которой была оценка «стоимости человека». Стоимостное выражение для человека включалось в материальные потери при техногенных авариях и инцидентах. К сожалению, эта модель обладала существенным недостатком, который заключался в том, что «стоимость человека» представляла собой довольно сложную оценку и оказывалась разной, в частности, в странах с развитыми и отсталыми экономиками.

В конце 70-х гг. прошлого века ряд американских ученых предложила для оценки допустимого риска применять его величину, которая возникает в результате расчета гибели людей на земном шаре в результате природных катастрофических явлений в течение года. Риск гибели в результате природных опасных явлений дан человеку природой, поэтому эта величина объективная, не подверженная влиянию конъюнктурных и любых других соображений. Логика жизни человека на земле диктует очевидную истину, что техногенные опасности, создаваемые человеком, должны укладываться в рамки природных явлений.

Величина риска гибели человека в результате негативных природных явлений находится в пределах $1 \cdot 10^{-6}$ — $1 \cdot 10^{-7}$ 1/год.

При проектировании и прогнозировании риска при эксплуатации технических устройств за рубежом принимается риск на уровне 10^{-7} 1/год в качестве *допустимого* при следующих условиях:

- сопоставление частот и величин риска, а также экономический анализ проведен до принятия решения и подтвержден практическими (экспериментальными или статистическими) данными;
- возможность риска проанализирована глубоко и всесторонне;
- после наступления неблагоприятного события вероятность риска для данного объекта не меняется;
- угроза риска не может быть более уменьшена оправданными затратами.

Анализ последствий ущерба, наносимых природными и антропогенными катастрофами, показывает, что угрозы природных катастроф в начале 70-х гг. прошлого века существенно превосходили угрозы от эксплуатации техники, а риск летального исхода для любого человека всегда существует на уровне 10^{-6} 1/год и выше.

Ранее в гл. 1 (табл. 1.3) уже были даны показатели риска травмирования на железнодорожном транспорте.

Можно учитывать случаи производственного травматизма по отношению к объему выполненной работы (рис. 3.5). Такой показатель принимается во всем мире в качестве наиболее объективного показателя уровня производственного травматизма в связи со значительным уменьшением объемов, например, грузовой работы на



Рис. 3.5. Объем грузовой работы на железнодорожном транспорте

железнодорожном транспорте; тенденция увеличения удельных показателей травматизма будет иметь удручающий вид (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Риск смертельного травматизма по отношению к объему выполненной работы

Годы	1992	1996	2000	2004	2008	2012
Грузооборот, трлн т·км	1,97	1,13	1,37	1,8	2,1	2,22
Риск гибели, 1/год·10 ⁻⁶	128,6	111,3	106,6	72	67	55
Удельный риск, (1/трлн т·км·год)·10 ⁻⁶	65,3	98,5	77,8	40	31,9	24,8
Удельный риск электротравмы, (1/трлн т·км·год)·10 ⁻⁶	Нет данных	1,08	1,52	6,4	6,71	5,9

Статистический анализ свидетельствует, что показатели риска смертельного травматизма в целом и по отношению к объему выполненной грузовой работы имеют тенденцию к снижению, однако риск смертельного травматизма при эксплуатации электроустановок растет. Это показывает, что устройства безопасности в хозяйстве электрификации не обеспечивают снижение электрического травматизма, в этом хозяйстве существует бóльший риск травматизма по сравнению с другими структурными подразделениями железнодорожного транспорта. Это свидетельствует об актуальности работ по обеспечению безопасности электротехнического персонала как в области развития и совершенствования технических устройств безопасности, так и в области проводимых организационных и технических мероприятий охраны труда.

При вероятностном подходе к уровню безопасности очевидно, что риск гибели или вероятность несчастного случая с летальным исходом $p = 10^{-7}$ может приниматься в качестве безопасного критерия во всех случаях, в частности в пожарной безопасности эта величина принята в качестве допустимого значения при социальном риске, т.е. при возможности гибели группы людей. Вероятность $p = 10^{-6}$ может приниматься в качестве безопасного критерия при наличии дополнительного обоснования.

Вероятность безопасной работы P может определяться (Косарев Б.И., Сибаров Ю.Г.) в виде вероятности события — превышения допустимого уровня напряжения на устройствах электроснабжения по условиям обеспечения электробезопасности, а вероят-

ность поражения человека — произведением вероятностей независимых событий:

$$P(\Pi) = P_{\text{кз}} P_{\text{пр}} P \cdot P_{\text{ф}} (t_{\text{к}} < \tau_{\text{к}}), \quad (3.5)$$

где $P_{\text{кз}}$ — вероятность возникновения опасного режима, например короткого замыкания, в тяговой сети; $P_{\text{пр}}$ — вероятность прикосновения человека к рельсовому пути и соединенным с ним устройствами; P — вероятность безопасной работы; $P_{\text{ф}}$ — вероятность совпадения импульса электрического тока и наиболее уязвимой фазы T кардиоцикла; $t_{\text{к}}$ — время срабатывания токовой защиты; $\tau_{\text{к}}$ — продолжительность фазы T кардиоцикла.

Известно, что вероятность появления хотя бы одного опасного режима (дискретного события) в процессе возникновения несчастного случая может подчиняться закону Пуассона и оцениваться соотношением

$$P(\Pi) = 1 - \exp[-N(\Pi)],$$

где $N(\Pi)$ — математическое ожидание (среднее значение) числа опасных режимов в год при обслуживании рельсового пути и соединенных с ним устройств.

Очевидно, что предложенная формула имеет смысл при $N(\Pi) \ll 1$. Можно принять значения числа опасных ситуаций в год 0,04 и 0,16. Первое значение 0,04, соответствующее возникновению одного опасного случая в 25 лет, предлагается в качестве допустимого при обслуживании элементов устройств отдельных групп электроустановок.

Вероятность возникновения производственной травмы можно определить по формуле

$$P_{\text{три}} = P_{\text{офи}} P_{\text{ри}} = \frac{t_i^{\text{оф}} t_i^{\text{р}}}{T_{\text{см}}^2}, \quad (3.6)$$

где $P_{\text{офи}}$ — статистическая вероятность возникновения опасного производственного фактора; $P_{\text{ри}}$ — статистическая вероятность нахождения работника в зоне действия опасного фактора; $t_i^{\text{оф}}$ — продолжительность действия i -го опасного фактора, ч; $t_i^{\text{р}}$ — продолжительность нахождения работающего в зоне действия i -го опасного фактора, ч; $T_{\text{см}}$ — продолжительность рабочей смены, ч.

Применение статистических характеристик при определении вероятности совместного события — возникновения производственной травмы — не всегда правильно отражает действительную вероятность события.

Легче всего это можно пояснить примером, показанным на рис. 3.6. На расчлененной оси времени t показана продолжительность действия опасного фактора $t_i^{\text{оф}} = 0,4 T_{\text{см}}$ и продолжительность нахождения работающего в зоне действия опасного фактора

(обращение к опасному узлу) $t_i^P = 0,4 T_{см}$. Статистическая вероятность $P_{офи} = P_{pi} = 0,4$, а вероятность с использованием соотношения (3.6) $P_{три} = 0,16$. В действительности из рис. 3.6 хорошо видно, что вероятность возникновения несчастного случая для приведенного примера равна нулю, так как процесс возникновения несчастного случая не пересекается (не совпадает) с процессом обращения работника к опасному узлу.

Гораздо чаще встречаются задачи, в которых риск возникает в процессе совпадения двух или нескольких, как правило, независимых процессов: процесса (процессов) возникновения опасных ситуаций (факторов) и процесса обращения человека к устройству, на котором эти факторы возникают. В этом случае необходимо изучать и применять понятия случайных величин, а при непрерывных значениях величин теорию случайных процессов.

Угроза при эксплуатации любых технических средств определяется двумя категориями событий: наличием факторов, представляющих угрозу для человека, и возможностью попадания человека в зону с опасными факторами. Обычно обе эти категории событий случайные. На рис. 3.7 показана одна из моделей временной области для таких процессов.

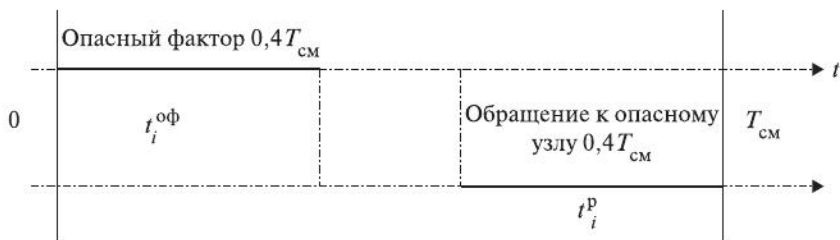


Рис. 3.6. Модель временной области при статистических расчетах вероятности несчастного случая

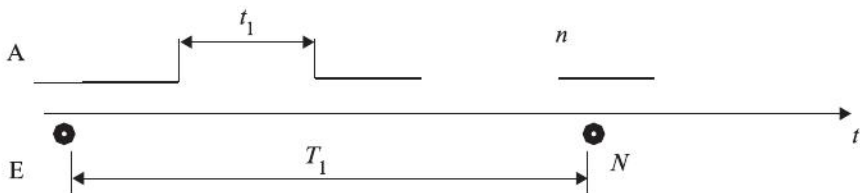


Рис. 3.7. Модель временной области при регулярном попадании в опасную зону А и случайные события, представляющие угрозу Е

Анализ во временной области в предположении равномерных распределений интервалов времени дает следующие выражения для вероятностей:

- для представляющего угрозу события $p_E = T_E / T$;
- для вероятности попадания в опасную зону $p_A = T_A / T$,

где T_E — суммарная продолжительность времени, представляющего угрозу события; T_A — суммарная продолжительность пребывания в опасной зоне; T — рассматриваемый период наблюдений.

Таким образом, вероятность наступления события в данной модели можно выразить как отношение интервалов времени.

Если представляющее угрозу событие E и событие «пребывание в опасной зоне A » независимы, то для вероятности совместного события $p(E \wedge A)$ справедливо соотношение

$$p(E \wedge A) = p_E p_A.$$

где \wedge — знак математической логики «И».

Обозначив число попаданий в опасную зону за время T через N , а число опасных ситуаций (опасностей) через n , для рассмотренной модели получаем выражение для вероятности хотя бы одного совпадения событий A и E , т.е. вероятности риска (несчастного случая) в виде

$$p = 1 - (1 - p_E)^N (1 - p_A)^n.$$

При малых значениях величин вероятностей p_E и p_A указанное соотношение вероятности риска (несчастного случая) можно заметить без существенной погрешности выражением

$$p \approx Np_E + np_A. \quad (3.7)$$

При величинах вероятностей менее 10^{-2} погрешность не будет превышать 1 %.

Другая модель совпадения случайных промежутков времени из двух или более независимых потоков событий (при этом поток промежутков времени рассматривается как случайный процесс) представлена на рис. 3.8.

На верхней полупрямой $O-t$ показан поток *обслуживания* I, состоящий из следующих друг за другом случайных по продолжительности событий — периодов времени между интервалами обслуживания t_i и периодов времени обслуживания θ_i , на нижней полупрямой $O-t$ показан поток *опасных факторов* II, состоящий из следующих друг за другом случайных по продолжительности пери-

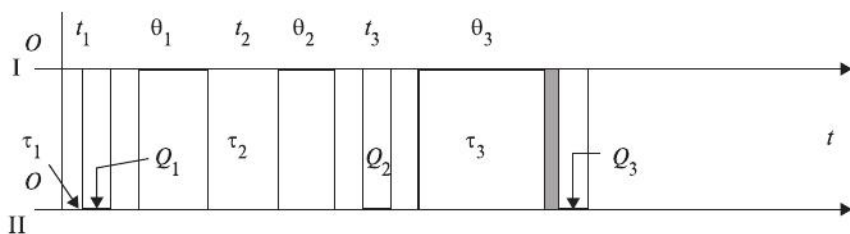


Рис. 3.8. Модель двух временных процессов I и II

одов времени между наступлением периодов опасности τ_i и периодов времени существования опасного фактора Q_i . Целью расчета математической модели является определение вероятности совпадения периодов θ_i и Q_i любой продолжительности (затушеванная область на рис. 3.8).

Примем в качестве параметров процессов:

- интенсивность потока обслуживания $\lambda_t = 1/t_0$;
- интенсивность потока опасностей $\lambda_\tau = 1/\tau_0$,

где t_0 — математическое ожидание продолжительности интервала между двумя смежными моментами обслуживания; τ_0 — математическое ожидание продолжительности интервала между двумя смежными опасностями.

На основе анализа рассматриваемой математической модели получены следующие выражения для вероятности искомого события — совпадения периода обслуживания и периода наступления опасности:

– вероятность несчастного случая (индивидуального риска) за произвольный промежуток времени t определяется соотношением

$$p = [1 - \exp(-\lambda_t t)][1 - \exp(-\lambda_\tau t)];$$

– вероятность несчастного случая (индивидуального риска) за произвольный промежуток времени t при совпадении нескольких n независимых друг от друга потоков опасностей

$$p_n = [1 - \exp(-\lambda_t t)] \prod_{i=1}^n [1 - \exp(-\lambda_{\tau_n} t)];$$

– вероятность несчастного случая (индивидуального риска) за произвольный промежуток времени t при совпадении хотя бы с одним из нескольких n независимых друг от друга потоков опасностей

$$p_{1n} = [1 - \exp(-\lambda_t t)] \sum_{i=1}^n [1 - \exp(-\lambda_{\tau_n} t)].$$

В практике оценки безопасности производственных процессов возникают задачи, когда при регулярном обращении работника к производственному процессу опасности возникают достаточно редко и за очень короткие интервалы времени. Например, повреждение электрооборудования и возникающие при этом опасные режимы воздействия на человека напряжений прикосновения, когда опасность длится несколько секунд или доли секунды. В этих случаях нужно иметь в виду следующее приближенное соотношение

$$[1 - \exp(-\lambda t)] \approx \lambda t \text{ при } \lambda t \ll 1.$$

В этом случае вероятность несчастного случая (риска) за произвольный промежуток времени t при совпадении хотя бы с одним из n независимых друг от друга потоков опасностей можно выразить соотношением

$$p_{1n} \approx [1 - \exp(-\lambda_t t)] \sum_{i=1}^n \lambda_{\tau_i} t.$$

Интенсивности λ_t и λ_{τ} могут быть определены из статистических расчетов при анализе процессов обслуживания и процессов возникновения опасных производственных факторов или могут задаваться на основе гипотез о модели взаимодействия этих процессов. Во всех случаях должны оцениваться доверительные интервалы полученных интенсивностей.

С учетом вероятности безопасной работы P вероятность поражения (электрической травмы) может быть определена из соотношения

$$P(\Pi) = [1 - \exp(-\lambda_t t)] \sum_{i=1}^n [1 - \exp(-\lambda_{\tau_i} t)], \quad (3.8)$$

где $P = (1 - 1 \cdot 10^{-6}) = 0,999999$ (в практических расчетах вероятность P можно принимать равной единице); $\lambda_t = 1/t_0$, t_0 — средний интервал между моментами обращения работника к опасному узлу; t — продолжительность времени наблюдения, в частности $t = T_{см}$; $\lambda_{\tau_i} = 1/\tau_{0i}$, τ_{0i} — средняя продолжительность интервала между периодами i -го опасного фактора (опасной величины напряжения прикосновения) или $\lambda_{\tau_i} = 1 - \lambda Q_i = 1 - 1/Q_{0i}$, Q_{0i} — средняя продолжительность действия опасности; n — число опасных факторов.

Вероятность события возникновения электрической травмы определяется вероятностью одновременного наличия событий:

— возникновение напряжений шага и прикосновения в нормальных и аварийных режимах работы электроустановки $P_{\text{оф}} = \sum_{i=1}^n \lambda_{\tau_i} t$;

– превышение напряжений шага и прикосновения нормируемых уровней по величине и продолжительности $P_{\text{пр}}$;

– обращение человека к опасному узлу или появление человека в опасной зоне $P_p = [1 - \exp(-\lambda_r t)]$.

Основным критерием при применении вероятностного подхода при оценке оборудования и электрических систем по травмобезопасности может быть неравенство

$$P(\Pi) \leq 10^{-6}.$$

Пример. Определить вероятность (риск) электрической травмы в течение года ($t = 1$ год) на обслуживаемом участке тяговой сети постоянного тока, если известно, что число аварийных замыканий тяговой сети в течение года составляет на нем 20, вероятность превышения допустимого по ГОСТ 12.001.38-82 (96) уровня 650 В при продолжительности процесса короткого замыкания $t \leq 0,1$ с составляет $P_{\text{пр}} = 0,2$. Рельсовые пути, на которые заземляются металлические конструкции контактной сети и других сооружений и на которых возникает опасное напряжение прикосновения, обслуживаются электромеханиками контактной сети и автоматики, рабочими по ремонту пути. Средний интервал между обращениями работников к устройствам рельсового пути и присоединенным конструкциям составляет $t_0 = 0,01$ г.

Подставляя исходные данные в соотношение (3.8), получим:

$$P(n) = 0,2 \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{0,01}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{0,05}\right) \right] \cong 0,2,$$

где $\tau_0 = 1/20$ (0,05) года — средняя продолжительность интервала между возникающими опасными ситуациями.

Таким образом, при большой продолжительности наблюдения вероятность поражения становится практически равной вероятности превышения напряжением прикосновения допустимого уровня ($P(\Pi) = P_{\text{пр}} = 0,2$).

Пример. При тех же условиях задачи определить вероятность поражения электрическим током в течение смены продолжительностью 8 ч (0,000913 года).

$$P(n) = 0,2 \left[1 - \exp\left(-\frac{0,000913}{0,01}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{0,000913}{0,05}\right) \right] = 315 \cdot 10^{-6}.$$

Полученные в примерах уровни вероятности поражения током выше, чем допустимый уровень 10^{-6} , поэтому при выполнении рас-

смотренных работ необходимо осуществлять организационные и технические мероприятия по охране труда и электробезопасности для защиты от опасных напряжений прикосновения.

3.2. Основные законодательные акты по охране труда, требования к обслуживающему персоналу

Организационные и законодательные меры защиты персонала в электроустановках являются частью мер, входящих в систему мероприятий по охране труда в электроустановках.

Охрана труда — система сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности, включающая правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические, реабилитационные и иные мероприятия.

Законодательство Российской Федерации по охране труда состоит из соответствующих норм Конституции РФ, Трудового кодекса РФ, других федеральных законов и издаваемых на их основе законодательных и иных нормативных актов Российской Федерации и республик, краев и областей в составе РФ (субъектов РФ).

Конституция РФ провозглашает:

Статья 7 (пункт 2). В Российской Федерации охраняется труд и здоровье людей, устанавливается гарантированный минимальный размер оплаты труда.

Статья 27 (пункт 3). Каждый имеет право на труд в условиях, отвечающих требованиям безопасности и гигиены, на вознаграждение за труд без какой-либо дискриминации и не ниже установленного федеральным законом минимального размера оплаты труда, а также право на защиту от безработицы.

Статья 41 (пункт 3). Соккрытие должностными лицами фактов и обстоятельств, создающих угрозу для жизни и здоровья людей, влечет за собой ответственность в соответствии с федеральным законом.

Основными законодательными актами, которые устанавливают гарантии осуществления прав трудящихся на охрану труда и обеспечивают единый порядок регулирования отношений в области охраны труда между работодателем и работником на предприятиях, в учреждениях и организациях всех форм собственности независимо от сферы хозяйственной деятельности и ведомственной под-

чиненности, является Федеральный закон «Трудовой кодекс РФ». Раздел 10 «Охрана труда» этого закона устанавливает: сферу применения законодательства об охране труда; государственные нормативные требования охраны труда; основные направления государственной политики в области охраны труда; полномочия органов государственной власти, субъектов РФ и органов местного самоуправления в области охраны труда; право и гарантии права работников на труд в условиях, соответствующих требованиям охраны труда; структуру управления и механизмы обеспечения охраны труда; государственный надзор и контроль соблюдения законодательства об охране труда; ответственность за нарушение требований охраны труда. Закон направлен на создание условий производства, отвечающих требованиям сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности.

Нормативными правовыми документами по охране труда, которыми устанавливается комплекс правовых, организационно-технических, санитарно-гигиенических и лечебно-профилактических требований, направленных на обеспечение безопасности, сохранения здоровья и работоспособности работников в процессе труда, являются:

- государственные стандарты по безопасности труда (ГОСТ РФ);
- своды Правил (СП);
- санитарные нормы (СН);
- гигиенические нормативы (ГН);
- санитарные правила и нормы (СанПиН);
- правила безопасности (ПБ);
- правила устройства и безопасной эксплуатации (ПУБЭ);
- инструкции по безопасности (ИБ);
- правила по охране труда (ПОТ).

Нормативными правовыми документами, устанавливающими требования безопасности к продукции, процессам производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, в том числе на основе Федерального закона «О техническом регулировании» от 27.12.2002 г. № 184-ФЗ, являются:

- технические регламенты РФ (установленные международными договорами, указами Президента, постановлениями Правительства, федеральными законами) и технические регламенты Таможенного союза (ТР ТС);
- постановления органов Исполнительной власти;

- своды Правил;
- правила устройства;
- правила технической эксплуатации.

Органом государственного надзора сферы материального производства в существующей структуре Правительства РФ является Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору при Правительстве РФ (Ростехнадзор России), статус которой утвержден Указом Президента РФ от 23.06.2010 г. № 780.

Для надзора за безопасной эксплуатацией электроустановок в структуре Ростехнадзора России имеется специальный орган — Государственный энергетический надзор России (Госэнергонадзор России). Госэнергонадзор России издает нормативные правовые акты по безопасности эксплуатации электроустановок, обязательные для всех потребителей электроэнергии независимо от их ведомственной принадлежности и форм собственности, основными из которых являются:

Правила устройства электроустановок (7-я редакция 2005 г.), в которых содержатся определения, область применения и общие указания по устройству электроустановок, выбору проводников и электрических аппаратов при проектировании, монтаже и эксплуатации электроустановок;

Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок (зарегистрировано в Минюсте России 12.12.2013 г. № 330593), в которых содержатся требования безопасности к персоналу и его действиям при эксплуатации (обслуживании, наладке, испытаниях, измерениях и ремонте) электроустановок потребителей;

Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (утверждены приказом Минэнерго РФ от 13.01.2003 г. № 6), в которых содержатся требования к потребителям электрической энергии по обеспечению надежной, безопасной и рациональной эксплуатации электроустановок;

Правила Системы сертификации электроустановок зданий. Основные положения. Порядок проведения сертификации. В комплекте документов содержится порядок сертификации электроустановок зданий и основные требования к электроустановкам при сертификации.

Стандарты организации (СТО), инструкции, правила и нормы по электробезопасности являются локальными нормативными до-

кументами и могут применяться при эксплуатации электроустановок при условии, что они не ослабляют требований Правил Ростехнадзора России и не противоречат им.

Персонал, осуществляющий эксплуатацию, техническое обслуживание и ремонт электроустановок должен иметь профессиональную подготовку.

По функциональным обязанностям персонал подразделяется (рис. 3.9) на:

– *электротехнический* (в том числе: административно-технический персонал (АТП), оперативный персонал (ОП), ремонтный персонал (РП), оперативно-ремонтный персонал (ОРП));

– *электротехнологический персонал*, к которому, как правило, относятся работники, которые участвуют в технологическом процессе на сложном энергонасыщенном оборудовании. К таким работникам, например, относятся электросварщики и другие профессии работников, использующих в технологическом процессе электроинструмент и другое электрооборудование;

– *неэлектротехнический персонал*, к которому относятся лица, не имеющие электротехнической или электроэнергетической квалификации, но которым по своей квалификации необходимо выполнять работы в действующих ЭУ или вблизи них под руководством электротехнического персонала. Это профессии работников: строители, механики, сантехники, уборщики и др.;

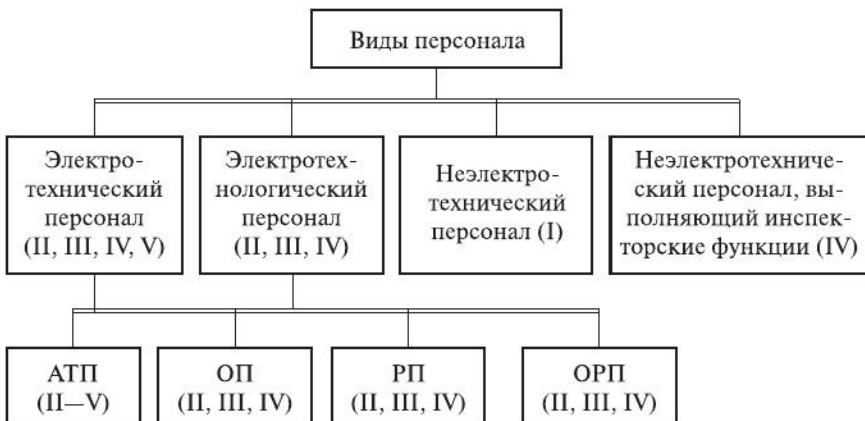


Рис. 3.9. Виды персонала при обслуживании электроустановок. I, II, III, IV, V — группы по электробезопасности

— *неэлектротехнический персонал с инспекторскими функциями*, к которому относятся квалифицированные работники, но по своим служебным обязанностям не осуществляющие руководства работой электроустановки или обслуживание и ремонт, а осуществляющие только инспектирование ее эксплуатации. К такому персоналу относятся, например, инспекторы энергетического надзора, инженеры охраны труда и другие специалисты, выполняющие надзорные функции. Указанному персоналу при наличии трехлетнего стажа работы в организации может присваиваться 4 группа по электробезопасности. В протоколе и удостоверении указываются функциональные обязанности — с правом инспектирования.

Лица, не достигшие семнадцатилетнего возраста, к работе в качестве электротехнического персонала не допускаются.

Практиканты высших и средних учебных заведений, профессионально-технических училищ, ученики электромонтеров, не имеющие законченного специального образования, могут пройти проверку знаний на присвоение II группы по электробезопасности только после обучения по программе объемом не менее 72 ч. Работники, не обслуживающие электроустановки, могут допускаться в них в сопровождении оперативного персонала с IV группой по электробезопасности в ЭУ напряжением выше 1000 В и с III группой — в ЭУ напряжением до 1000 В, либо работника, имеющего право единоличного осмотра ЭУ.

Лица, обслуживающие электроустановки и имеющие квалификационную группу по электробезопасности II—V, должны отвечать следующим требованиям:

— по состоянию здоровья не иметь противопоказаний для персонала, обслуживающего действующие ЭУ (в необходимых случаях включая верхолазные работы). Состояние здоровья определяется медицинским освидетельствованием при приеме на работу и затем периодически в установленные сроки за счет средств работодателя (Приказ Минздравсоцразвития РФ от 12.04.2011 г. № 302 Н, Приложение № 2);

— иметь документ о специальном образовании, пройти инструктаж, знать безопасные методы работы, правила прохода по железнодорожным путям, инструкции и руководящие материалы по электробезопасности, пройти проверку знаний в квалификационной ко-

миссии с присвоением соответствующей квалификационной группы по электробезопасности;

- отчетливо представлять опасность воздействия на организм человека электрического тока и знать связанные с этим меры безопасности, уметь пользоваться индивидуальными защитными средствами и предохранительными приспособлениями;

- знать приемы освобождения пострадавших от действия электрического тока, уметь практически оказывать первую помощь пострадавшим в случае поражения электрическим током и пользоваться средствами коммуникации для информации руководителей о несчастном случае и вызове бригад медицинской скорой помощи.

Надзор и контроль за соблюдением законодательных и иных нормативных актов об охране труда при эксплуатации ЭУ осуществляют специально уполномоченные на это государственные органы и инспекции, не зависящие в своей деятельности от администрации предприятий и их вышестоящих органов.

Федеральная инспекция труда РФ выполняет следующие основные задачи:

- осуществление государственного надзора и контроля соблюдения законодательства РФ о труде и охране труда, а также связанных с ним законодательных и нормативных правовых актов о возмещении вреда, причиненного здоровью работника, социальном страховании, занятости, банкротстве и приватизации предприятий, коллективных договорах и соглашениях;

- защита трудовых прав и обеспечение безопасных условий труда работников, а также защита их от незаконных действий работодателей, должностных лиц и других ответственных работников организаций, ущемляющих эти права;

- разработка предложений по совершенствованию законодательства РФ и иных нормативных правовых актов о труде и охране труда;

- обеспечение повышения квалификации работников аппарата Рострудинспекции и государственных инспекций труда;

- содействие овладению работодателями и работниками знаниями законодательства РФ и действующих норм и нормативов о труде и охране труда.

Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ (*Ростехнадзор России*) является:

— федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке и реализации государственной политики и нормативно-правовому регулированию в установленной сфере деятельности, а также в сфере технологического и атомного надзора;

— функции по контролю и надзору в сфере безопасного ведения работ, связанных с пользованием недрами, промышленной безопасности, безопасности при использовании атомной энергии (за исключением деятельности по разработке, изготовлению, испытанию, эксплуатации и утилизации ядерного оружия и ядерных энергетических установок военного назначения);

— функции безопасности электрических и тепловых установок и сетей (кроме бытовых установок и сетей);

— функции безопасности гидротехнических сооружений (за исключением судоходных гидротехнических сооружений, а также гидротехнических сооружений, полномочия по осуществлению надзора за которыми переданы органам местного самоуправления);

— функции безопасности производства, хранения и применения взрывчатых материалов промышленного назначения, а также специальные функции в области государственной безопасности в указанной сфере.

Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека РФ (*Роспотребнадзор России*) осуществляет следующие полномочия:

— осуществляет надзор и контроль исполнения обязательных требований законодательства РФ в области обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения, защиты прав потребителей и в области потребительского рынка;

— осуществляет в соответствии с законодательством РФ лицензирование отдельных видов деятельности, отнесенных к компетенции Службы;

— регистрирует впервые внедряемые в производство и ранее не использовавшиеся химические, биологические вещества и изготавливаемые на их основе препараты, потенциально опасные для человека (кроме лекарственных средств), отдельные виды продукции, представляющие потенциальную опасность для человека (кроме лекарственных средств), отдельные виды продукции, в том числе пищевые продукты, впервые ввозимые на территорию Российской

Федерации, а также лиц, пострадавших от радиационного воздействия и подвергшихся радиационному облучению в результате чернобыльской и других радиационных катастроф и инцидентов, товары в случае, если они включены в перечень товаров, подлежащих санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю) на таможенной границе и таможенной территории Таможенного союза, и в других случаях, предусмотренных техническими регламентами Таможенного союза;

- устанавливает причины и выявляет условия возникновения и распространения инфекционных заболеваний и массовых неинфекционных заболеваний (отравлений);

- информирует органы государственной власти РФ, власти субъектов РФ, органы местного самоуправления и население о санитарно-эпидемиологической обстановке и о принимаемых мерах по обеспечению санитарно-эпидемиологического благополучия населения;

- готовит предложения о введении и об отмене на территории РФ, субъектов РФ ограничительных мероприятий (карантина) в порядке, установленном законодательством РФ;

- организует в установленном порядке ведение социально-гигиенического мониторинга;

- организует деятельность системы государственной санитарно-эпидемиологической службы РФ;

- осуществляет разработку и утверждение государственных санитарно-эпидемиологических правил и гигиенических нормативов, а также разработку обязательных требований в сфере защиты прав потребителей;

- вносит в Правительство РФ проекты федеральных законов, нормативных правовых актов Президента РФ и Правительства РФ и другие документы, по которым требуется решение Правительства РФ, по вопросам, относящимся к сфере деятельности Службы;

- осуществляет в установленном порядке проверку деятельности юридических лиц, индивидуальных предпринимателей и граждан по выполнению требований законодательства РФ в области обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения и в области защиты прав потребителей, а также технических регламентов, государственный контроль (надзор) за соблюдением требований которых возложен на службу, и другие.

Государственный пожарный надзор (Постановление Правительства РФ от 12.04.2012 г. № 290 «О федеральном государственном пожарном надзоре») и его территориальные органы:

- организуют и проводят проверки деятельности организаций и граждан, состояния используемых (эксплуатируемых) ими объектов защиты;

- производят в соответствии с законодательством РФ дознание по делам о пожарах и по делам о нарушениях требований пожарной безопасности;

- ведут в установленном порядке производство по делам об административных правонарушениях в области пожарной безопасности;

- осуществляют официальный статистический учет и ведение государственной статистической отчетности по пожарам и их последствиям;

- осуществляют взаимодействие с федеральными органами исполнительной власти, в том числе с органами государственного контроля (надзора), органами исполнительной власти субъектов РФ, органами местного самоуправления, общественными объединениями и организациями, по вопросам обеспечения пожарной безопасности;

- рассматривают обращения и жалобы организаций и граждан по вопросам обеспечения пожарной безопасности;

- осуществляют прием и учет уведомлений о начале осуществления юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями отдельных видов работ и услуг по перечню, утвержденному Правительством РФ.

Представители органов государственного контроля и надзора вправе беспрепятственно посещать предприятия, учреждения и организации независимо от форм собственности, проводить проверки соблюдения законодательства РФ, налагать в установленном законодательством РФ «Об административных правонарушениях» административные взыскания, включая штрафы на работодателей, должностных лиц и других ответственных работников этих предприятий, учреждений и организаций.

Высший надзор за точным и единообразным исполнением законов на территории РФ осуществляет Генеральная прокуратура Российской Федерации.

Общественный контроль соблюдения законных прав и интересов работников в области охраны труда осуществляют профессиональные союзы в лице их выборных органов и иные уполномоченные работниками представительные органы, которые могут создавать для этих целей собственные инспекции.

Для реализации своих прав трудовые коллективы могут выбирать уполномоченных (доверенных) лиц по охране труда, которые осуществляют свою деятельность в соответствии с Трудовым кодексом РФ.

Ведомственный надзор за соблюдением законодательных и иных нормативных актов по охране труда осуществляют министерства и ведомства.

3.3. Основные сведения об электрических травмах, статистический анализ травматизма, возмещение ущерба здоровью пострадавших, расследование несчастных случаев в электроустановках

Травма — повреждение тканей организма человека с нарушением их целостности и функций, вызванное внешними воздействиями. Совокупность возникающих травм в определенных условиях жизнедеятельности называют *травматизмом* (например, в условиях производства — производственный травматизм, в быту — бытовой травматизм, на транспорте — транспортный травматизм).

По источнику воздействия или опасному производственному фактору, воздействие которого приводит к травме, могут быть механические, термические, химические, психические и др. травмы.

Травмы, вызванные воздействием на организм человека электрического тока и электромагнитных полей, называют *электрическими травмами* или электротравмами. Электрические травмы, кроме специфического раздражающего воздействия в виде электрического удара и болевого воздействия, часто сопровождаются термическими травмами кожного покрова организма в виде ожогов, электрических знаков и меток, а также тепловым и электролитическим разрушением тканей внутри тела человека вдоль узкого канала протекания электрического тока (как правило, при напряжениях выше 1000 В).

На железнодорожном транспорте электрические травмы занимают значительный удельный вес по сравнению с другими видами травм, они составляют до 24 % травм с летальным исходом.

Одним из наиболее объективных апостериорных исследований риска в условиях производства является **анализ производственного травматизма**.

Основными *методами* анализа производственного травматизма являются: статистический, топографический, критериальный, монографический и групповой.

Статистический метод основан на средних статистических оценках травматизма. Основными показателями статистического метода при оценке травматизма являются: коэффициент частоты, коэффициент тяжести и коэффициент частоты смертельного травматизма:

$$\kappa = \frac{T}{N_{\text{ср}}} \cdot 1000; \kappa_T = \frac{D}{N_{\text{ср}}} \cdot 1000; \kappa_{\text{см}} = \frac{T_{\text{см}}}{N_{\text{ср}}} \cdot 1000,$$

где κ , κ_T , $\kappa_{\text{см}}$ — соответственно коэффициенты частоты, тяжести и частоты смертельного травматизма; T , $T_{\text{см}}$ — соответственно общее число случаев травмирования людей и травмирования с летальным исходом за определенный период (год); D — число дней временной нетрудоспособности, в связи со случаями травмирования людей на производстве, за определенный период (год); $N_{\text{ср}}$ — среднее списочное число работников предприятия за рассматриваемый период (год).

Коэффициент частоты представляет собой численность случаев травмирования людей за определенный период в условной организации с числом работающих 1000 человек и показывает, как часто происходят травмы в данной организации. Приведение численности травм к условной численности организации необходимо для сравнения различных по численности организаций, служб или структурных подразделений между собой.

Коэффициент тяжести представляет собой общее число дней временной нетрудоспособности в результате случаев травмирования людей за определенный период (без учета травм с летальным исходом) в условной организации с числом работающих 1000 человек и показывает, насколько тяжелыми были травмы в данной организации за рассматриваемый период.

Коэффициент тяжести не может учитывать травмы с летальным исходом. Смертельные травмы являются исключительным и чрезвычайным событием для любой организации, поэтому их статистический анализ проводится отдельно с помощью коэффициента частоты смертельного травматизма.

Коэффициент частоты смертельного травматизма представляет собой численность случаев травмирования людей с летальным исходом за определенный период времени в условной организации с числом работающих 1000 человек и показывает, как часто происходят смертельные травмы в данной организации. Коэффициент частоты смертельного травматизма характеризует достаточно редкое происшествие, поэтому чаще всего подсчитывается для отрасли или крупных предприятий с большим числом работающих (акционерное общество, филиал, редко — структурное подразделение).

Из формул для коэффициентов частоты легко определить среднее списочное число работников организации, если известен коэффициент частоты производственного травматизма. В последние годы при анализе производственного травматизма в ОАО «РЖД» не показывается численность работающих в целом в ОАО «РЖД» и его структурных подразделениях, а коэффициент частоты смертельного травматизма округляется до одной значащей цифры. Эти маленькие хитрости делаются видимо для того, чтобы лица, знакомящиеся с документом, не могли проверить правильность рассчитанных цифр. Этими лицами, прежде всего, являются руководители компании.

В табл. 3.6 приведены статистические данные травматизма и коэффициенты частоты смертельного травматизма, полученные на основе статистических данных МПС РФ (1992—1996 и 2002 гг.) и ОАО «РЖД» (2003 — 2013 гг.). Сравнивая их с официальными статистическими данными, в которых, например, коэффициент частоты смертельного травматизма $\kappa_{\text{см}} = 0,07$ в 2004—2006, 2008—2011 гг., видно, что это не так, но создает впечатление, что показатель находится на прежнем уровне. Нужно при этом иметь в виду, что каждая тысячная доля коэффициента частоты — это единицы человеческих жизней.

Таблица 3.6

**Некоторые статистические данные травматизма
на железнодорожном транспорте**

Год	Организация	Численность работников, тыс.	Общее число случаев (в том числе с летальным исходом)	$\kappa_{\text{см}}$	Число смертельных случаев при электротравмах
1	2	3	4	5	6
1992	МПС РФ	2231	3540 (287)	0,129	Нет данных
1993	То же	2184,3	3006 (254)	0,116	38

1	2	3	4	5	6
1994	МПС РФ	2128,3	2536 (241)	0,113	41
1995	То же	2111,7	2259 (240)	0,114	37
1996	»»	2039,4	1975 (227)	0,111	44
2002	»»	1390	1068 (139)	0,1	29
2003	»»	1353	1123 (146)	0,108	28
2004	ОАО «РЖД»	1477	1049 (106)	0,072	17
2005	То же	1441	922 (98)	0,068	13
2006	»»	1352	757 (96)	0,071	15
2007	»»	1155	751 (95)	0,082	16
2008	»»	1202	649 (80)	0,067	16
2009	»»	1051	620 (78)	0,074	15
2010	»»	971	534 (73)	0,078	16
2011	»»	929	418 (68)	0,073	12
2012	»»	918	358 (50)	0,055	12
2013	»»	880	343 (45)	0,050	8

Статистический метод при анализе электрических травм позволяет выявлять закономерности и факторы, сопутствующие или способствующие росту несчастных случаев. Например, зависимость травматизма от квалификации, возраста, стажа работы в ЭУ, пола пострадавших, от условий труда и трудовой деятельности, момента наступления травмы (часы в течение рабочего дня, рабочие дни в течение недели, месяц года). Упреждающее воздействие на выявленные закономерности позволяет снизить производственный травматизм на предприятии.

Топографический метод основан на анализе мест происшествия травм по их повторяемости в аналогичных местах. Топографический анализ травматизма осуществляется на топографическом плане предприятия, где условными знаками отмечаются случаи травматизма. В местах скопления условных знаков (случаев травм) выявляются и устраняются опасные производственные факторы или другие производственные факторы, способствовавшие наступлению травматических случаев.

Критериальный метод основан на анализе опасных и вредных производственных факторов и сравнении их с установленными крите-

риями (предельно допустимые уровни, предельно допустимые концентрации, риск травмирования и др.). Например, критериальный метод применяется при анализе и сравнении выявленных в электроустановках в результате теоретического или экспериментального исследования значений напряжения прикосновения и токов с установленными критериями (по ГОСТ 12.1.038-82 (2001) «Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов»). В случаях превышения установленных допустимых значений устраняют опасный производственный фактор или применяют технические средства защиты в электроустановках, обеспечивающие защиту человека от выявленных опасных производственных факторов.

Монографический метод предполагает всеобъемлющее, полное исследование каждого несчастного случая с использованием системного подхода. Одной из форм исследования на основе системного подхода является построение *дерева причин* несчастного случая. Такой подход к рассмотрению несчастного случая заставляет изучать не только элементы, составляющие систему, но и их взаимодействие между собой.

Первая цель анализа состоит в том, чтобы проследить, начиная с первых звеньев причинной связи, те отдельные сбои в функционировании системы, которая формируется данной производственной единицей (предприятие, подразделение или рабочее место). С помощью построения цепи предшествующих событий получается в общем виде вся схема событий, приведших к негативной ситуации (несчастный случай, аварийная ситуация или опасное происшествие).

Воспроизведение цепи предшествующих событий вплоть до несчастного случая представляется диаграммой, обычно называемой *деревом причин (событий)*, которое отражает схему предшествующих событий, прямо или косвенно послуживших причинами травмы.

Конечной целью монографического анализа является разработка мер и внедрение технических средств, предупреждающих повторное возникновение подобных негативных происшествий или возникновение опасных факторов, вызывающих эти происшествия (в том числе электрические травмы или другие повреждения организма человека).

Пример. В локомотивном депо С для ремонта электрического вентиляционного устройства воздушной завесы ворот была направлена бригада из двух человек. Распоряжение было отдано во вре-

мя утренней планерки мастером устно. Устройство расположено на высоте дверного проема ворот локомотивного депо, для проведения ремонта на высоте имеется заземленная металлическая монтажная площадка. Маневровые движения электрических локомотивов под площадкой через дверной проем депо прекращены не были. Контактная сеть 3 кВ не отключалась.

Во время производства ремонтных работ монтер Т для более удобного расположения по отношению к ремонтируемому устройству ступил с металлической монтажной площадки одной ногой на крышу электровоза, находящегося в это время под монтажной площадкой. При производстве работ монтер Т случайно коснулся высоковольтной шины, находящейся на крыше электровоза и получил электрическую травму.

Составление дерева причин начинается с последней стадии события, а именно с травмы (событие Y). По каждой зарегистрированной предшествующей (в хронологическом порядке) стадии событий (X_1, X_2, \dots, X_n) последовательно ставятся вопросы:

1. Какой предшествующей причинной стадией X_i было непосредственно вызвано событие Y?

2. Достаточно ли было одной стадии X_i , чтобы вызвать событие Y?

3. Если нет, то какие другие предшествующие стадии (X_1, X_2, \dots, X_n) также необходимы, чтобы непосредственно вызвать событие Y?

Эти вопросы помогают выявить три вида логических связей между последовательными стадиями события Y: последовательность стадий, разделение и сочетание причинно-следственных стадий события.

Составление дерева причин (табл. 3.7) вынуждает собирать более глубокую информацию для проведения анализа. Часто приходится анализировать события, возникающие задолго до возникновения электрической травмы, иначе не удастся построить дерево причин в полном объеме (дерево причин на рис. 3.10).


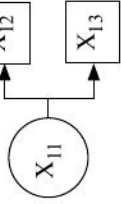
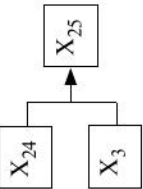
Использование дерева причин при анализе и расследовании несчастных случаев с электрическими травмами служит двум целям:

— исключению повторения несчастного случая в аналогичной обстановке;

— исключению причины возникновения подобных несчастных случаев.

Таблица 3.7

События, предшествующие электрической травме и виды логических связей между ними

<p>X_{21} — отсутствие должной квалификации персонала по электробезопасности</p>	<p>X_{22} — не оформлен наряд-допуск на производство работ или распоряжение</p>	<p>X_{23} — отсутствие информации об опасности (инструктажа при допуске бригады к работе)</p>	<p>X_{24} — отсутствие надзора за безопасным ведением работ</p> <p>X_3 — неудобная рабочая поза</p>	<p>X_{25} — механик встал на крышу электровоза</p>	
<p>X_{11} — наличие напряжения в контактной сети; X_{11} — наличие напряжения в крышевом оборудовании электровоза; X_{11} — наличие маневровых передвижений электровозов через дверной проем депо</p>					
<p>Виды логических связей</p>					
<p>Последовательность</p>		<p>Разделение</p>			<p>Сочетание</p>
<p>Последующее событие X_{22} имеет непосредственную причину X_{21}. Событие X_{21} является необходимым и достаточным для появления события X_{22}</p>	<p>Два или более событий X_{12}, X_{13} имеют одну причину X_{11}. Событие X_{11} является необходимым и достаточным для появления событий X_{12} и X_{13}</p>				<p>Последующее событие X_{25} имеет более, чем одну причину X_{24} и X_3. Событие X_{25} имеет причинами события X_{24} и X_3, каждое из которых не может быть достаточным, необходимо их сочетание</p>
					

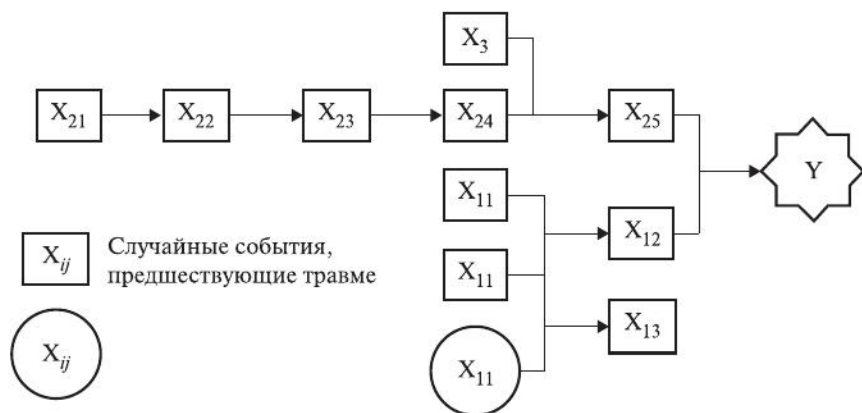


Рис. 3.10. Дерево причин несчастного случая (электрической травмы) Y

Логическая структура дерева причин несчастного случая (см. рис. 3.10) такова, что при исключении хотя бы одного из предшествующих *последовательных* событий (стадий) несчастный случай произойти не может. Предупредительные меры будут достаточно точными для того, чтобы предотвратить повторение аналогичного случая. Вторая цель может быть достигнута исключением всех причинных стадий, приведших к несчастному случаю.

Реализация организационных и технических мер по устранению причин несчастных случаев не всегда приносит результат по полному устранению несчастных случаев, происходящих в аналогичной обстановке или при аналогичных опасных производственных факторах, особенно в рамках больших производственных коллективов или больших контингентов работников, например, в крупных акционерных обществах.

Групповым методом исследования несчастных случаев называют метод исследования несчастных случаев по группам факторов: причинам или видам травм, возрасту или профессиональному стажу пострадавших, месту или времени происшествия и т.п. Например, исследование электрических травм отдельно от других видов травм является групповым методом исследования травматизма.

Результаты расследования каждого несчастного случая и анализ травматизма различными методами должны рассматриваться работодателем в целях разработки и реализации мер по предупреждению несчастных случаев, решения вопросов о возмещении

вреда пострадавшим и членам их семей, предоставления им компенсаций и льгот.

Возмещение вреда, причиненного здоровью работника, состоит в выплате потерпевшему денежных сумм в размере заработка (или соответствующей его части) в зависимости от степени утраты профессиональной трудоспособности вследствие трудового увечья (в результате электрической травмы); в компенсации дополнительных расходов; в выплате в установленных случаях единовременного пособия; в возмещении морального вреда.

Причинение вреда жизни и здоровью работника при исполнении им трудовых обязанностей осуществляется возмещением в соответствии с Федеральным законом от 24.07.1998 г. № 125-ФЗ. «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний», иными законами и нормативными правовыми актами Российской Федерации.

В соответствии с введением в действие этого закона следует различать следующие *субъекты страхования*:

– *застрахованный* — физическое лицо, подлежащее обязательно социальному страхованию в соответствии с законом, или лицо, получившее повреждение здоровья вследствие несчастного случая на производстве или профессионального заболевания, подтвержденное в установленном порядке и повлекшее утрату профессиональной трудоспособности;

– *страхователь* — юридическое лицо любой организационно-правовой формы или физическое лицо, нанимающее для трудовой деятельности лиц, подлежащих обязательно социальному страхованию от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний (работодатель);

– *страховщик* — Фонд социального страхования Российской Федерации.

Основными принципами обязательного социального страхования от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний являются:

– гарантированность права *застрахованных* на обеспечение по страхованию;

– экономическая заинтересованность субъектов страхования в улучшении условий и повышении безопасности труда, сниже-

нии производственного травматизма и профессиональной заболеваемости;

- обязательность регистрации в качестве страхователей всех лиц, нанимающих (привлекающих к труду) работников, подлежащих обязательному социальному страхованию от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;

- обязательность уплаты страхователем страховых взносов;

- дифференцированность страховых тарифов в зависимости от класса профессионального риска.

Обеспечение выплат по страхованию осуществляется:

- в виде пособия по временной нетрудоспособности;

- страховых выплат: единовременной страховой выплаты застрахованному либо лицам, имеющим право на получение такой выплаты в случае его смерти; ежемесячных страховых выплат застрахованному либо лицам, имеющим право на получение таких выплат в случае его смерти;

- в виде оплаты дополнительных расходов, связанных с повреждением здоровья застрахованного на его медицинскую, социальную и профессиональную реабилитацию.

Пособие по временной нетрудоспособности в связи с несчастным случаем на производстве или профессиональным заболеванием выплачивается за весь период временной нетрудоспособности застрахованного до его выздоровления или установления стойкой утраты профессиональной трудоспособности в размере 100 % его среднего заработка.

Размер *единовременной страховой выплаты* определяется в соответствии со степенью (процентом) утраты застрахованным потерпевшим профессиональной трудоспособности, установленным бюро медико-социальной экспертизы (бюро МСЭ). Размер выплаты определяется расчетным путем, по количеству процентов утраты трудоспособности (по справке бюро МСЭ), исходя из суммы, устанавливаемой Федеральным законом «О бюджете Фонда социального страхования» на соответствующий год. Сумма, из которой исчисляется размер единовременной страховой выплаты, установлена Федеральным законом от 30.11.2011 г. № 372-ФЗ «О бюджете Фонда социального страхования РФ на 2012 год и плановый период 2013—2014 гг.»: в 2013 г. — 76 699,8 руб., в 2014 г. — 80 534,8 руб.

С 2014 г. после внесения соответствующего изменения в Федеральный закон единовременная страховая выплата при смертельном случае составляет 1 млн руб. (Федеральный закон от 02.12.2013 г. № 331-ФЗ «О внесении изменений в статью 11 ФЗ «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний»).

Средства на осуществление обязательного социального страхования от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний формируются в Фонде социального страхования РФ за счет:

- обязательных страховых взносов страхователей;
- взыскиваемых штрафов и пени;
- капитализированных платежей, поступивших в случае ликвидации страхователей;
- иных поступлений, не противоречащих законодательству РФ.

Страховые тарифы, дифференцированные по группам отраслей (подотраслей) экономики в зависимости от класса профессионального риска, устанавливаются федеральным законом. Страховые взносы уплачиваются страхователем исходя из страхового тарифа с учетом скидки или надбавки (до 40 % тарифа), устанавливаемых страховщиком.

Расследованию несчастных случаев в установленном порядке подлежат события, в результате которых работниками или другими лицами, участвующими в производственной деятельности работодателя, были получены увечья или иные телесные повреждения (травмы), в том числе причиненные другими лицами, включая:

- тепловой удар;
- ожог;
- обморожение;
- утопление;
- поражение электрическим током (в том числе молнией);
- укусы и другие телесные повреждения, нанесенные животными и насекомыми;
- повреждения травматического характера, полученные в результате взрывов, аварий, разрушения зданий, сооружений и конструкций, стихийных бедствий и других чрезвычайных ситуаций;
- иные повреждения здоровья, обусловленные воздействием на пострадавшего опасных факторов, повлекшее за собой необходи-

мость его перевода на другую работу, временную или стойкую утрату им трудоспособности либо его смерть, происшедшие:

a — при непосредственном исполнении трудовых обязанностей или работ по заданию работодателя (его представителя), в том числе во время служебной командировки, а также при совершении иных правомерных действий в интересах работодателя, в том числе направленных на предотвращение несчастных случаев, аварий, катастроф и иных ситуаций чрезвычайного характера;

b — на территории организации, других объектах и площадях, закрепленных за организацией на правах владения либо аренды, либо в ином месте работы в течение рабочего времени (включая установленные перерывы), в том числе во время следования на рабочее место (с рабочего места), а также в течение времени, необходимого для приведения в порядок орудий производства, одежды и т.п. перед началом и после окончания работы, либо при выполнении работ за пределами нормальной продолжительности рабочего времени, в выходные и нерабочие праздничные дни;

c — при следовании к месту работы или с работы на транспортном средстве работодателя или сторонней организации, предоставившей его на основании договора с работодателем, а также на личном транспортном средстве в случае использования его в производственных целях в соответствии с документально оформленным соглашением сторон трудового договора или объективно подтвержденным распоряжением работодателя (его представителя) либо с его ведома;

d — во время служебных поездок на общественном транспорте, а также при следовании по заданию работодателя (его представителя) к месту выполнения работы и обратно, в том числе пешком;

e — при следовании к месту служебной командировки и обратно;

f — при следовании в транспортном средстве в качестве сменщика во время междусменного отдыха (водитель-сменщик на транспортном средстве, проводник или механик рефрижераторной секции в поезде, бригада почтового вагона и другие);

g — во время междусменного отдыха при работе вахтовым методом, а также при нахождении на судне (воздушном, морском, речном и др.) в свободное от вахты и судовых работ время;

h — при привлечении в установленном порядке к участию в ликвидации последствий катастроф, аварий и других чрезвычайных ситуаций природного, техногенного, криминогенного и иного характера.

Расследование несчастных случаев проводится комиссией по расследованию несчастных случаев, образуемыми и формируемыми в соответствии с положениями Федерального закона «Трудовой кодекс РФ» от 24.07.2002 г. № 97-ФЗ с последующими изменениями и дополнениями, раздел 10 «Охрана труда», статьи 227-231, а также действующего Положения об особенностях расследования несчастных случаев на производстве в отдельных отраслях и организациях, утвержденного Постановлением Минтруда России от 24.11.2002 г. № 73. В ОАО «РЖД» разработан локальный нормативный документ «Положение об особенностях организации расследования несчастных случаев на производстве в ОАО «РЖД» от 09.11.2012 г. № 2262Р.

Комиссия формируется из специалистов в зависимости от обстоятельств происшествия, количества пострадавших и характера полученных ими повреждений здоровья. Во всех случаях состав комиссии должен состоять из нечетного числа членов.

Расследование несчастных случаев, в результате которых пострадавшие получили повреждения, отнесенные в соответствии с установленными квалифицирующими признаками к *категории легких*, проводятся комиссиями, образуемыми работодателем (его полномочным представителем). Лица, осуществляющие (осуществлявшие) непосредственный контроль за работой пострадавшего, в состав комиссии не включаются.

По требованию пострадавшего (в случае его смерти — родственников пострадавшего) в расследовании несчастного случая может принимать участие его доверенное лицо, в противном случае работодатель обязан ознакомить его с материалами расследования.

Расследование обстоятельств и причин несчастного случая должно быть проведено в течение 3 суток с момента происшествия.

Расследование несчастных случаев, относящиеся в соответствии с установленными квалифицирующими признаками к *категории тяжелых*: групповые (два и более пострадавших), тяжелые и смертельные несчастные случаи расследуются в течение 15 дней. В этом случае расследование в организациях железнодорожного транспорта проводится комиссиями, формируемыми руководителем этих ор-

ганизаций и возглавляемыми государственным инспектором труда, осуществляющим надзор и контроль соблюдения трудового законодательства в данной организации, с обязательным участием руководителей соответствующих отраслевых органов государственного управления (их полномочных представителей) и представителей территориальных объединений отраслевого профсоюза. Продолжительность расследования может быть продлена председателем комиссии, но не более чем на 15 календарных дней.

При расследовании комиссия выявляет и опрашивает очевидцев и лиц, допустивших нарушения нормативных требований по охране труда, получает дополнительную информацию от работодателя и по возможности объяснения пострадавшего.

По требованию комиссии работодатель за счет средств организации обязан обеспечить:

- выполнение технических расчетов, лабораторных исследований, испытаний, других экспертных работ и привлечение в этих целях специалистов-экспертов;
- фотографирование места несчастного случая и поврежденных объектов;
- предоставление транспорта, служебного помещения, средств связи, специальной одежды, специальной обуви и других средств индивидуальной защиты, необходимых для проведения расследования.

Несчастные случаи, происшедшие в электроустановках, расследуются с учетом заключения Госэнергонадзора России по расследованию технических причин, приведших к аварии с несчастными случаями.

О каждом несчастном случае, происшедшем на производстве, пострадавший или очевидец несчастного случая извещает непосредственного руководителя работ, который обязан:

- немедленно организовать первую помощь пострадавшему и при необходимости доставку его в учреждение здравоохранения;
- сообщить работодателю или лицу им уполномоченному о происшедшем несчастном случае;
- принять неотложные меры по предотвращению развития аварийной ситуации и воздействия травмирующего фактора на других лиц;
- сохранить до начала расследования несчастного случая обстановку, какой она была на момент происшествия (если это не уг-

рожает жизни и здоровью других людей и не приведет к аварии). В случае невозможности ее сохранения — зафиксировать сложившуюся обстановку (схемы, фотографии и т.п.).

Работодатель или уполномоченное им лицо обязаны сообщить в течение суток по установленной форме о каждом групповом несчастном случае (2 и более человек), тяжелом несчастном случае (по схеме определения тяжести несчастных случаев на производстве, утвержденной Министерством здравоохранения РФ по согласованию с Министерством труда и социального развития РФ) и несчастном случае со смертельным исходом в следующие органы:

- государственную инспекцию труда по субъекту РФ (по железной дороге);
- прокуратуру по месту происшествия несчастного случая;
- орган исполнительной власти субъекта РФ;
- федеральный орган исполнительной власти по ведомственной принадлежности;
- организацию, направившую работника, с которым произошел несчастный случай;
- территориальное объединение профсоюзов;
- территориальный орган государственного социального страхования;
- территориальный орган Ростехнадзора РФ (Госэнергонадзор РФ), если несчастный случай произошел в электроустановке.

Результаты расследования каждого несчастного случая рассматриваются работодателями в целях разработки и реализации мер по их предупреждению, решения вопросов о возмещении вреда пострадавшим (членам их семей), предоставления им компенсаций и льгот.

Ответственность за организацию и своевременное расследование и учет несчастных случаев, разработку и реализацию мероприятий по устранению причин несчастных случаев несет работодатель.

Оформление результатов расследования осуществляется актом о несчастном случае на производстве по форме Н-1, в случаях с профессиональными спортсменами Н-1ПС, а в учебных заведениях по форме Н-2.

Акт о несчастном случае на производстве оформляется в 2 экземплярах на русском языке либо на русском языке и государственном языке субъекта РФ.

Акт о несчастном случае должен быть оформлен и подписан членами комиссии, утвержден работодателем и заверен печатью организации. Один экземпляр акта выдается пострадавшему (пострадавшим), его доверенным лицам или родственникам погибшего (погибших) по их требованию не позднее 3 дней после окончания расследования, один экземпляр хранится вместе с материалами расследования в организации по основному месту работы пострадавшего на момент несчастного случая в течение 45 лет.

Материалы расследования должны содержать:

- приказ о создании комиссии по расследованию несчастного случая;
- планы, эскизы, схемы, протокол осмотра, фото и видеоматериалы;
- документы, характеризующие рабочее место, наличие опасных и вредных производственных факторов;
- выписки из журналов регистрации инструктажей и других видов обучения;
- протоколы опросов очевидцев несчастного случая, должностных лиц, объяснения пострадавших;
- экспертные заключения специалистов, технические расчеты, лабораторные исследования и испытания;
- медицинское заключение о здоровье пострадавшего, включая о состоянии алкогольного, наркотического или иного токсического опьянения;
- копии документов о выдаче пострадавшему средств индивидуальной защиты;
- выписки из ранее выданных работодателю предписаний о нарушениях норм охраны труда и об их устранении;
- другие документы по усмотрению комиссии.

При групповом несчастном случае (НС) на производстве акт по форме Н-1 составляется на каждого пострадавшего отдельно.

Указанные материалы расследования вместе с актом по форме Н-1 в трехдневный срок после их оформления должны быть направлены работодателем в следующие органы:

- прокуратуру по месту, где произошел несчастный случай;
- государственную инспекцию труда по субъекту РФ;
- инспекцию Госэнергонадзора субъекта РФ, если несчастный случай произошел в электроустановке.

Экземпляр акта о групповом НС, тяжелом НС и со смертельным исходом вместе с копиями материалов расследования в трехдневный срок после представления работодателю направляются в прокуратуру.

Копии акта о НС с копиями материалов расследования направляются:

- в государственную инспекцию труда;
- в территориальный орган исполнительной власти;
- при НС на объектах, подконтрольных Ростехнадзору РФ, в территориальный орган Ростехнадзора РФ;
- в территориальный орган исполнительной власти;
- в объединение организаций профессиональных союзов.

Работодатель по окончании временной нетрудоспособности пострадавшего обязан направить в государственную инспекцию труда по субъекту РФ и в инспекцию Ростехнадзора РФ (Госэнергонадзор) субъекта РФ *сообщения* по установленным формам о последствиях несчастного случая на производстве, о решении прокуратуры по факту возбуждения уголовного дела или об отказе в нем и о мероприятиях, выполненных в целях предупреждения подобных несчастных случаев в дальнейшем.

Окончательным для работодателя и пострадавшего является заключение государственного инспектора по охране труда, которое может быть обжаловано в Федеральной инспекции труда при Министерстве труда РФ или в суде, при этом подача жалобы не является основанием для неисполнения работодателем решений государственного инспектора по охране труда.

3.4. Организация безопасной эксплуатации электроустановок

Эксплуатация электроустановок представляет собой процесс, который относится к процессам с источниками повышенной опасности, поскольку функционирование ЭУ связано с повышенной опасностью и для персонала, и для пользователей электроэнергии.

Источником повышенной опасности надлежит признавать любую деятельность, осуществление которой создает повышенную вероятность причинения вреда из-за невозможности полного контроля уровня опасности со стороны человека, а также деятельности по использованию, транспортировке, хранению предметов, веществ

и иных объектов производственного, хозяйственного и иного назначения, обладающих такими же свойствами.

Требования к персоналу, производящему работы в ЭУ, порядок и условия производства работ, организационные и технические мероприятия, обеспечивающие безопасность работ в электроустановках всех уровней напряжения определяются Правилами работы с персоналом в организациях электроэнергетики РФ (Приказ Министерства топлива и энергетики РФ от 19.02.2000 г. № 49, Минюст РФ № 2150), Правилами по охране труда при эксплуатации электроустановок и Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей (далее ПТЭ ЭП). В настоящее время на основе существующих Межотраслевых правил готовится к выпуску новая редакция Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок.

Основным нормативным правовым документом при организации эксплуатации электроустановок являются ПТЭ ЭП, в соответствии с которыми ответственным за безопасную эксплуатацию ЭУ является Потребитель (Руководитель Потребителя) и назначаемое им ответственное лицо из числа руководителей организации — ответственный за электрохозяйство или его заместитель.

В ПТЭ ЭП сформулированы обязанности Потребителя.

Потребители согласно ПТЭ ЭП — это все организации, независимо от форм собственности и организационно-правовых форм, индивидуальные предприниматели, а также граждане — владельцы электроустановок напряжением выше 1000 В. Руководителем Потребителя является владелец электроустановки или любое другое лицо, управляющее ЭУ на любых законных основаниях. Это может быть как юридическое лицо, так и физическое лицо (работодатель), например, руководитель структурного подразделения, в перечень обязанностей которого входит эксплуатация ЭУ.

В обязанности Потребителя входит содержание электроустановок в работоспособном состоянии и их эксплуатация в соответствии с требованиями ПТЭ ЭП, правил безопасности и других нормативно-технических документов (НТД), своевременное и качественное проведение технического обслуживания, планово-предупредительного ремонта, испытаний, модернизации и реконструкции электроустановок и электрооборудования.

Потребитель обязан осуществлять подбор электротехнического и электротехнологического персонала, проводить первичные и

периодические медицинские осмотры работников, проводить все виды инструктажей по безопасности труда, пожарной безопасности: вводный и первичный на рабочем месте при оформлении работника на работу, а в процессе трудовой деятельности — повторный, внеплановый и целевой инструктажи.

Периодическое обучение и проверка знаний электротехнического и электротехнологического персонала по правилам безопасности эксплуатации электроустановок проводится регулярно, для персонала непосредственно участвующего в ремонте и эксплуатации ЭУ не реже одного раза в год.

Потребитель обязан осуществлять регламентные проверки и ремонты электрооборудования для обеспечения надежности работы и безопасность эксплуатации ЭУ.

Охрана труда электротехнического и электротехнологического персонала достигается выполнением системы мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность персонала. К ним относятся:

- организационные мероприятия (организационные мероприятия перед производством работ в ЭУ, профессиональное обучение и аттестация, медицинские осмотры и отбор на профессию);
- технические мероприятия (технические мероприятия перед производством работ, соблюдение допустимых расстояний при приближении к частям, находящимся под напряжением, применение плакатов и знаков безопасности, применение индивидуальных средств защиты и предохранительных приспособлений);
- технические средства защиты (защитное зануление в низковольтных ЭУ, защитное заземление и выравнивание потенциалов, электрическая изоляция и ограждение электроустановок, защитное отключение электрических аппаратов, электрическое разделение электрических сетей, автоматическая сигнализация и устройство блокировок безопасности, применение малых напряжений);
- регламентные испытания и ремонты (межремонтные испытания электрооборудования, текущий и капитальный ремонты).

Необходимость охраны окружающей среды при эксплуатации ЭУ, как правило, возникает при эксплуатации организаций производителей электроэнергии (тепловых, атомных и гидравлических электростанций). Экологические проблемы тепловых (ТЭС) и атомных (АЭС) электростанций возникают при выбросе вредных веществ в окружающую среду при использовании технологий выра-

ботки электроэнергии, у гидравлических электростанций (ГЭС) — при регулировании водостока рек, особенно в режимах паводка, нарушающего естественный водный баланс в природной среде.

Электроустановки железнодорожного транспорта, исключая ЭУ тепловозов, не включают в себя организации производителей электроэнергии, поэтому основной экологической проблемой является проблема вредного воздействия электромагнитного поля на окружающую природную среду и человека. Научные разработки последних лет показывают, что такая проблема существует и особенно актуальным является проблема защиты персонала ЭУ железнодорожного транспорта от вредного воздействия ЭМП.

Большое место в работе Потребителя должно уделяться учету, анализу и расследованию нарушений в работе электроустановок, несчастных случаев, связанных с эксплуатацией электроустановок, и принятие мер по устранению причин их возникновения. Особенностью этой работы является информирование местных органов Ростехнадзора России об авариях, смертельных, тяжелых и групповых несчастных случаях, связанных с эксплуатацией электроустановок.

Потребитель осуществляет разработку должностных производственных инструкций и инструкций по охране труда для электротехнического персонала, приобретает и укомплектовывает ЭУ защитными средствами, средствами пожаротушения и инструментом.

В условиях рыночной экономики первостепенное место в обязанностях Потребителя занимает своевременный расчет с энергоснабжающей организацией за стоимость потребленной электроэнергии. В Федеральном законе РФ «Об электроэнергетике» от 26.03.2003 г. № 35-ФЗ (Статья 38. Гарантии надежного обеспечения потребителей электрической энергией) указывается:

«Запрещается ограничение режима потребления электроэнергии, в том числе его уровня, в отношении потребителей электроэнергии, не имеющих задолженности по оплате электроэнергии и исполняющих иные предусмотренные законодательством РФ и соглашением сторон обязательства». Это говорит о том, что любые потребители, кроме оговоренных в законе «Об электроэнергетике», любой категории по надежности электроснабжения могут отключаться энергоснабжающей организацией за неуплату стоимости потребленной электроэнергии.

Указанные обстоятельства накладывают на Потребителя ответственные обязанности по учету, рациональному расходованию

электроэнергии и проведению мероприятий по энергосбережению, проведению необходимых испытаний измерительных приборов и средств учета электрической энергии.

Потребитель обязан выполнять предписания органов государственного энергетического надзора.

Руководитель Потребителя для непосредственного выполнения обязанностей по организации эксплуатации электроустановок назначает соответствующим документом *ответственного за электрохозяйство* организации и его заместителя. При установленной мощности ЭУ до 10 кВ·А работник, замещающий обязанности ответственного за электрохозяйство организации, может не назначаться.

Ответственный за электрохозяйство и его заместитель назначаются из числа руководителей и специалистов Потребителя.

При наличии у Потребителя должности главного энергетика обязанности ответственного за электрохозяйство, как правило, возлагаются на него.

У Потребителей, не занимающихся производственной деятельностью, электрохозяйство которых включает в себя только *вводное устройство, осветительные установки, переносное электрооборудование* номинальным напряжением не выше 380 В, ответственный за электрохозяйство может не назначаться. В этом случае руководитель потребителя ответственность за безопасную эксплуатацию ЭУ может возложить на себя по письменному согласованию с местным органом Госэнергонадзора путем оформления соответствующего заявления-обязательства без проверки знаний руководителя по электробезопасности.

На лицо, назначенного ответственным за электрохозяйство организации, возлагаются следующие обязанности:

- организация разработки и ведения необходимой документации по вопросам организации эксплуатации ЭУ;
- организация обучения, инструктирования, проверки знаний и допуск к самостоятельной работе электротехнического персонала;
- организация безопасного проведения всех видов работ в электроустановках, в том числе с участием командированного персонала;
- обеспечение своевременного и качественного выполнения технического обслуживания, планово-предупредительных ремонтов и профилактических испытаний ЭУ;
- организация проведения расчетов потребности Потребителя в электроэнергии и осуществления контроля за ее расходом;

- участие в разработке и внедрении мероприятий по рациональному потреблению электроэнергии;
- контроль наличия, своевременности проверок и испытаний средств защиты в ЭУ, средств пожаротушения и инструмента;
- обеспечение установленного порядка допуска в эксплуатацию и подключения новых и реконструированных электроустановок;
- организация оперативного обслуживания ЭУ и ликвидации аварийных ситуаций;
- обеспечение проверки соответствия схем электроснабжения фактическим эксплуатационным с отметкой на них о проверке (не реже 1 раза в 2 года);
- пересмотр инструкций и схем (не реже 1 раза в 3 года); контроль замеров показателей качества электроэнергии (не реже 1 раза в 2 года);
- повышение квалификации электротехнического персонала (не реже 1 раза в 5 лет);
- контроль правильности допуска персонала строительно-монтажных и специализированных организаций к работам в действующих ЭУ и в охранной зоне ЛЭП.

Организационные мероприятия перед производством работ. Работы в действующих электроустановках должны проводиться при условии организации работ и оформления:

- наряда-допуска;
- распоряжения;
- перечня работ, выполняемых в порядке текущей эксплуатации (в ЭУ до 1000 В, далее низковольтных ЭУ).

Не допускается самовольное проведение работ, а также расширение рабочих мест и объема задания, определенных нарядом или распоряжением.

Ремонты электрооборудования напряжением выше 1000 В (далее высоковольтных ЭУ), а также ремонт ВЛ независимо от их напряжения, как правило, должны выполняться по технологическим картам или проектам производства работ (ППР), а работа на токоведущих частях под напряжением в высоковольтных ЭУ при наличии ППР и в исключительных случаях.

В высоковольтных ЭУ работники из числа персонала, единолично обслуживающие электроустановки, или старшие по смене должны иметь группу по электробезопасности IV, остальные работники в смене — группу III. В низковольтных ЭУ работники из

числа оперативного персонала, обслуживающие электроустановки, должны иметь группу III.

Вид оперативного обслуживания ЭУ, число работников из числа оперативного персонала в смене определяется руководством организации и закрепляется соответствующим распоряжением.

Оперативные переключения должен выполнять оперативный или оперативно-ремонтный персонал, допущенный распорядительным документом руководителя организации. Для допускающих к работам по наряду-допуску и распоряжению наличие допуска на право выполнения оперативных переключений обязательно.

В ЭУ не допускается приближение людей, механизмов и грузоподъемных машин к находящимся под напряжением неогражденным токоведущим частям на расстояния менее указанных в табл. 3.8 значений.

Таблица 3.8

Допустимые расстояния до токоведущих частей, находящихся под напряжением

Напряжение, кВ		Расстояние от людей и применяемых ими инструментов и приспособлений, от временных ограждений, м	Расстояние от механизмов и грузоподъемных машин в рабочем и транспортном положениях, от стропов грузозахватных приспособлений и грузов, м
До 1	На ВЛ	0,6	1,0
	В остальных электроустановках	Не нормируется (без прикосновения)	1,0
1—35		0,6	1,0
60, 110		1,0	1,5
150		1,5	2,0
220		2,0	2,5
330		2,5	3,5
400, 500		3,5	4,5
750		5,0	6,0
800 (постоянный ток)		3,5	4,5
1150		8,0	10,0

Организационными мероприятиями перед производством работ, обеспечивающими безопасность работ в ЭУ, являются:

– оформление работ нарядом, распоряжением или перечнем работ, выполняемых в порядке текущей эксплуатации;

- допуск к работе;
- надзор во время работы;
- оформление перерыва в работе, перевода на другое место, окончание работы.

Наряд-допуск (наряд) — это задание на производство работы, оформленное на специальном бланке установленной формы и определяющее содержание, место работы, время ее начала и окончания, условия безопасного проведения, состав бригады и лиц, ответственных за безопасное выполнение работы.

В наряде указывается наименование электроустановок, что именно должно быть отключено, где установлены стационарные и переносные заземления, какие опасные места находятся вблизи места работ. Наличие в наряде-допуске условий безопасного проведения работ накладывает на него дополнительную функцию письменного инструктажа, в котором содержатся подписи всех членов бригады.

Распоряжение — это задание на производство работы, определяющее ее содержание, место, время, меры безопасности и лиц, которым поручено ее выполнение, с указанием группы по электробезопасности.

Распоряжение имеет разовый характер, срок его действия определяется продолжительностью рабочего дня исполнителей. При необходимости продолжения работы, при изменении условий работы или состава бригады распоряжение должно отдаваться заново.

Небольшие по объему виды работ, выполняемые в течение рабочей смены и разрешенные к производству *в порядке текущей эксплуатации*, должны содержаться в заранее разработанном и подписанном техническим руководителем или ответственным за электрохозяйство, утвержденном руководителем организации документе — *перечне работ*. При этом должны быть соблюдены следующие требования:

- работа в порядке текущей эксплуатации (перечень работ) распространяется только на низковольтные ЭУ;
- работа выполняется силами оперативного или оперативно-ремонтного персонала на закрепленном за этим персоналом оборудовании, участке.

Виды работ, выполняемые в порядке текущей эксплуатации, перечислены в Правилах.

Ответственными за безопасное ведение работ в ЭУ являются:

- выдающий наряд, отдающий распоряжение, утверждающий перечень работ, выполняемых в порядке текущей эксплуатации;
- выдающий разрешение на подготовку рабочего места и на допуск в случаях, определенных Правилами;
- ответственный руководитель работ;
- допускающий;
- производитель работ;
- наблюдающий;
- члены бригады.

Выдающий наряд, отдающий распоряжение, определяет необходимость и возможность безопасного выполнения работы. Он отвечает за достаточность и правильность указанных в наряде (распоряжении) мер безопасности, за качественный и количественный состав бригады и назначение ответственных за безопасность, а также за соответствие выполняемой работе групп перечисленных в наряде работников.

Право выдачи нарядов и распоряжений предоставляется работникам из числа административно-технического персонала организации, имеющим группу V — в высоковольтных ЭУ и группу IV — в низковольтных ЭУ.

В случае отсутствия работников, имеющих право выдачи нарядов, при работах по предотвращению аварий или ликвидации их последствий допускается выдача нарядов и распоряжений работниками из числа оперативного персонала, имеющими группу IV (по приказу энергодиспетчера). Это право должно быть оформлено письменным указанием руководителя организации.

Работник, выдающий разрешение на подготовку рабочих мест и на допуск к работам в электроустановках, — новый субъект ответственности, установленный Правилами с 2014 года. Этот работник отвечает: за выдачу команд по отключению и заземлению оборудования и получению подтверждения их выполнения, а также за самостоятельные действия по отключению и заземлению оборудования в соответствии с мероприятиями по подготовке рабочего места, определенными нарядом (распоряжением) с учетом фактической схемы электроустановок и электрической сети; за возможность безопасного осуществления отключения, включения и заземления оборудования, находящегося в его управлении; за координацию

времени и места допускаемых к работам в электроустановках бригад, в том числе учет бригад, получение информации от всех допущенных к работам в электроустановках бригад (допускающих) о полном окончании работ и возможности включения электроустановки в работу; за правильность данных команд, самостоятельных действий по включению коммутационных аппаратов в части исключения подачи напряжения на рабочие места допущенных бригад.

В ЭУ железнодорожного транспорта таким работником является энергодиспетчер района дороги или всей дороги.

Ответственный руководитель работ назначается, как правило, при работах в высоковольтных ЭУ, в низковольтных ЭУ ответственный руководитель может не назначаться. Ответственный руководитель работ отвечает за выполнение всех указанных в наряде мер безопасности и их достаточность, за принимаемые им дополнительные меры безопасности, за полноту и качество целевого инструктажа бригады, в том числе проводимого допускающим и производителем работ, а также за организацию безопасного ведения работ.

Ответственный руководитель назначается при выполнении работ, перечень которых установлен в Межотраслевых правилах. Необходимость назначения ответственного руководителя работ определяет выдающий наряд.

Ответственными руководителями работ назначаются работники из числа административно-технического персонала, имеющие группу V.

Допускающий отвечает за правильность и достаточность принятых мер безопасности и соответствие их мерам, указанным в наряде, характеру и месту работы, за правильный допуск к работе, а также за полноту и качество проводимого им инструктажа членов бригады.

Производитель работ отвечает:

- за соответствие подготовленного рабочего места указаниям наряда, дополнительные меры безопасности, необходимые по условиям выполнения работ;
- четкость и полноту инструктажа членов бригады;
- наличие, исправность и правильное применение необходимых средств защиты, инструмента, инвентаря и приспособлений;
- сохранность на рабочем месте ограждений, плакатов, заземлений, запирающих устройств;

– безопасное проведение работы и соблюдение Межотраслевых правил им самим и членами бригады;

– осуществление постоянного контроля членов бригады.

Производитель работ, выполняемых по наряду, в высоковольтных ЭУ должен иметь группу IV, а в низковольтных ЭУ — группу III, кроме случаев, оговоренных в Межотраслевых правилах. Производитель работ, выполняемых по распоряжению, может иметь группу III при работе во всех ЭУ, кроме случаев, оговоренных в Правилах.

Допускается одно из совмещений обязанностей ответственных за безопасное ведение работ в соответствии с табл. 3.9.

Таблица 3.9

Дополнительные обязанности работников, ответственных за безопасное ведение работ

Ответственный работник	Одна из дополнительных обязанностей
Выдающий наряд, отдающий распоряжение	Ответственный руководитель работ, производитель работ, допускающий (в ЭУ, не имеющих местного оперативного персонала)
Ответственный руководитель работ	Производитель работ, допускающий (в ЭУ, не имеющих местного оперативного персонала)
Производитель работ из числа оперативного и оперативно-ремонтного персонала	Допускающий (в ЭУ с простой и наглядной схемой)
Производитель работ, имеющий группу IV	Допускающий (в случаях, предусмотренных в Правилах при обслуживании устройств релейной защиты, автоматики)

Наблюдающий должен назначаться для надзора за бригадами, не имеющими права самостоятельной работы в электроустановках. Наблюдающий отвечает:

– за соответствие подготовленного рабочего места указаниям, предусмотренным в наряде;

– наличие и сохранность установленных на рабочем месте заземлений, ограждений, плакатов и знаков безопасности, запирающих устройств приводов;

– безопасность членов бригады в отношении поражения электрическим током ЭУ.

Наблюдающим лицом может назначаться работник, имеющий группу III.

Член бригады во время работы несет ответственность:

- за соблюдение требований Межотраслевых правил и инструктивных указаний, полученных при допуске к работе, а также требований инструкций и Правил по охране труда соответствующих организаций;

- правильное применение коллективных и индивидуальных средств защиты;

- своевременную информацию руководителя работ (производителя работ или ответственного руководителя) о ситуациях, которые создают угрозу жизни и здоровью людей.

Предоставление работникам прав: выдающего наряд, распоряжение; допускающего, ответственного руководителя работ; производителя работ (наблюдающего), а также права единоличного осмотра оформляется письменным указанием руководителя организации.

Технические мероприятия перед производством работ, обеспечивающие безопасность работ со снятием напряжения в электроустановках, необходимо выполнить при подготовке рабочего места в такой последовательности:

- произвести необходимые отключения и принять меры, препятствующие подаче напряжения на место работы вследствие ошибочного или самопроизвольного включения коммутационной аппаратуры;

- на приводах ручного и на ключах дистанционного управления коммутационных аппаратов должны быть вывешены запрещающие плакаты;

- проверено отсутствие напряжения на токоведущих частях, которые должны быть заземлены для защиты людей от поражения электрическим током;

- наложено заземление (включены заземляющие ножи, а там, где они отсутствуют, установлены переносные заземления);

- вывешены указательные плакаты «Заземлено», ограждены при необходимости рабочие места и оставшиеся под напряжением токоведущие части, вывешены предупреждающие и предписывающие плакаты.

При *подготовке рабочего места* должны быть отключены:

- токоведущие части, на которых будут проводиться работы;
- неогражденные токоведущие части, к которым возможно случайное приближение людей, механизмов и грузоподъемных машин на расстояние менее указанного в табл. 3.8;
- цепи управления и питания приводов, а также закрыты клапаны подачи воздуха в системы управления коммутационными аппаратами, сняты заводы пружин и грузов у приводов выключателей и разъединителей.

С точки зрения безопасности под отключением в высоковольтных ЭУ понимается: создание видимого разрыва электрической цепи, образованного отсоединением или снятием шин и проводов, отключением разъединителей, снятием предохранителей, а также отключением отделителей и выключателей нагрузки за исключением тех, у которых автоматическое включение осуществляется пружинами, установленными на самих аппаратах

Отключение должно осуществляться со всех сторон, откуда может быть подано напряжение, в том числе со всех присоединений со стороны низкого напряжения силовых трансформаторов и трансформаторов напряжения.

Мерами, препятствующими подаче напряжения к месту работы, являются: закрытие на механический замок приводов разъединителей или стационарных ограждений разъединителей; отключение цепей силового и оперативного тока коммутационных аппаратов, имеющих дистанционное управление; закрытие на замок клапана и выпуск сжатого воздуха на подводящем трубопроводе у пневматических приводов; у грузовых и пружинных приводов приведение в нерабочее положение включающего груза или включающей пружины.

Запрещающими плакатами в электроустановках являются: «Не включать! Работают люди», «Не включать! Работа на линии», «Не открывать! Работают люди», «Опасное электрическое поле. Без средств защиты проход запрещен», «Работа под напряжением. Повторно не включать».

На приводах (рукоятках приводов) коммутационных аппаратов с ручным управлением во избежание подачи напряжения на рабочее место должны быть вывешены плакаты «Не включать! Работают люди».

На клапанах, закрывающих доступ воздуха в пневматические приводы разъединителей, вывешивается плакат «Не открывать! Работают люди».

На приводах разъединителей, которыми отключена ВЛ или КЛ для работ, независимо от числа работающих бригад вывешивается один плакат «Не включать! Работа на линии».

Проверка отсутствия напряжения на токоведущих частях осуществляется с помощью переносных указателей напряжения. Указатель напряжения в высоковольтных ЭУ, как правило, состоит из собственно указателя и изолированной части в виде изолированной штанги. При применении указателя напряжения необходимо пользоваться *дополнительными защитными средствами*: диэлектрическими перчатками и диэлектрическими ботами.

Проверка отсутствия напряжения состоит из трех последовательных операций:

— касание указателем напряжения токоведущих частей, находящихся под напряжением, чем проверяется исправность указателя напряжения;

— касание указателем напряжения токоведущих частей, с которых снято напряжение, чем проверяется отсутствие на них напряжения;

— касание указателем напряжения токоведущих частей, находящихся под напряжением, чем вновь проверяется исправность указателя напряжения или отсутствие отказа за период проверки отсутствия напряжения.

Наложение переносных заземлений должно осуществляться предварительно к стационарному заземляющему устройству, а затем к отключенному оборудованию непосредственно после проверки отсутствия напряжения.

Установка и снятие переносных заземлений должны выполняться в диэлектрических перчатках с применением в высоковольтных ЭУ изолирующей штанги. Закреплять зажимы переносных заземлений следует этой же штангой или непосредственно руками в диэлектрических перчатках.

Предупреждающие плакаты («Осторожно! Электрическое напряжение», «Стой! Напряжение», «Не влезай! Убьет», «Испытание. Опасно для жизни», «Внимание! Опасное место», «Осторожно! Не-

габаритное место») служат для ограждения опасных мест, расположенных вблизи от места работ.

В ЭУ должны быть вывешены указательные плакаты «Заземлено» на приводах разъединителей, отделителей и выключателей нагрузки, при ошибочном включении которых может быть подано напряжение на заземленный участок ЭУ, и на ключах и кнопках дистанционного управления коммутационными аппаратами.

Предписывающие плакаты («Работать здесь», «Влезать здесь») предназначены для обозначения подготовленного места работ, чтобы выделить его по отношению к соседнему электрооборудованию, имеющему в электроустановках, как правило, идентичный вид.

Руководители, специалисты и работники несут персональную ответственность за нарушения, допущенные при эксплуатации ЭУ:

- руководитель Потребителя и лица, ответственные за электрохозяйство, — за невыполнение требований, предусмотренных Правилами и должностными инструкциями;

- работники, непосредственно обслуживающие электроустановки, — за нарушения, происшедшие по их вине, а также за неправильную ликвидацию ими нарушений в работе электроустановок на обслуживаемом участке;

- работники, проводящие ремонт оборудования, — за нарушения в работе, вызванные низким качеством ремонта;

- руководители и специалисты энергетической службы — за нарушения в работе электроустановок, происшедшие по их вине, а также из-за несвоевременного и неудовлетворительного технического обслуживания и невыполнения противоаварийных мероприятий;

- руководители и специалисты технологических служб — за нарушения в эксплуатации электротехнологического оборудования.

Для безопасной эксплуатации энергообъекта должны быть выполнены следующие основные условия, указанные в ПТЭ ЭП:

- укомплектован, обучен (с проверкой знаний) электротехнический и электротехнологический персонал;

- разработаны и утверждены эксплуатационные инструкции, инструкции по охране труда и оперативные схемы, техническая документация по учету и отчетности;

- подготовлены и испытаны защитные средства, инструмент, запасные части и материалы;

— введены в действие средства связи, сигнализации и пожаротушения, аварийного освещения и вентиляции.

Обязательными формами работы по повышению уровня квалификации персонала ЭУ являются:

— с *административно-техническим* персоналом — вводный и целевой инструктаж по охране труда, проверка знаний Правил безопасности, профессиональное дополнительное образование и повышение квалификации;

— с *оперативным и оперативно-ремонтным персоналами* — вводный, первичный, повторный, внеплановый и целевой инструктажи по охране труда, подготовка по новой должности (стажировка), проверка знаний Правил безопасности, дублирование, специальная подготовка, контрольные противоаварийные и противопожарные тренировки, профессиональное дополнительное образование для непрерывного повышения квалификации;

— с *ремонтным персоналом* — вводный, первичный, повторный, внеплановый и целевой инструктаж по охране труда, подготовка по новой должности (стажировка), проверка знаний Правил безопасности, профессиональное дополнительное образование для непрерывного повышения квалификации.

Основная техническая документация оперативного персонала ЭУ должна содержать:

- оперативную схему, а при необходимости и схему-макет. Для Потребителей, имеющих простую и наглядную схему электроснабжения, достаточно иметь однолинейную схему первичных электрических соединений, на которой не отмечается фактическое положение коммутационных аппаратов;

- оперативный журнал;
- журнал учета работ по нарядам и распоряжениям;
- журнал выдачи и возврата ключей от электроустановок;
- журнал релейной защиты, автоматики и телемеханики;
- журнал или картотека дефектов и неполадок на электрооборудовании;
- ведомости показаний контрольно-измерительных приборов и электросчетчиков;
- журнал учета электрооборудования;
- кабельный журнал;
- списки работников;

– имеющих право выполнения оперативных переключений, ведения оперативных переговоров, единоличного осмотра электроустановок и электротехнической части технологического оборудования;

– имеющих право отдавать распоряжения, выдавать наряды;

– наделенных правами допускающего, ответственного руководителя работ, производителя работ, наблюдающего;

– допущенных к проверке подземных сооружений на загазованность;

– подлежащих проверке знаний на право производства специальных работ в электроустановках

- списки ответственных работников энергоснабжающей организации и организаций-субабонентов, имеющих право вести оперативные переговоры;

- перечень оборудования, линий электропередачи, устройств релейной защиты и автоматики, находящихся в оперативном управлении на закрепленном участке;

- производственная инструкция по переключениям в электроустановках;

- бланки нарядов-допусков для работы в электроустановках;

- перечень работ, выполняемых в порядке текущей эксплуатации.

Дополнительная техническая документация, в некоторых случаях дублирующая основную, может содержаться на рабочих местах оперативного персонала структурных подразделений и включаться в местную оперативную документацию.

Глава 4. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРСОНАЛА

4.1. Изоляция и ограждение электроустановок, изолирующие защитные средства, двойная изоляция

Отделение человека от электроустановки с целью предотвращения его контакта с находящимися под напряжением частями ЭУ является техническим средством защиты человека от электрической травмы или средством электрической безопасности в широком смысле.

Изоляцию как систему мер, препятствующих контакту человека и частей ЭУ, находящихся под напряжением, можно разделить на отдельные технические решения, имеющие более узкую техническую направленность:

- *электрическая изоляция* ЭУ от корпусов и других конструктивных элементов, доступных прикосновению;
- *изолирующие защитные средства*, применяемые персоналом, при обслуживании ЭУ;
- применение *двойной электрической изоляции* ручного электроинструмента, приборов и оборудования, т.е. наличие дополнительной изоляции между корпусом электрического прибора и руками работающего на полное рабочее напряжение ЭУ;
- *ограждение* ЭУ от проникновения внутрь или прикосновения к частям, находящимся под напряжением.

Электрическая изоляция токоведущих частей и частей ЭУ, находящихся под напряжением, служит прежде всего для их нормальной работы. Так, провода ВЛ изолируются подвесными изоляторами от опорных конструкций, жилы КЛ изолируются друг от друга и земли или от специальных конструкций — кабельных каналов.

Изоляция электроустановок предотвращает протекание по земле и конструкциям токов, которые могут нарушить нормальную работу ЭУ и конструкций, находящихся в окружающем ЭУ пространстве. Электрическая изоляция таким образом защищает и человека,

находящегося вблизи от ЭУ, от возможного опасного или вредного воздействия электромагнитного поля токов высокого уровня.

Электрические свойства изоляции могут определяться следующими параметрами, характеризующими ее свойства:

- электрической прочностью — напряженностью электрического поля E , при которой происходит электрический пробой изоляции;

- удельным электрическим сопротивлением или величиной активного электрического сопротивления, определяющим активный ток утечки через изоляцию;

- тангенсом угла диэлектрических потерь (коэффициентом диэлектрических потерь в изоляции) $\operatorname{tg}\delta = I_a/I_C$,

где I_C — емкостный ток; I_a — активный ток, обусловленный диэлектрическими потерями в изоляции (ток смещения).

Для твердых и жидких диэлектриков коэффициент диэлектрических потерь лежит в пределах 0,01—0,03 и возрастает с ростом температуры и влажности.

Величина электрического сопротивления изоляции любых электроустановок нормируется, причем нормируемая величина сопротивления изоляции не может быть меньше приведенного в нормах значения в любое время года и при любых режимах работы ЭУ. Примеры нормируемых сопротивлений изоляции отдельных аппаратов и частей ЭУ приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

**Нормы сопротивления изоляции некоторых аппаратов и частей
низковольтных и высоковольтных ЭУ**

Наименование ЭУ и аппаратов	Напряжение мегаомметра, В	Сопротивление изоляции, МОм
1	2	3
Низковольтные ЭУ		
ЭУ на напряжение выше 12 В переменного и 36 В постоянного тока	100—1000	Не менее 0,5
Электрические аппараты на напряжение, В:		
до 42 В	100	Не менее 0,5
свыше 42 до 100	250	То же
свыше 100 до 380	500	» »
свыше 380	1000	» »

1	2	3
Ручной электроинструмент и переносные светильники со вспомогательным оборудованием, сварочные трансформаторы	500	Рабочая изоляция — 2, дополнительная — 5, усиленная — 7. В эксплуатации — 0,5 для изделий кл. II — 2 (см. п. 4.4, табл. 4.22)
Краны и лифты, силовые и осветительные электропроводки	1000	0,5
Каждое присоединение вторичных цепей и цепей питания приводов выключателей и разъединителей	500—1000	1
Шинки на щите управления (при отсоединенных цепях)	500—1000	10
Высоковольтные ЭУ		
Токоведущие части полупроводниковых преобразователей	2500	5
Каждый элемент подвесных и опорных многоэлементных изоляторов	2500	300
Проходные изоляторы	1000—2500	500

Для поддержания изоляции в исправном состоянии согласно нормам необходим *контроль изоляции* электроустановок, под которым понимаются специальные методы измерения величины сопротивления изоляции и испытания изоляции.

Существуют три вида контроля изоляции:

- периодические измерения сопротивления изоляции мегомметром (мегомметром), предназначенным для измерения сопротивления изоляции в диапазоне от 0 до миллионов Ом;
- испытания электрической прочности изоляции повышенным напряжением;
- применение измерительных схем постоянного контроля изоляции на основе релейных схем постоянного контроля изоляции, срабатывание которых сигнализирует об ухудшении состояния изоляции или защитном отключении ЭУ.

Измерение сопротивления изоляции мегомметром является наиболее распространенным методом. Существует большое многообразие стационарных и переносных мегомметров с питанием от сети

и автономного источника. Наиболее популярным является переносный мегомметр с питанием от электромеханического генератора, вращаемого от руки, принципиальная схема которого изображена на рис. 4.1.

Мегомметр состоит из генератора постоянного тока Γ , вращаемого от руки (в последних модификациях статического преобразователя), измерительного магнитоэлектрического логометра и добавочных электрических сопротивлений. Зажим Л прибора обозначает подключение к линии или оборудованию, уровень изоляции которых контролируется, а зажим З подсоединяется к «земле», относительно которого определяется сопротивление.

Электрический ток в катушке 1 логометра определяется напряжением генератора Γ , а в катушке 2 — в основном током через сопротивление изоляции. Показания логометра пропорциональны отношению протекающих по его катушкам токов.

При замкнутых зажимах Л и З и нормальной скорости вращения генератора, когда величины токов в обмотках 1 и 2 максимальные, стрелка логометра должна устанавливаться на начальной отметке шкалы — нуле. При разомкнутых зажимах Л и З и тех же условиях измерения, когда электрический ток протекает практически только по одной обмотке 1 , стрелка логометра должна устанавливаться на конечной отметке шкалы — знаке бесконечности (∞).

Прибор обычно имеет два предела измерения: мегаомы (МОм) и килоомы (кОм), изменение пределов измерения осуществляется с помощью переключения добавочных сопротивлений R_1 и R_2 .

В России выпускаются мегомметры различных модификаций, например, М1101, М4100 (ЭС 0202/1, ЭС 0202/1-Г, ЭС 0202/2,

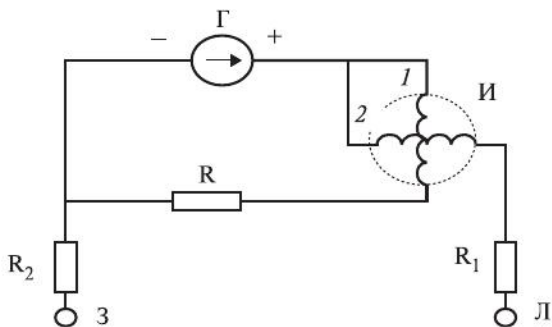


Рис. 4.1. Принципиальная электрическая схема мегомметра

Ф4102/1) на напряжение генератора 100, 500 и 1000 В и мегомметры МС-05 и МС-06 (ЭС 0202/2-Г, Ф4102/2) на напряжение 2500 В с возможностью измерения минимального электрического сопротивления изоляции до 10 кОм.

Измерения мегомметром позволяют определять только активное электрическое сопротивление изоляции и требуют, как правило, отключения объекта на время измерений. Исключение составляет возможность измерения активного сопротивления изоляции мегомметром в сетях до 1000 В с изолированной нейтралью под напряжением без отключения сети с выполнением соответствующих мер безопасности. В этом случае результат измерения дает электрическое сопротивление всех трех фаз сети по отношению к земле, т.е. полное активное сопротивление параллельно включенных фазных изолирующих элементов трехфазной сети:

$$R_{\Sigma} = \frac{R_a R_b R_c}{R_a R_b + R_a R_c + R_b R_c}.$$

Указанный метод измерения (рис. 4.2) основан на принципе наложения постоянного тока мегомметра на переменный ток сети.

Для постоянного тока емкость сети представляет бесконечно большое сопротивление, поэтому показания мегомметра дают только активную составляющую полного сопротивления сети по отношению к земле.

В практике эксплуатации, в частности при оценке электробезопасности сетей, требуется измерение сопротивления изоляции с учетом емкостного сопротивления. Наиболее точным методом измерения может служить метод холостого хода (ХХ) и к.з. или **метод амперметра и вольтметра**.

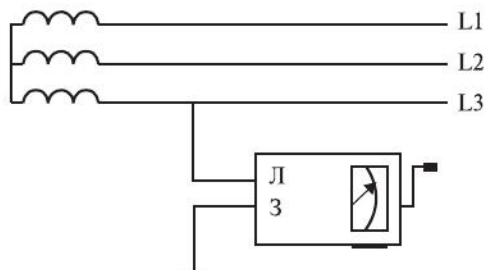


Рис. 4.2. Схема измерения сопротивления изоляции под напряжением в сетях с изолированной нейтралью

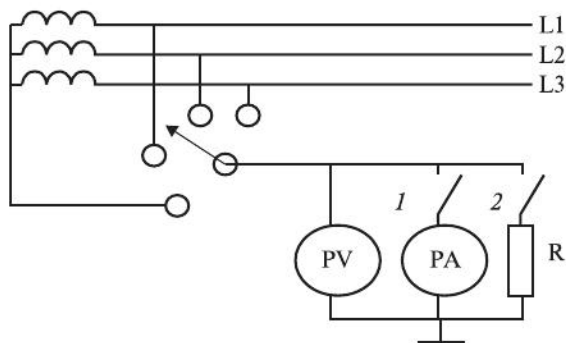


Рис. 4.3. Схема включения амперметра и вольтметра для измерения сопротивления изоляции

Для проведения измерения собирают измерительную схему, приведенную на рис. 4.3. Первоначально определяют полную проводимость всей сети относительно земли y_{Σ} , для чего используется метод ХХ и к.з. Для этого сначала измеряется напряжение между одной из фаз и «землей» U'_a (при отключенных разъединителях 1 и 2). Затем измеряется ток замыкания на землю этой фазы (на время измерения нейтраль питающего генератора, трансформатора изолируется от земли, а разъединитель 1 включен).

В результате измерений получим полную проводимость изоляции:

$$y_{\Sigma} = \frac{I_{a3}}{U'_a} = \sqrt{g_{\Sigma}^2 + b_{\Sigma}^2}, \quad (4.1)$$

где g_{Σ} , b_{Σ} — соответственно активная и реактивная проводимость изоляции, сим.

Для определения входящих в полученное выражение составляющих проводимости необходимо провести второй опыт, который проводится при включенном между фазой и землей, например, активного сопротивления R (проводимостью g), известного по величине, с помощью разъединителя 2. В этом случае изменится только измеряемое напряжение фазы относительно земли U''_a , а ток короткого замыкания останется практически неизменным:

$$y'_{\Sigma} = \frac{I_{a3}}{U''_a} = \sqrt{(g_{\Sigma} + g)^2 + b_{\Sigma}^2}. \quad (4.2)$$

Решая полученные в результате двух опытов два уравнения (4.1) и (4.2) совместно (два уравнения с двумя неизвестными), найдем

искомые величины проводимостей одной фазы относительно земли g_{Σ} и b_{Σ} .

При измерении электрического сопротивления изоляции сетей постоянного тока до 1000 В необходимо учитывать, что сопротивления отдельных проводов двухпроводной сети по отношению к земле R_+ (R_1) и R_- (R_2) оказываются включенными последовательно между собой, поэтому напряжения на них распределяются пропорционально сопротивлениям из очевидного соотношения

$$\frac{R_+}{U_+} = \frac{R_-}{U_-}.$$

По результатам измерения (рис. 4.4) напряжения «полюс сети—земля» можно составить следующую систему уравнений, в которой при определении полного электрического сопротивления между полюсом сети и землей учитывается электрическое сопротивление вольтметра r_V :

$$\left. \begin{aligned} \frac{R_1 r_V}{U_1 (R_1 + r_V)} &= \frac{R_2}{U - U_1} \\ \frac{R_2 r_V}{U_2 (R_2 + r_V)} &= \frac{R_1}{U - U_2} \end{aligned} \right\}. \quad (4.3)$$

Преобразуя систему уравнений (4.3), получим соотношения для определения электрических сопротивлений изоляции каждого из проводов (шин) двухпроводной сети постоянного тока через измеренные значения напряжений (U , U_1 , U_2) и известное сопротивление вольтметра (r_V):

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{U - (U_1 + U_2)}{U_2} r_V \\ R_2 &= \frac{U - (U_1 + U_2)}{U_1} r_V \end{aligned} \right\}, \quad (4.4)$$

где U — напряжение между полюсами (проводами, шинами), В; U_1 и U_2 напряжения «провод плюс—земля» и «провод минус—земля», В; r_V — внутреннее сопротивление вольтметра, Ом.

Используемый принцип измерения величины электрической изоляции в сетях до 1000 В постоянного тока широко используется

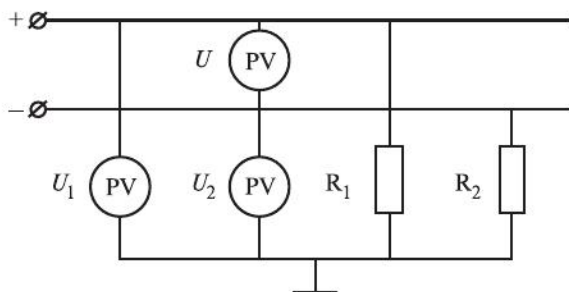


Рис. 4.4. Схема включения вольтметра для контроля изоляции сетей постоянного тока до 1000 В

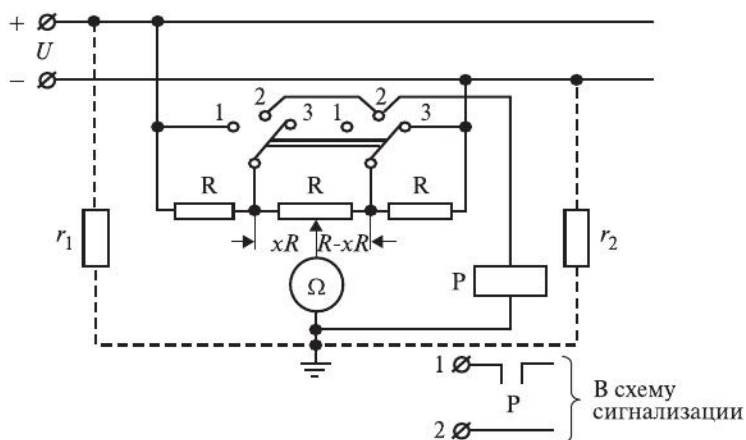


Рис. 4.5. Устройство контроля изоляции сети постоянного тока по схеме ОРГРЭС

в схеме постоянного контроля изоляции на шинах постоянного тока (схема ОРГРЭС по предложению инж. В.Е. Казанского, рис. 4.5).

В схеме используется потенциометр, состоящий из трех секций с равными сопротивлениями R , вольтметр, отградуированный в единицах сопротивления Ом, и переключатель на три положения. В крайних положениях переключателя (среднее положение используется в схеме постоянного контроля изоляции, работающей на сигнал при снижении изоляции одной из шин) шунтируется одна из крайних секций потенциометра, поэтому полное его сопротивление всегда равно $2R$. Можно показать, что вольтметр может быть отградуирован в единицах сопротивления Ом на основании зави-

симости сопротивления изоляции от сопротивления вольтметра и соотношения измеряемого напряжения и напряжения сети:

$$R_{\Sigma} = 0,5r_{\text{V}} \left(\frac{U}{U_{\text{V}}} - 2 \right).$$

В трехфазных сетях переменного тока **постоянный контроль состояния изоляции** осуществляется при помощи электрических схем фильтров токов и напряжений нулевой последовательности.

В сетях до 1000 В фильтрами нулевой последовательности являются так называемые асимметры — соединение в звезду трех равных по величине электрических сопротивлений, нулевая точка которого через измерительный прибор присоединяется к заземлению.

Миллиамперметр для измерения токов нулевой последовательности в схеме (рис. 4.6) может быть заменен вольтметром для измерения напряжения нулевой последовательности между искусственной нулевой точкой, созданной с помощью асимметра, и заземлением. Вольтметр может быть отградуирован в омах (МОм) и оценивать в сетях с изолированной нейтралью до 1000 В уровень электрического сопротивления изоляции.

В сетях до и выше 1000 В в качестве фильтров тока нулевой последовательности могут использоваться специальные соединения измерительных трансформаторов тока (рис. 4.7).

В сетях с изолированной нейтралью выше 1000 В для контроля величины электрической изоляции применяются фильтры напряжений нулевой последовательности в виде так называемой схемы трех вольтметров или измерение напряжения нулевой последова-

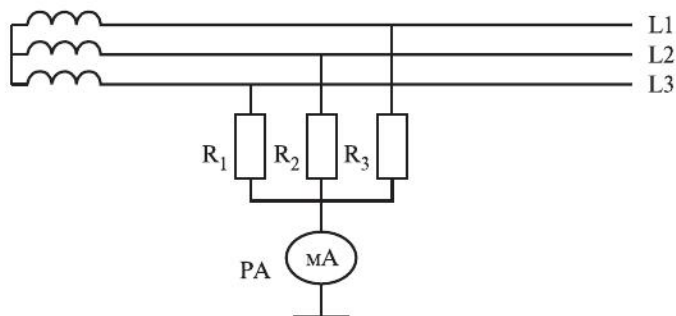


Рис. 4.6. Схема включения асимметра для измерения тока нулевой последовательности

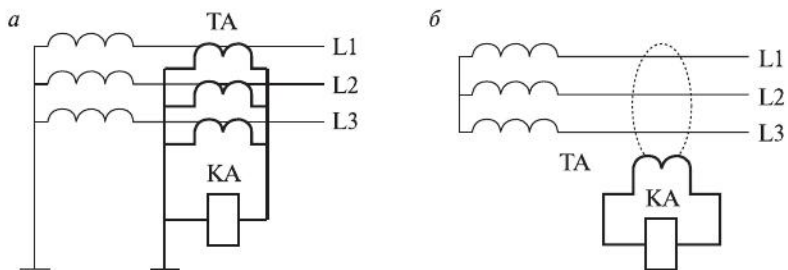


Рис. 4.7. Схемы включения трансформаторов тока в фильтры токов нулевой последовательности (ФТНП) в сетях с заземленной (а) и с изолированной (б) нейтралью

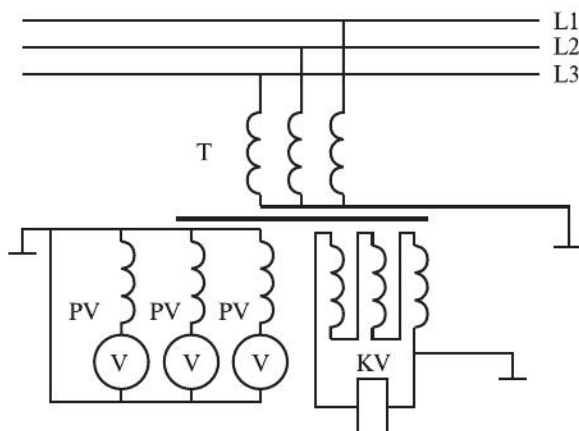


Рис. 4.8. Схемы фильтров напряжений нулевой последовательности (ФННП) в сетях выше 1000 В

тельности осуществляется при помощи схемы разомкнутого треугольника измерительного трансформатора напряжения (рис. 4.8).

Схемы фильтров токов и напряжений нулевой последовательности используются также для контроля изоляции в устройствах защитного отключения (УЗО), о чем подробно излагается в п. 4.3.7.

Испытание изоляции повышенным напряжением может осуществляться:

- установками переменного тока промышленной частоты;
- установками постоянного тока.

Испытания повышенным напряжением производятся для проверки наличия необходимого запаса электрической прочности изо-

ляции. Понижение электрической прочности вызывается местными дефектами и наличием посторонних включений, в том числе наличием влаги. Испытание повышенным напряжением является способом обнаружения в изоляции дефектов и гарантирует, что изоляция оборудования, прошедшего испытания, имеет нужный уровень прочности по отношению к перенапряжениям, возникающим в электрическом оборудовании в период эксплуатации. При выпуске с завода ЭУ их испытание повышенным напряжением на электрическую прочность изоляции является основным видом испытаний.

Испытательное напряжение должно прикладываться к изоляции в течение времени, достаточного для развития частичных разрядов или даже развития разряда до состояния пробоя. В то же время длительное приложение испытательного напряжения нежелательно, так как может привести к повреждению органической изоляции ионизационными процессами. Практика показала, что оптимальной продолжительностью испытания изоляции является испытание в течение 1 мин.

Изоляция считается выдержавшей испытания, если в процессе испытания отсутствуют разряды, отмечаемые на слух или по колебаниям стрелки вольтметра, измеряющего напряжение. При испытаниях должны отсутствовать видимые разряды электричества, а после испытаний изоляция не должна иметь местных нагревов.

Изоляция может характеризоваться также *поляризационным спадом тока* или нарастанием электрического сопротивления изоляции во времени. Это нарастание выражается отношением R_{60} / R_{15} , где R_{60} и R_{15} — электрические сопротивления изоляции, измеренные соответственно через 60 с и 15 с после начала испытания. Указанное отношение, называемое *коэффициентом абсорбции*, тем меньше, чем больше изоляция содержит посторонних включений, в частности, чем больше увлажнена изоляция. У влажной изоляции коэффициент абсорбции приближается к единице.

Испытание повышенным напряжением *постоянного тока* применяется для испытания изоляции объектов с большой емкостью (например, кабелей), требующих для испытания переменным током слишком большой мощности испытательных трансформаторов. Для постоянного тока емкостное сопротивление является бесконечно большим, поэтому по нему не протекает емкостной ток (ток смещения). Отсутствие емкостного тока препятствует развитию

частичных разрядов в изоляции, поэтому пробивное напряжение изоляции на выпрямленном токе существенно выше, чем на переменном. В силу этого испытательные напряжения выпрямленного тока повышаются по сравнению с испытательными напряжениями переменного тока, при этом можно вести контроль за состоянием изоляции путем измерения токов проводимости.

Испытание изоляции *повышенным напряжением* может осуществляться установками различной конструкции. На рис. 4.9 приведена электрическая схема и спецификация установки АИМ-80, представляющая собой включенные каскадом три трансформатора. Напряжение на аппарат для испытания изоляции на максимальное напряжение 80 кВ (АИМ-80) подается двухполюсным выключателем ВС от однофазной сети 220 В и регулируется с помощью низковольтного питающего трансформатора Тр1. Реле тока mA и киловольтметр kV, отградуированный с учетом коэффициента трансформации регулирующего автотрансформатора Тр2 и высоковольтного Тр3 на напряжение высоковольтной обмотки, установлены с низковольтной стороны.

Изолирующие защитные средства по степени надежности делятся на основные и дополнительные.

Основными называют такие изолирующие защитные средства, электрическая изоляция которых надежно выдерживает рабочее напряжение ЭУ и посредством которых допускается касание токоведущих частей, находящихся под напряжением. Изолирующие защитные средства, которые при данном напряжении не могут обеспечить надежную защиту от поражения током, называют *дополнительными*.

Основными изолирующими средствами в ЭУ выше 1000 В (высоковольтных электроустановках) являются оперативные и измерительные штанги, изолирующие и токоизмерительные клещи, указатели напряжения, изолирующие устройства и приспособления для ремонтных работ, например изолирующие площадки, изолирующие звенья телескопических вышек, вышки контактной сети.

Дополнительными изолирующими защитными средствами в установках выше 1000 В являются: диэлектрические перчатки, диэлектрические боты, диэлектрические резиновые коврики, изолирующие подставки.

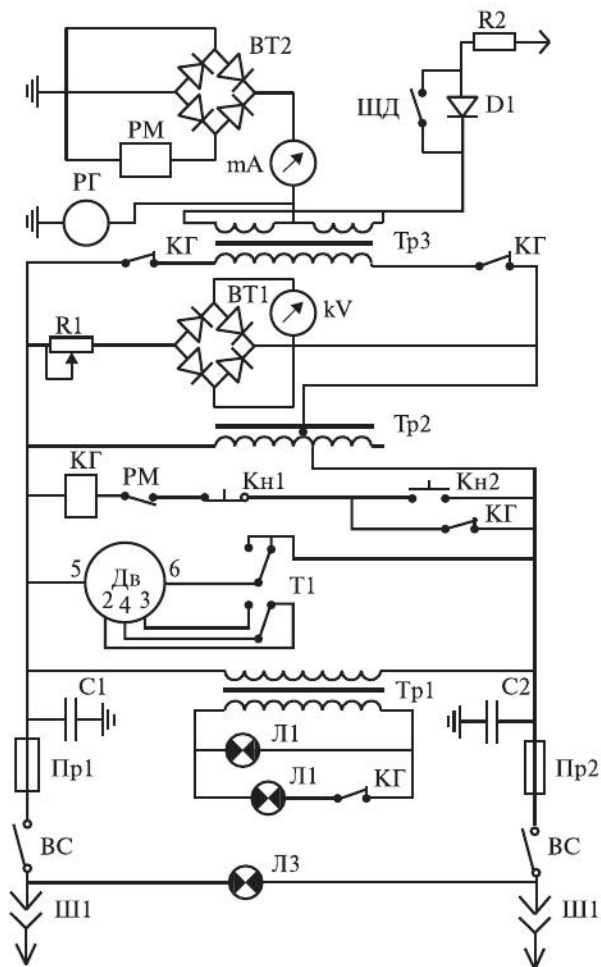


Рис. 4.9. Принципиальная схема испытательной установки АИМ-80:
 Л1, Л2, Л3 — лампы сигнального подсвета; kV, mA — приборы; R2 — гасящее сопротивление; ШД — шунт диодов; D1 — выпрямитель высоковольтный; РГ — разрядник газовый; Тр3 — трансформатор повышающий; BT1, BT2 — выпрямители; R1 — сопротивление переменное; Тр2 — автотрансформатор; Кн1, Кн2 — кнопки «стоп», «включение»; РМ — реле максимальное; КГ — контакт главный; Т1 — тумблер включения двигателя; Дв — электродвигатель вариатора; Тр1 — трансформатор питания ламп; С1, С2 — конденсаторы защиты; Пр1, Пр2 — предохранители; ВС — выключатель сети питания; Ш1 — штепсельный разъем

В электроустановках до 1000 В основными изолирующими защитными средствами являются: изолирующие штанги всех видов, изолирующие клещи, указатели напряжения, электроизмерительные клещи, диэлектрические перчатки, ручной изолирующий инструмент. Дополнительными защитными средствами в ЭУ до 1000 В являются диэлектрические галоши, диэлектрические ковры и изолирующие подставки, изолирующие колпаки, покрытия и накладки, лестницы приставные, стремянки изолирующие стеклопластиковые.

Основным изолирующим защитным средством от шагового напряжения на территории ЭУ до и выше 1000 В являются изолирующие галоши и боты.

Для обеспечения надежной работы изолирующих защитных средств они должны осматриваться перед каждым применением на предмет исправности и периодически испытываться высоким напряжением на электрическую прочность (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Нормы и сроки электрических эксплуатационных испытаний некоторых изолирующих индивидуальных средств защиты

Средства защиты	$U_{эу}$, кВ	$U_{исп}$, кВ	T , мин	I , мА, не более	Периодичность испытаний
1	2	3	4	5	6
Изолирующие штанги (кроме измерительных)	Ниже 110	Трехкратное линейное, но не менее 40 кВ	5	—	1 раз в 24 мес.
	110—500	Трехкратное фазное	5	—	1 раз в 24 мес.
Измерительные штанги	Ниже 110	Трехфазное линейное, но не менее 40 кВ	5	—	В сезон измерений (летнее время)
	110—500	Трехкратное фазное	5	—	1 раз в 3 мес., не реже 1 раза в 12 мес.
Указатели напряжения с газоразрядной лампой: изолирующая часть	2—35	Трехкратное линейное, но не менее 40 кВ	5	—	Один раз в 12 мес.
	35—220	Трехкратное фазное	5	—	

1	2	3	4	5	6
рабочая часть	2—10	20	1	—	Один раз в 12 мес.
	6—20	40	1	—	
	10—35	70	1	—	
напряжение зажигания	2—10	Не выше 0,55			Один раз в 12 мес.
	6—20	Не выше 1,5			
	10—35	Не выше 2,5			
	35—220	Не выше 9			
Резиновые диэлектрические перчатки	Все на- пряжения	6	1	6	1 раз в 6 мес.
Резиновые ди- электрические боты	То же	15	1	7,5	1 раз в 36 мес.
Слесарно-мон- тажный инстру- мент с изолиру- ющими рукоят- ками	До 1	2	1	—	1 раз в 12 мес.

Двойной изоляцией электроприемника называется совокупность рабочей и защитной (дополнительной) изоляции на полное напряжение ЭУ. При наличии дополнительной изоляции между доступными прикосновению частями электроприемника и руками работающего осуществляется защита от напряжения прикосновения при повреждении только рабочей или только защитной (дополнительной) изоляции.

Двойная изоляция применяется в обязательном порядке для любых переносных низковольтных электроприемников (электрический инструмент, бытовые и медицинские приборы).

В соответствии с Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) в России электрооборудование, токоведущие части, изоляторы, крепления, ограждения, несущие конструкции, изоляционные и другие конструктивные элементы должны располагаться и устанавливаться таким образом, чтобы:

— вызываемые нормальными условиями работы электроустановки усилия, нагрев, электрическая дуга или иные сопутствующие ее работе явления (искрение, выброс газов и т.п.) не могли причинить вред обслуживающему персоналу, а также привести к

повреждению оборудования и возникновению короткого замыкания (к.з.) или замыкания на землю;

– при нарушении нормальных условий работы ЭУ была обеспечена необходимая локализация повреждений, обусловленных действием к.з.;

– при снятом напряжении с какой-либо цепи, относящиеся к ней аппараты, токоведущие части и конструкции могли подвергаться безопасному техническому обслуживанию и ремонту без нарушения нормальной работы соседних цепей;

– была обеспечена возможность удобного транспортирования оборудования.

Ограждения. Сетчатые и смешанные ограждения токоведущих частей и электрооборудования должны иметь высоту над уровнем планировки для открытых распределительных устройств (ОРУ) и открыто установленных трансформаторов 2 или 1,6 м, а над уровнем пола для закрытых распределительных устройств (ЗРУ) и трансформаторов, установленных внутри здания, 1,9 м. Сетки должны иметь отверстия размером не более 25×25 мм, а также приспособления для запираания их на замок. Нижняя кромка этих ограждений в ОРУ должна располагаться на высоте 0,1–0,2 м, а в ЗРУ — на уровне пола.

Применение барьеров допускается при входе в камеры выключателей, трансформаторов и других аппаратов для их осмотра при наличии напряжения на токоведущих частях. Барьеры должны устанавливаться на высоте 1,2 м и быть съемными. При высоте пола камер над уровнем земли более 0,3 м необходимо оставить между дверью и барьером расстояние не менее 0,5 м или предусмотреть площадку перед дверью для осмотра.

Применение барьеров в качестве единственного вида ограждения токоведущих частей недопустимо.

Наименьшие расстояния от токоведущих частей и изоляторов, находящихся под напряжением, до постоянных внутренних ограждений должны быть (табл. 4.3, рис. 4.10):

– *по горизонтали* — не менее размера B при высоте ограждения 1,6 м и не менее размера $A_{\phi-3}$ при высоте ограждения 2,0 м. Второй вариант рекомендуется для применения в стесненных условиях площадки ПС;

– *по вертикали* — не менее размера $A_{\phi-3}$, отмеряемого в плоскости ограждения от точки, расположенной на высоте 2,7 м от земли.

Таблица 4.3

Наименьшие расстояния в свету от токоведущих частей до различных элементов ОРУ (подстанций) 10—750 кВ, защищенных разрядниками, и ОРУ 220—750 кВ (в знаменателе), защищенных ограничителями перенапряжений (рис. 4.10—4.17)

Номер рис.	Наименование расстояния	Обозначение	Изоляционное расстояние, мм, для номинального напряжения, кВ											
			до 10	20	35	110	150	220	330	500	750			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
4.10	От токоведущих частей, элементов оборудования и изоляции, находящихся под напряжением, до протяженных заземленных конструкций и до постоянных внутренних ограждений высотой не менее 2 м, а также до стационарных межчелюйковых экранов и противопожарных перегородок	A _{Ф-3}	200	300	400	900	1300	1800 1200	2500 2000	3750 3300	5500 5000			
4.16	Между токоведущими частями разных фаз	A _{Ф-Ф}	220	330	440	100	1400	2000 1600	2800 2200	4200 3400	8000 6500			
4.10, 4.12	От токоведущих частей, элементов оборудования и изоляции, находящихся под напряжением, до постоянных внутренних ограждений высотой до 1,6 м и до трансформируемого оборудования	Б	950	1050	1150	1650	2050	2550 2000	3250 3000	4500 4100	6300 5800			
4.13	Между токоведущими частями разных цепей в разных плоскостях при обслуживаемой нижней цепи и неотключенной верхней	В	960	1050	1150	1650	2050	3000 2400	4000 3500	5000 3950	7000 6000			

Окончание табл. 4.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4.11, 4.17	От неотраженных токоведущих частей до земли или до кровли зданий при наибольшем провисании проводов	Г	2900	3000	3100	3600	4000	4500 3900	5000 4700	6450 6000	8200 7200
4.13, 4.14	Между токоведущими частями разных цепей в разных плоскостях, а также между токоведущими частями разных цепей по горизонтали при обслуживании одной цепи и неотключенной другой	Д ¹	2200	2300	2400	2900	3300	3600 3200	4200 3800	5200 4700	7000 6500
4.15, 4.17	От токоведущих частей до верхней кромки внешнего забора или до здания и сооружения	Д	2200	2300	2400	2900	3300	3800 3200	4500 4000	5750 5300	7500 6500
4.16	От контакта и ножа разъединителя в отключенном положении до ошиновки, присоединенной ко второму контакту	Ж	240	365	485	1100	1550	2200 1800	3100 2600	4600 3800	7500 6100

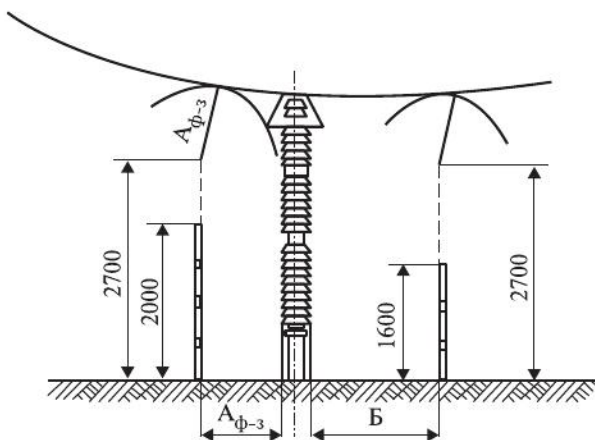


Рис. 4.10. Наименьшие расстояния от токоведущих частей и элементов изоляции, находящихся под напряжением, до постоянных внутренних ограждений

Токоведущие части (выводы, шины, спуски и т.п.) могут не иметь внутренних ограждений, если они расположены над уровнем планировки или наземных коммуникационных сооружений на высоте не менее значений, соответствующих размеру Γ по табл. 4.3 (рис. 4.11).

Трансформаторы и аппараты, у которых нижняя кромка фарфора (полимерного материала) изоляторов расположена над уровнем планировки или наземных коммуникационных сооружений на высоте не менее 2,5 м, разрешается не ограждать (см. рис. 4.11). При меньшей высоте оборудование должно иметь постоянные ограждения, удовлетворяющие указанным выше требованиям, располагаемые от трансформаторов и аппаратов на расстояниях не менее установленных.

Вместо постоянных ограждений допускается устройство козырьков, предотвращающих прикосновение обслуживающего персонала к изоляции и элементам оборудования, находящимся под напряжением.

Расстояния от неогражденных токоведущих частей до габаритов машин, механизмов и транспортируемого оборудования должны быть не менее размера B по табл. 4.3 (рис. 4.12).

Расстояния между ближайшими неогражденными токоведущими частями разных цепей должны выбираться из условия безопасного обслуживания одной цепи при неотключенной второй. При распо-

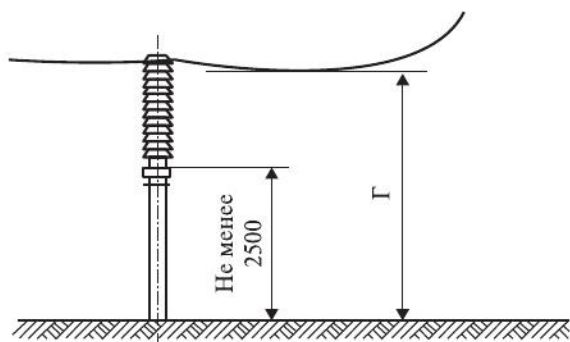


Рис. 4.11. Наименьшие расстояния от неогражденных токоведущих частей и от нижней кромки фарфора изоляторов до земли

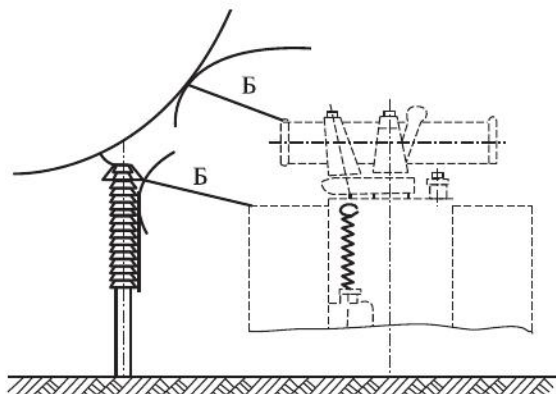


Рис. 4.12. Наименьшие расстояния от токоведущих частей до транспортируемого оборудования

ложении неогражденных токоведущих частей разных цепей в разных (параллельных или перпендикулярных) плоскостях расстояния по вертикали должны быть не менее размера B , а по горизонтали — размера D^1 по табл. 4.3 (рис. 4.13). При наличии разных напряжений размеры B и D^1 принимаются по более высокому напряжению.

Размер B определен из условия обслуживания нижней цепи при неотключенной верхней, а размер D^1 — обслуживания одной цепи при неотключенной другой (рис. 4.14).

Расстояния между токоведущими частями и верхней кромкой внешнего забора должны быть не менее размера D по табл. 4.3 (рис. 4.15).

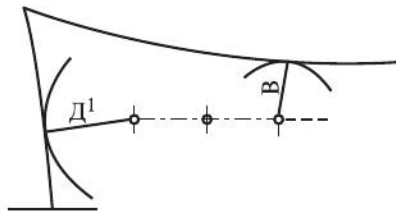


Рис. 4.13. Наименьшие расстояния между токоведущими частями разных цепей, расположенными в различных плоскостях с обслуживанием нижней цепи при неотключенной верхней

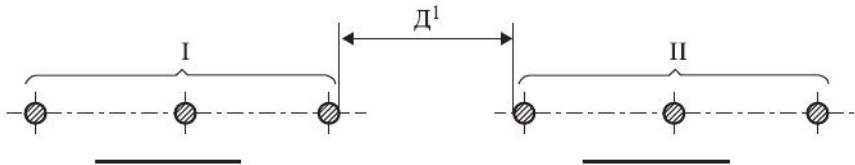


Рис. 4.14. Наименьшие расстояния по горизонтали между токоведущими частями разных цепей с обслуживанием одной цепи при неотключенной другой

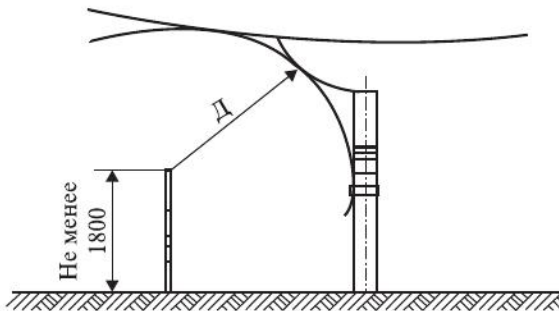


Рис. 4.15. Наименьшие расстояния от токоведущих частей до верхней кромки внешнего ограждения

Расстояния от подвижных контактов разъединителей в отключенном положении до заземленных частей должны быть не менее размеров $A_{\Phi-3}$ и $A^1_{\Phi-3}$; до ошиновки своей фазы, присоединенной ко второму контакту — не менее размера Ж; до ошиновки других присоединений — не менее размера $A_{\Phi-\Phi}$ по табл. 4.3 (рис. 4.16).

Расстояния между токоведущими частями ОРУ и зданиями или сооружениями (ЗРУ, помещение щита управления, трансформаторная башня и др.) по горизонтали должны быть не менее размера Д, а по вертикали при наибольшем провисании проводов — не менее размера Г по табл. 4.3 (рис. 4.17).

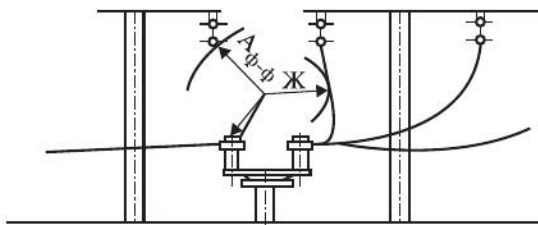


Рис. 4.16. Наименьшие расстояния от подвижных контактов разъединителей в отключенном положении до заземленных и токоведущих частей

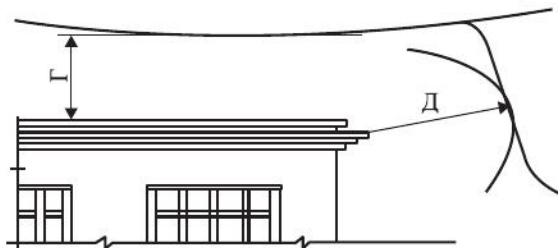


Рис. 4.17. Наименьшие расстояния между токоведущими частями и зданиями, сооружениями

Прокладка воздушных осветительных линий, воздушных линий связи и цепей сигнализации над и под токоведущими частями ОРУ не допускается.

Ограждающие устройства применяют для предохранения работников от случайного приближения на опасные расстояния к токоведущим частям, находящимся под напряжением, а также для преграждения входа на участки ЭУ. Неизолированные токоведущие части во избежание случайных прикосновений к ним должны быть помещены в камеры или ограждены.

Ограждение может быть сплошным или сетчатым. Во многих конструкциях закрытых распределительных устройств (ЗРУ) применяют смешанное ограждение — на сплошной части ограждения крепят приводы выключателей и разъединителей, а сетчатая часть ограждения позволяет наблюдать за оборудованием.

Расстояния в свету между неизолированными токоведущими частями разных фаз, от неизолированных токоведущих частей до заземленных конструкций и ограждений, пола и земли, а также между неогражденными токоведущими частями разных цепей в ЗРУ должны согласно ПУЭ быть не менее значений, приведенных в табл. 4.4 (рис. 4.18—4.21).

Таблица 4.4
Наименьшие расстояния в свету от токоведущих частей до различных элементов ЗРУ (подстанций) 3—330 кВ, защищенных разрядниками, и ЗРУ 110—330кВ (в знаменателе), защищенных ограничителями перенапряжений¹ (рис. 4.18—4.21)

Номер ри- сунка	Наименование расстояния	Обозна- чение	Изоляционное расстояние, мм, для номинального напряжения, кВ											
			3	6	10	20	35	110	150	220	330			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
4.18	От токоведущих частей до заземленных конструкций и частей зданий	A _{Ф-3}	65	90	120	180	290	700	1100	1700	2400			
4.18	Между проводниками разных фаз	A _{Ф-Ф}	70	100	130	200	320	800	1200	1800	2600			
4.20	От токоведущих частей до сплошных ограждений	Б	95	120	150	210	320	730	1130	1730	2430			
4.19	От токоведущих частей до сетчатых ограждений	В	165	190	220	280	390	800	1200	1800	2500			
4.19	Между неогражденными токоведущими частями разных цепей	Г	2000	2000	2000	2200	2200	2900	3300	3800	4600			
4.21	От неогражденных токоведущих частей до пола	Д	2500	2500	2500	2700	2700	3400	3700	4200	5000			
4.21	От неогражденных выводов из ЗРУ до земли при выходе их не на территорию ОРУ и при отсутствии проезда транспорта под выводами	Е	4500	4500	4500	4750	4750	5500	6000	6500	7200			
								5400	5700	6000	6800			

Окончание табл. 4.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4.19	От контакта и ножа разъединителя в отключенном положении до ошиновки, соединенной к второму контакту	Ж	80	110	150	220	350	<u>900</u> 850	<u>1300</u> 1150	<u>2000</u> 1800	<u>3000</u> 2500
—	От неогражденных кабельных выводов из ЗРУ до земли при выходе кабелей на опору или портал не на территории ОРУ и при отсутствии проезда транспорта под выворами	—	2500	2500	—	—	—	<u>3800</u> 3200	<u>4500</u> 4000	<u>5750</u> 5300	<u>7500</u> 6500

† Ограничители перенапряжений имеют защитный уровень коммутационных перенапряжений фаза—земля $1,8U_{\phi}$.

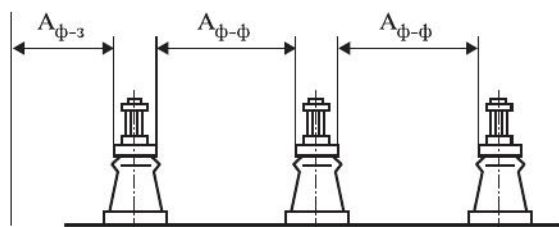


Рис. 4.18. Наименьшие расстояния в свету между неизолированными токоведущими частями разных фаз в ЗРУ и между ними и заземленными частями (по табл. 4.4)

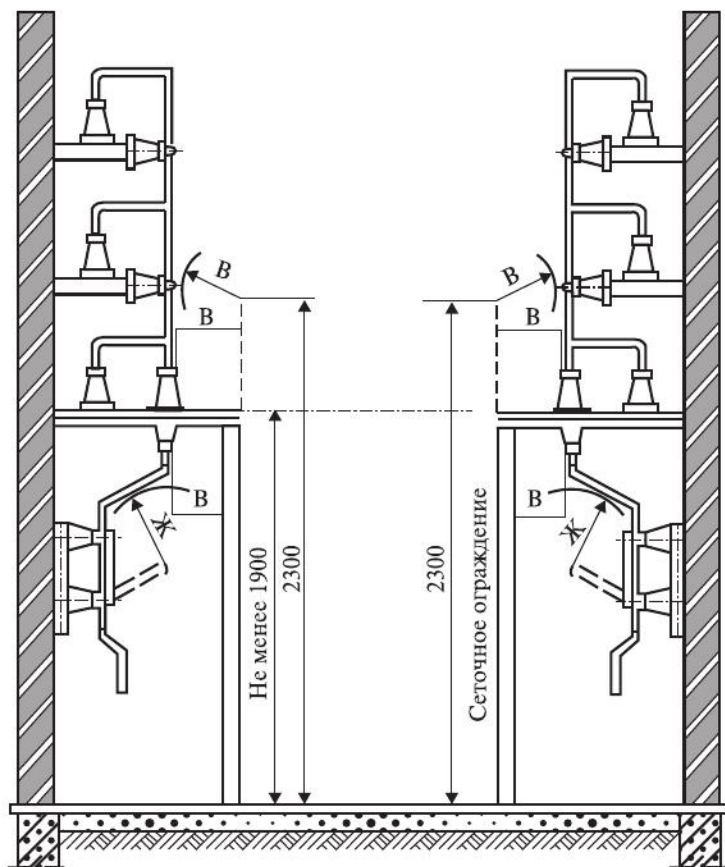


Рис. 4.19. Наименьшие расстояния между неизолированными токоведущими частями в ЗРУ и сплошными ограждениями (по табл. 4.4)

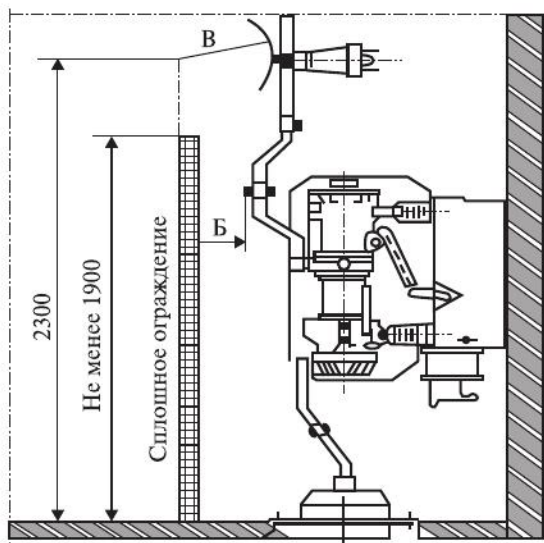


Рис. 4.20. Наименьшие расстояния от неизолированных токоведущих частей в ЗРУ до сетчатых ограждений (по табл. 4.4)

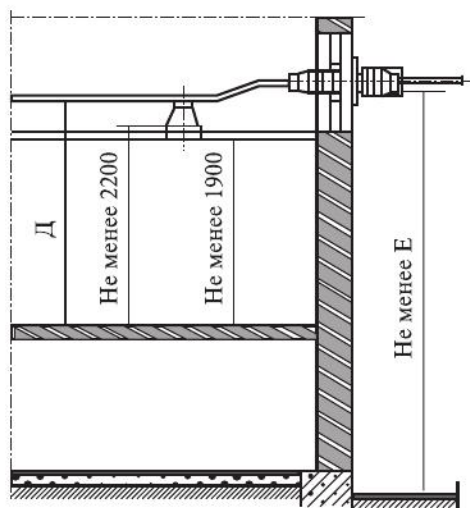


Рис. 4.21. Наименьшие расстояния от пола до неогражденных неизолированных токоведущих частей и до нижней кромки фарфора изолятора и высота прохода в ЗРУ. Наименьшее расстояние от земли до неогражденных линейных выводов из ЗРУ вне территории ОРУ и при отсутствии проезда транспорта под выводами

Расстояния от подвижных контактов разъединителей в отключенном положении до ошиновки своей фазы, присоединенной ко второму контакту, должно быть не менее размера Ж по табл. 4.4 (см. рис. 4.19).

Неизолированные токоведущие части должны быть защищены от случайных прикосновений (помещены в камеры, ограждены сетками и т.п.).

При размещении неизолированных токоведущих частей вне камер и расположении их ниже размера Д по табл. 4.4 от пола они должны быть ограждены. Высота прохода под ограждением должна быть не менее 1,9 м (см. рис. 4.21).

Токоведущие части, расположенные выше ограждений до высоты 2,3 м от пола, должны располагаться от плоскости ограждения на расстояниях, приведенных в табл. 4.4 для размера В (см. рис. 4.20).

Аппараты, у которых нижняя кромка фарфора (полимерного материала) изоляторов расположена над уровнем пола на высоте 2,2 м и более, разрешается не ограждать, если при этом выполнены приведенные выше требования.

Применение барьеров в огражденных камерах не допускается.

Неогражденные неизолированные токоведущие части различных цепей, находящиеся на высоте, превышающей размер Д по табл. 4.4, должны быть расположены на таком расстоянии одна от другой, чтобы после отключения какой-либо цепи (например, секции шин) было обеспечено ее безопасное обслуживание при наличии напряжения в соседних цепях. В частности, расстояние между неогражденными токоведущими частями, расположенными с двух сторон коридора обслуживания, должно соответствовать размеру Г по табл. 4.4 (см. рис. 4.19).

Ширина коридора обслуживания должна обеспечивать удобное обслуживание установки и перемещение оборудования, причем она должна быть не менее (считая в свету между ограждениями): 1 м — при одностороннем и 1,2 м — при двустороннем расположении оборудования.

В коридоре обслуживания, где находятся приводы выключателей или разъединителей, указанные выше размеры должны быть увеличены соответственно до 1,5 и 2 м. При длине коридора до 7 м допускается уменьшение ширины коридора при двустороннем обслуживании до 1,8 м.

Территория ОРУ и подстанции должны быть ограждены внешним забором высотой 1,8—2,0 м. Заборы высотой более 2 м могут

применяться в местах с высокими снежными заносами, а также для подстанций со специальным режимом допуска на их территорию.

Вспомогательные сооружения (мастерские, склады, пункты управления и т.п.), расположенные на территории ОРУ, следует огораживать внутренним забором высотой 1,6 м. При расположении ОРУ (подстанции) на территории электростанций они должны огораживаться внутренним забором высотой 1,6 м. Заборы могут быть сплошными, сетчатыми или решетчатыми.

На дверях и внутренних стенках камер ЗРУ, оборудовании ОРУ, лицевых и внутренних частях КРУ наружной и внутренней установки, сборках, а также на лицевой и оборотной сторонах панелей щитов должны быть выполнены надписи, указывающие назначение присоединений и их диспетчерское наименование. На дверях распределительных устройств должны быть вывешены или нанесены предупреждающие плакаты установленного образца.

В соответствии с нормами ПУЭ в России регламентируются основные расстояния при пересечениях и сближениях ВЛ с объектами железнодорожного транспорта, основные из которых приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Наименьшие расстояния при пересечении и сближении ВЛ с железными дорогами

Пересечение или сближение	Наименьшие расстояния, м, при напряжении ВЛ, кВ						
	До 20	35—100	150	220	330	500	750
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>При пересечении</i>							
Для неэлектрифицированных железных дорог							
От провода до головки рельса в нормальном режиме ВЛ по вертикали:							
железных дорог широкой и узкой колеи общего пользования	7,5	7,5	8	8,5	9	9,5	20
железных дорог широкой колеи необщего пользования	7,5	7,5	8	8,5	9	9,5	12
железных дорог узкой колеи необщего пользования	6,5	6,5	7	7,5	8	8,5	12
От провода до головки рельса при обрыве провода ВЛ в смежном пролете по вертикали:							
железных дорог широкой колеи	6	6	6,5	6,5	7	—	—
железных дорог узкой колеи	4,5	4,5	5	5	5,5	—	—

1	2	3	4	5	6	7	8
Для электрифицированных или подлежащих электрификации железных дорог							
От проводов ВЛ до наивысшего провода или несущего троса: в нормальном режиме по вертикали	Как при пересечении ВЛ между собой						
	1	1	2	2	2,5	3,5	—
<i>При сближении или параллельном следовании</i>							
Для неэлектрифицированных железных дорог на участках стесненной трассы от отклоненного провода ВЛ до габарита приближения строений по горизонтали	1,5	2,5	2,5	2,5	3,5	4,5	5,5

4.2. Защитные заземляющие устройства

4.2.1. Основные понятия о защитных функциях заземляющего устройства, термины и определения

Нетоковедущие металлические части конструкций электрических машин и аппаратов (трансформаторов, выключателей, блоков питания, двигателей, генераторов, светильников и т.п.) могут оказаться под напряжением электрической установки при повреждении изоляции токоведущих частей и замыкании их на корпус. При этом прикосновение человека к корпусу так же опасно, как и прикосновение к токоведущим частям ЭУ.

Для защиты человека от поражения электрическим током в этих случаях применяются различные технические средства защиты. Одним из наиболее эффективных технических средств является защитное заземление.

Защитное заземление — преднамеренное электрическое соединение с *заземляющим устройством* частей электроустановки с целью обеспечения *электробезопасности*.

Защитное заземление следует отличать от *рабочего заземления*, т.е. заземления какой-либо точки токоведущих частей ЭУ, необходимое для обеспечения работы электроустановки (например, нейтральные точки генераторов, трансформаторов, заземляющий вывод разрядника, отсасывающие или заземляющие фидеры тяговых подстанций и т.п.). По рабочему заземлению постоянно или вре-

менно протекает ток рабочего режима электроустановки. Рабочее заземление предназначено для обеспечения надлежащей работы электроустановок в нормальных и аварийных режимах и является элементом конструкции электроустановки.

Назначение защитного заземления — устранение опасности поражения людей электрическим током при появлении напряжения на частях конструкции электроустановок, доступных прикосновению, как правило, в режиме замыкания электрической установки на корпус при повреждении ее изоляции. Для этого между корпусом электроустановки и землей создается электрическое соединение с достаточно малым сопротивлением R . Если человек коснется корпуса, на который произошло к.з. одной из фаз, то образуется электрическая цепь от поврежденной фазы и корпуса на землю и далее к другим фазам через сопротивления изоляции неповрежденных проводов (рис. 4.22).

На рис. 4.23 показано условное направление токов для одной полуволны синусоидального переменного тока. При наличии защитного заземления ток замыкания проходит по двум параллельным включенным сопротивлениям: сопротивлению заземляющего устройства R и сопротивлению человека $R_{\text{ч}}$. Токи в параллельных цепях распределяются обратно пропорционально электрическим сопротивлениям. Поэтому при наличии малого электрического сопротивления заземляющего устройства (ЗУ) по сравнению с электрическим сопротивлением человеческого тела (сопротивление те-

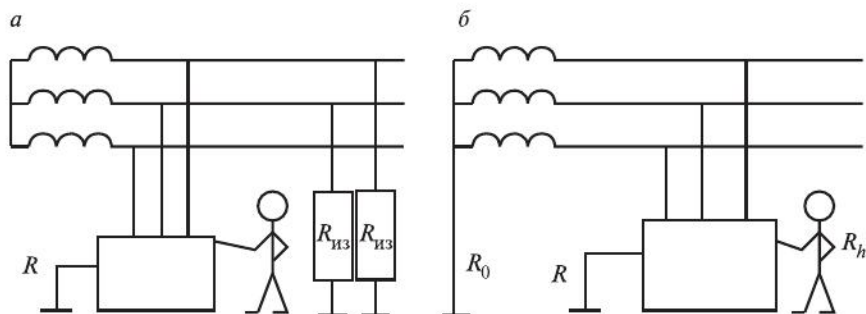


Рис. 4.22. Принципиальные схемы защитного заземления:
а — в сети с изолированной нейтралью до 1 кВ и выше; *б* — в сети с эффективно заземленной нейтралью выше 1 кВ

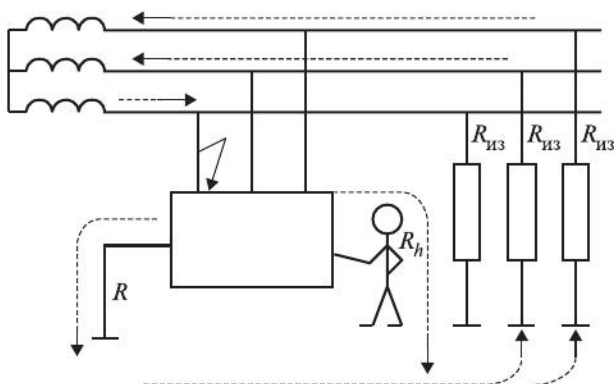


Рис. 4.23. Схема включения человека в цепь замыкания на землю при прикосновении к корпусу электроустановки в сети с изолированной нейтралью

ла человека зависит от многих факторов, в качестве расчетного значения часто принимается величина $R_h = 1000 \text{ Ом}$) часть тока, проходящая через тело человека, будет мала и безопасна для его здоровья.

Отсюда следует вывод о том, что для обеспечения безопасности пригодно не всякое соединение с «землей», а только соединение, имеющее достаточно малое электрическое сопротивление.

Принцип действия защитного заземления — снижение до безопасных значений напряжения прикосновения и шага, обусловленных режимом замыкания ЭУ на корпус при нарушении электрической изоляции. Это достигается уменьшением потенциала заземленных корпусов оборудования при замыкании на него электрической части установки и выравниванием потенциалов между основанием, на котором располагается человек, и корпусом оборудования до величины разности потенциалов, безопасной для человека.

Области применения защитного заземления:

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

Применяются некоторые общепринятые термины, имеющие следующие определения:

– *замыканием на землю* называется случайное соединение находящихся под напряжением частей электроустановки с их конструктивными частями, не изолированными от земли, или непосредственно с землей;

– *замыканием на корпус* называется случайное соединение находящихся под напряжением частей электроустановки с их конструктивными частями, нормально не находящимися под напряжением;

– *заземляющим устройством (ЗУ)* называется совокупность заземлителя и заземляющих проводников;

– *заземлителем* называется проводник (электрод) или совокупность металлических соединенных между собой проводников (электродов), находящихся в соприкосновении с землей;

– *заземляющим проводником* называется проводник, соединяющий заземляемые части с заземлителем;

– *искусственным заземлителем* называется заземлитель, специально выполненный для целей заземления;

– *естественным заземлителем* называются находящиеся в соприкосновении с землей электропроводящие части коммуникаций, зданий и сооружений производственного или иного назначения, используемые для целей заземления;

– *сопротивлением ЗУ* называется отношение напряжения на ЗУ к току, стекающему с заземлителя в землю;

– *магистралью заземления* называется заземляющий проводник с двумя или более ответвлениями;

– *занулением в электроустановках напряжением до 1 кВ* называется преднамеренное соединение частей ЭУ, нормально не находящихся под напряжением, с глухозаземленной нейтралью генератора или трансформатора в сетях трехфазного тока, с глухозаземленным выводом источника однофазного тока, с глухозаземленной средней точкой источника в сетях постоянного тока.

4.2.2. Нормирование величины сопротивления заземляющих устройств

Сопротивление заземляющего устройства (ЗУ) является основным параметром, характеризующим его защитные свойства, и нормируется в ПУЭ в зависимости от режима нейтрали электрической сети и величины напряжения электроустановки (до 1000 В и выше 1000 В). Эти значения приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Наибольшие допустимые значения сопротивлений заземляющих устройств

Вид электроустановки	Характеристика заземляющего устройства электроустановки	Сопротивление, Ом
Подстанции и распределительные пункты напряжением выше 1000 В	Электроустановки электрических сетей с глухозаземленной и эффективно заземленной нейтралью	0,5
	Электроустановки электрических сетей с изолированной нейтралью, с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор или резистор	$250/I_p$, но не более 10 Ом, I_p — расчетный ток замыкания на землю
Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1000 В	Заземляющие устройства опор ВЛ при удельном сопротивлении грунта, ρ , Ом·м: до 100 более 100 до 500 более 500 до 1000 более 1000 до 5000 более 5000	10 15 20 30 $\rho \cdot 6 \cdot 10^{-3}$
	Заземляющие устройства опор ВЛ с разрядниками на подходах к распределительным устройствам с вращающимися машинами	см. главу 4.2 ПУЭ
Электроустановки напряжением до 1 кВ	Электроустановки с источниками питания в электрических сетях с глухозаземленной нейтралью (или средней точкой) источника питания (система TN): в непосредственной близости от нейтрали с учетом естественных заземлителей и повторных заземлителей отходящих линий	$U_{\text{лин}} = 660/380/220$ 15/30/60 2/4/8
	Электроустановки в электрических сетях с изолированной нейтралью (или средней точкой) источника питания (система IT)	$50/I$, требуется не более 4 Ом, I — полный ток замыкания на землю
Воздушные линии электропередачи напряжением до 1 кВ	Повторные заземляющие устройства нулевого PEN (PE)-проводника на опорах ВЛ	30

Заземление или зануление электроустановок следует выполнять:
— при напряжении 380 В и выше переменного тока и 440 В и выше постоянного тока — во всех электроустановках;

– при номинальных напряжениях выше 42 В, но ниже 380 В переменного тока и выше 110 В, но ниже 440 В постоянного тока — только в помещениях с повышенной опасностью, особо опасных и в наружных установках.

К частям, *подлежащим заземлению*, относятся:

– корпуса электрических машин, трансформаторов, аппаратов, светильников и т.п.;

– приводы электрических аппаратов;

– вторичные обмотки измерительных трансформаторов;

– каркасы распределительных щитов, щитов управления, щитков и шкафов, а также съемные или открывающиеся части, если на последних установлено электрооборудование напряжением выше 42 В переменного или более 110 В постоянного тока;

– металлические конструкции распределительных устройств, металлические кабельные конструкции, металлические кабельные соединительные муфты, металлические оболочки и броню контрольных и силовых кабелей, металлические оболочки проводов, металлические рукава и трубы электропроводки, кожухи и опорные конструкции шинопроводов, лотки, короба, струны, тросы и стальные полосы, на которых укреплены кабели и провода (кроме струн, тросов и полос, по которым проложены кабели с заземленной или зануленной металлической оболочкой или броней), а также другие металлические конструкции, на которых устанавливается электрооборудование;

– металлические оболочки и броню контрольных и силовых кабелей и проводов до 42 В переменного тока и до 110 В постоянного тока, проложенных на общих металлических конструкциях, в том числе в общих трубах, коробах, лотках и т.п. вместе с кабелями и проводами, металлические оболочки и броня которых подлежат заземлению и занулению;

– металлические корпуса переносных электроприемников;

– электрооборудование, размещенное на движущихся частях станков, машин и механизмов.

В качестве *естественных заземлителей* рекомендуется использовать:

– проложенные в земле водопроводные и другие металлические трубопроводы, за исключением трубопроводов горючих жидкостей, горючих или взрывчатых газов и смесей;

- обсадные трубы скважин;
- металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений, находящихся в соприкосновении с землей;
- металлические шпунты гидротехнических сооружений, водоводы, затворы и т.п.;
- свинцовые оболочки кабелей, проложенных в земле (алюминиевые оболочки кабелей не допускается использовать в качестве естественных заземлителей);
- заземлители опор ВЛ, соединенные с заземляющим устройством ЭУ при помощи грозозащитного троса ВЛ, если трос не изолирован от опор ВЛ;
- нулевые провода ВЛ до 1 кВ с повторными заземлителями при количестве кабелей не менее двух;
- рельсовые пути магистральных неэлектрифицированных железных дорог и подъездные пути при наличии преднамеренного устройства перемычек между рельсами.

Для искусственных заземлителей следует применять сталь. *Наименьшие размеры стальных искусственных заземлителей* составляют:

Диаметр круглых (прутковых) заземлителей, мм:	
неоцинкованных	10
оцинкованных	6
Сечение прямоугольных заземлителей, мм ²	48
Толщина прямоугольных заземлителей, мм	4
Толщина полок угловой стали, мм	4

4.2.3. Расчет, проектирование и конструирование простых заземляющих устройств

Растекание тока в земле. При повреждении изоляции ЭУ между находящимся под напряжением элементом оборудования и его заземленной частью образуется электрическая цепь, по которой потечет ток замыкания на землю. Величина этого тока зависит от напряжения ЭУ, мощности источника питания, режима нейтрали, протяженности линий и величин сопротивлений, входящих в цепь замыкания элементов электрической сети.

Электрическое сопротивление току замыкания на землю слоев земли, непосредственно прилегающих к ЗУ, называется *электрическим сопротивлением растеканию* заземляющего устройства или сопротивлением ЗУ.

Если принять в качестве расчетной модель, в которой земля во всей своей толще является однородной, т.е. обладает одним и тем же удельным электрическим сопротивлением ρ , то при симметричной конструкции заземлителя (полусфера) ток замыкания растекается во все стороны проводящего пространства равномерно (рис. 4.24). В действительности удельное электрическое сопротивление земли зависит от состава почвы или образующих ее горных пород, от степени влажности, наличия растворимых солей, температуры среды и других факторов.

В табл. 4.7 приведены ориентировочные значения удельных сопротивлений ρ некоторых грунтов, горных пород, воды и металлов, из которой видно, что среднее удельное электрическое сопротивление грунтов значительно выше такого же сопротивления металлов, в то же время электрическое сопротивление ЗУ должно быть соизмеримо с электрическим сопротивлением металлических элементов электрической цепи. Уменьшение электрического сопротивления достигается конструированием ЗУ достаточно больших размеров.

На небольших расстояниях от ЗУ, когда сечение земли для стекающего с него электрического тока замыкания на землю относительно невелико и, следовательно, создаются значительные плотности тока, в земле появляется значительная величина напряженности электрического поля, которая при реальных значениях тока замыкания на землю становится практически ничтожно малой на расстояниях порядка 15—20 м от заземляющего устройства, где из-за большого сечения проводящего пространства земли, по которой протекает ток замыкания, плотность тока в земле значительно снижается.

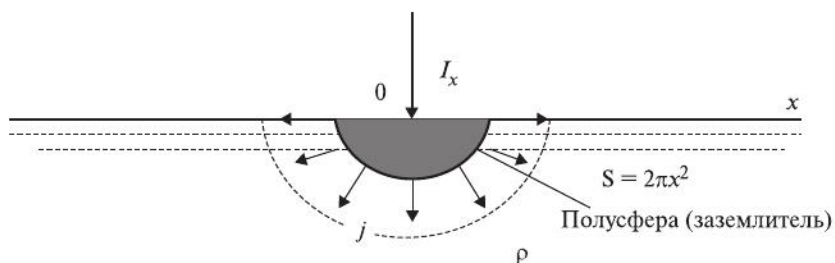


Рис. 4.24. К определению сопротивления растеканию полусферического заземляющего устройства

Таблица 4.7

Ориентировочные значения удельных сопротивлений некоторых металлов, воды и грунтов

Род материала	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·м
Медь	$1,54 \cdot 10^{-4}$
Стальные сплавы	$(9,1-13,4) \cdot 10^{-4}$
Морская вода	0,2
Речная вода	10—80
Торф	20
Чернозем	10—50
Глина	8—70
Суглинок	40—150
Супесок	150—400
Песок (10 % влажности)	400—1000
Мергель, известняк, крупнозернистый песок с валунами	1000—2000
Скала, валуны	2000—4000

Расчет сопротивления земли растеканию. Если представить ЗУ в виде полусферы, погруженной в проводящее пространство земли с равномерным удельным электрическим сопротивлением, и принять, что второй электрод электрической цепи замыкания находится на бесконечно большом расстоянии от заземлителя, то плотность тока в земле на поверхности полусферы радиусом x будет равна:

$$j = \frac{I_3}{2\pi x^2},$$

где j — плотность тока в проводящем пространстве земли на расстоянии x от центра заземлителя, А/м²; I_3 — ток в цепи замыкания на землю, А.

Плотность тока в проводящем пространстве можно выразить по закону Ома в дифференциальной форме:

$$j = E/\rho,$$

откуда

$$E = \frac{\rho I_3}{2\pi x^2}. \quad (4.5)$$

Напряжение, или разность потенциалов между двумя точками земли 1 и 2, можно определить, интегрируя величину E по оси x :

$$U_{1,2} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\rho I_3}{2\pi x^2} dx.$$

Подставляя $x_1 = r$ и $x_2 = \infty$, получим напряжение на заземлителе относительно нулевого потенциала «земли»:

$$U_3 = \frac{\rho I_3}{2\pi r}. \quad (4.6)$$

Принимая во внимание закон Ома для участка электрической цепи $U_3 = I_3 R_3$, получим выражение для расчета сопротивления растеканию полусферического заземлителя:

$$R_3 = \frac{\rho}{2\pi r}. \quad (4.7)$$

Анализ формулы (4.7) показывает, что сопротивление растеканию полусферического заземлителя (электрода) прямо пропорционально удельному электрическому сопротивлению грунта и обратно пропорционально его максимальному размеру ($2r = d$).

На практике при сооружении ЗУ применяются, как правило, контурные горизонтальные (арматурная сталь, редко полоса) или стержневые вертикальные (из арматурной стали, редко из уголка или труб) заземляющие устройства. Сопротивление одиночных заземляющих электродов может быть определено из соотношений, приведенных в табл. 4.8.

Таблица 4.8

Значения сопротивлений растеканию простых одиночных заземляющих электродов

№ п/п	Форма электрода	Основные размеры	Расчетное соотношение
1	Круглая пластина	d_0 — радиус пластины	$\rho / 2 d_0$
2	Вертикальный электрод	l — длина; d — диаметр электрода	$\frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$
3	Вертикальный электрод на глубине t	l — длина стержня; d — диаметр стержня; t — расстояние от поверхности земли до верхнего конца стержня	$\frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{7t+4l}{7t+l} \right)$
4	Горизонтальный электрод на глубине t	L — длина горизонтального электрода	$\frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{dt}$

4.2.4. Расчет сопротивления растеканию сложных ЗУ электроустановок в многослойных грунтах методом относительного сопротивления

В теории заземляющих устройств (ЗУ) в последние два десятилетия большое внимание уделялось оценке и расчету сопротивле-

ния растеканию сложных ЗУ с учетом неравномерной проводимости земли, что обусловлено стремлением уточнить методы расчета многоэлементных и достаточно дорогих в изготовлении ЗУ электроустановок большой мощности.

Необходимость уточнения методов расчета сопротивления растеканию сложных ЗУ привело к созданию различных математических моделей их расчета.

Проблема расчета сопротивления растеканию ЗУ состоит в необходимости учета как собственных электрических и геометрических параметров ЗУ, так и в выявлении взаимного влияния элементов конструкции и их геометрии на величину сопротивления растеканию с учетом слоистости земли и величин проводимости подстилочных слоев.

Конструкция реального ЗУ часто соизмерима с толщиной верхнего слоя (верхних слоев) земли, где удельное сопротивление наиболее значимо при определении эквивалентного удельного сопротивления грунта и на его основе сопротивления растеканию ЗУ.

Введем понятие относительного сопротивления растеканию ЗУ. Величина относительного сопротивления растеканию ЗУ определяется как сопротивление растеканию ЗУ единичного размера, расположенного в слое земли с единичным удельным сопротивлением. При многослойной структуре земли геометрические размеры слоев выражаются в долях от единичного размера, а удельные сопротивления подстилочных слоев кратностью от удельного сопротивления верхнего слоя земли.

Ниже будет показано, что введение понятия относительного сопротивления ЗУ позволяет достаточно просто оценить эквивалентное удельное сопротивление земли с учетом взаимосвязи геометрических размеров ЗУ и слоев земли.

Рассмотрим первоначально несколько идеализированную модель полусферического ЗУ (рис. 4.25), расположенного в двухслойном проводящем пространстве, где форма проводящих пространств (слоев) с удельными сопротивлениями ρ_1 , ρ_2 повторяет форму полусферической конструкции ЗУ.

Необходимо определить, как влияет на сопротивление растеканию ЗУ толщина верхнего слоя проводящего пространства земли, удаление подстилочного слоя от поверхности и соотношение удельных сопротивлений верхнего и подстилочного слоев.

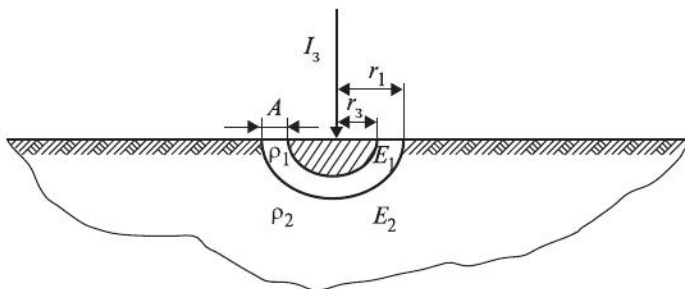


Рис. 4.25. Схема полусферической модели заземляющего устройства в двухслойной проводящей среде

При $r_1 > r > r_3$

$$E_1 = \frac{I_3 \rho_1}{2\pi r^2}.$$

Принимая во внимание указанные соотношения из выражения (4.5), при $\infty > r > r_1$ получим

$$E_2 = \frac{I_3 \rho_2}{2\pi r^2}.$$

Напряжение заземляющего устройства относительно удаленных точек земли может быть получено из соотношения

$$U_3 = \int_{r_3}^{r_1} \frac{I_3}{2\pi r^2} \rho_1 dr + \int_{r_1}^{\infty} \frac{I_3}{2\pi r^2} \rho_2 dr$$

или

$$U_3 = \frac{I_3}{2\pi} \left[\rho_1 \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_1} \right) + \rho_2 \frac{1}{r_1} \right],$$

откуда

$$R_3 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{2\pi r_1} + \frac{\rho_1}{2\pi r_3}.$$

Для анализа влияния размеров слоев земли и их удельных сопротивлений на величину сопротивления растеканию заземляющего устройства примем радиус заземляющего устройства равным единичному размеру $r_3 = 1$, а толщину первого слоя выразим в долях от единицы, помня, что $r_1 = r_3 + A$, или с учетом единичного размера $A = r_1 - 1$ и $r_1 = 1 + A$, где A — толщина верхнего слоя меж-

ду поверхностью ЗУ и границей раздела слоев, определяемая любым положительным числом в долях от единичного размера.

Аналогично поступим с удельным сопротивлением грунтов, приняв $\rho_1 = 1$, а $\rho_2/\rho_1 = B$, где B — любое положительное число, означающее, во сколько раз ρ_2 больше или меньше ρ_1 .

При указанных условиях из предыдущего выражения для R_3 можно получить:

$$R_3^* = \frac{1}{2\pi} + \frac{B-1}{2\pi(A+1)},$$

где R_3^* — относительное сопротивление растеканию полусферического заземляющего устройства в двухслойной проводящей среде.

Величина относительного сопротивления растеканию ЗУ определяется как электрическое сопротивление растеканию ЗУ единичного размера, расположенного в проводящем пространстве земли с единичным удельным сопротивлением. В этом случае при многослойной структуре земли геометрические размеры слоев выражаются в долях от единичного размера, а их удельные сопротивления кратностью от единичного удельного сопротивления верхнего слоя земли.

Очевидно, что при однородном удельном сопротивлении проводящего пространства земли $B = 1$ ($\rho_2 = \rho_1$), а $A = 0$ ($r_1 = r_2$). Тогда для полусферической формы заземляющего устройства

$$R_3^* = \frac{1}{2\pi}.$$

Для получения действительного значения сопротивления растеканию полусферического ЗУ нужно его относительное сопротивление умножить на коэффициент кратности (подобия) ρ/r в омах.

Исходя из основных положений теории подобия показано, что поля двух любых ЗУ в многослойной земле подобны при равенстве удельных сопротивлений слоев земли, относительных размеров заземляющих устройств и формы их расположения в слоях земли. Это подтверждает правомерность создания для сложных ЗУ, расположенных в многослойных грунтах, модели расчета на основе применения понятия относительного сопротивления растеканию заземляющих устройств.

Из теории ЗУ известно, что величина сопротивления растеканию заземляющего устройства любой формы, как и для одиночного полусферического электрода, в основном определяется его мак-

симальным размером и удельным электрическим сопротивлением окружающего его проводящего пространства земли.

Какой бы не была форма заземляющего электрода или ЗУ электрическое поле вокруг него в окружающем проводящем пространстве на некотором удалении образует сферические (при расположении ЗУ у поверхности раздела сред «воздух—земля» — полусферические) эквипотенциальные поверхности.

Это обстоятельство позволяет при определенных условиях моделировать ЗУ любой формы сферическим (полусферическим) заземляющим устройством.

Введение понятия относительного сопротивления растеканию заземляющего устройства, величина которого зависит от модуля $B = \rho_2/\rho_1$, позволяет интерпретировать результаты вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) электрического сопротивления слоев земли в показатели эквивалентного удельного сопротивления двухслойной структуры проводящего пространства земли и в величину относительного сопротивления растеканию ЗУ в зависимости от его размеров и размеров слоев земли.

В табл. 4.9 показаны значения относительных сопротивлений растеканию R^* простых заземляющих электродов в однородной проводящей среде на основе модулей их значений R .

Таблица 4.9

Значения относительных сопротивлений растеканию простых одиночных заземляющих электродов

№ п/п	Форма заземлителя	Основные размеры	R_3	R_3^*
1	Круглая пластина	d — диаметр пластины	$\rho/2d$	$1/4$
2	Полусфера	d — диаметр сферы	$\rho/\pi d$	$1/2\pi$
3	Вертикальный стержень	l — длина стержня; d — диаметр стержня, $4l/d = K$	$\frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$	$\frac{1}{2\pi} \ln K$
4	Горизонтальный стержень (полоса) на поверхности	l — длина стержня (полосы); d — диаметр (толщина)	$\frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{d}$	$\frac{1}{2\pi} \ln \frac{K}{2}$

Использование значений относительного сопротивления растеканию простых заземляющих электродов удобно при определении значений действительного (модуля) сопротивления растеканию простым умножением относительного значения на величину коэффициентов подобия ρ/r или ρ/l в омах.

Интересен анализ зависимостей относительного сопротивления полусферического ЗУ от соотношений удельных сопротивлений подстилочного и прилегающего слоев двухслойной структуры земли, а также от относительного удаления подстилочного слоя от поверхности заземляющего устройства. Рассмотрим случай с удельным сопротивлением подстилочного слоя меньшим удельного сопротивления прилегающего слоя. Удаление подстилочного слоя на три радиуса от центра заземляющего устройства ($2r_3$ от границы ЗУ) или при $A = 6$ практически не влияет на величину сопротивления растеканию ЗУ, вычисленную при удельном сопротивлении прилегающего слоя, а в предельном состоянии при $\rho_2 \rightarrow 0$ и $B = 0$ может уменьшиться с учетом удельного сопротивления подстилочного слоя не более чем в два раза.

Большое влияние на величину относительного сопротивления растеканию оказывает подстилочный слой с удельным сопротивлением проводящего пространства земли большим, чем удельное сопротивление прилегающего к ЗУ слоя. Так при превышении ρ_2 над ρ_1 в 30 раз и удалении подстилочного слоя на десять радиусов от центра ЗУ ($A = 20$) его сопротивление растеканию увеличивается в 2,5 раза, а при более близком расположении подстилочного слоя к ЗУ может увеличиваться в 10 и более раз, достигая, например, в пределе 29,8 при $\rho_2 = 30\rho_1$ и $A = 1$.

С помощью номограммы относительного сопротивления полусферического заземляющего устройства, показанной на рис. 4.26, можно проанализировать влияние удельного сопротивления подстилочного слоя при двухслойной структуре проводящего пространства земли на сопротивление растеканию ЗУ. Применение номограммы имеет практическое значение, так как освобождает инженеров от необходимости проведения громоздких расчетов и составления сложных вычислительных программ, ограничиваясь расчетом сопротивления растеканию заземляющего устройства при эквивалентном удельном сопротивлении однородного проводящего пространства земли, найденного из номограммы: $\rho_3 = K\rho_1$.

Зная по результатам ВЭЗ (применяя двухслойную палетку результатов вертикального электрического зондирования) модуль $B = \rho_2/\rho_1$ и относительное значение размера $A = h_1/r_x$, по номограмме рис. 4.16 легко находим относительное сопротивление R_3^* , откуда:

$$\rho_{\text{э}} = \rho_1 \frac{R_3^*}{R_{3,B=1}^*} \text{ или } \rho_{\text{э}} = K \rho_1,$$

где $R_{3,B=1}^*$, относительное сопротивление при однородном грунте ($B=1$).

Пусть, например, в результате применения ВЭЗ с использованием двухслойной интерпретации результатов зондирования получено $B = 7$, $h_1 = 20$, размер горизонтального заземлителя 10 м, а максимальный эквивалентный радиус заземлителя определен как половина его максимального размера: $r_x = d/2$, где d — длина горизонтального заземлителя в метрах.

Найдем $A = h_1/r_x = 2$ и по номограмме рис 4.26 определим $K = 1,61$, откуда $\rho_{\text{э}} = 1,61\rho_1$.

Таким образом, достаточно простая методика позволяет определять эквивалентное удельное сопротивление **проводящего пространства с двухслойной структурой** для расчета сопротивления растеканию ЗУ с учетом относительных размеров заземляющего устройства по отношению к толщине (мощности) прилегающего слоя и отношения удельных сопротивлений грунтов слоев земли.

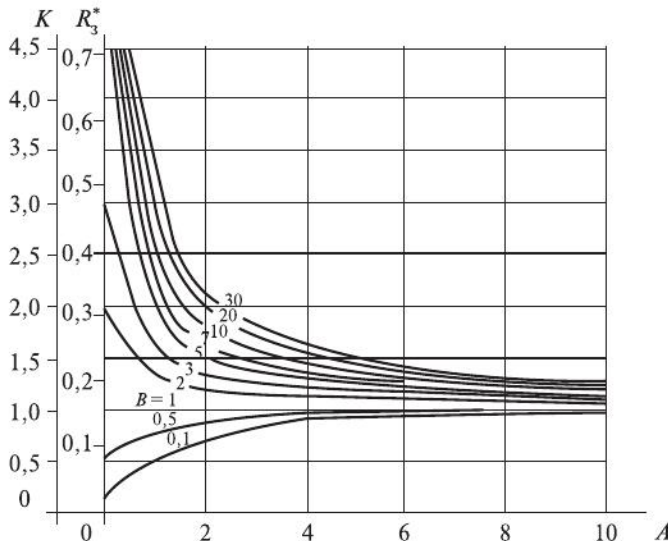


Рис. 4.26. Относительное сопротивление растеканию ЗУ полусферической формы в двухслойной проводящей среде и коэффициент эквивалентного удельного сопротивления

Вышеизложенную модель расчета необходимо корректировать с точки зрения приближения к реальной структуре формы ЗУ и системы заземляющее устройство—проводящее пространство. Поэтому рассмотренная модель может быть использована ограниченно, например, при проектировании ЗУ с геологическим разрезом в месте расположения, имеющим форму впадины, и для расчета сопротивления растеканию железобетонных конструкций с выраженной двухслойной структурой.

Пример 1. Необходимо определить сопротивление растеканию заземляющего устройства, представляющего собой железобетонный параллелепипед, расположенный в грунте с удельным электрическим сопротивлением $\rho_2 = 100$ Ом·м и размерами $b \cdot b \cdot t = 4 \times 4 \times 2$ м.

Площадь поверхности параллелепипеда, соприкасающегося с грунтом $S = b \cdot b + 4b \cdot t = 48$ м², толщина бетонного слоя между арматурой и грунтом $h_1 = 0,04$ м, удельное электрическое сопротивление влажного бетона $\rho_1 = 600$ Ом·м.

Решение. Площадь поверхности параллелепипеда заменяется эквивалентной площадью полусферы $S = S_{\text{ЭКВ}}$ и задача решается с помощью номограммы рис. 4.26:

1. Определяется отношение удельных сопротивлений грунта и бетона:

$$B = \frac{\rho_1}{\rho_2} = 0,167.$$

2. Определяется соотношение между эквивалентным радиусом заземляющего устройства и толщиной верхнего слоя проводящего пространства земли (бетона):

$$A = \frac{h_1}{r},$$

где $r = \sqrt{\frac{S_{\text{ЭКВ}}}{2\pi}}$.

Для условий задачи $r = 2,76$ м, $A = 0,0145$.

3. С учетом полученных из номограммы рис. 4.16 с помощью интерполяции данных определяем $R_3^* = 0,04$, $K = 0,25$.

4. Искомое сопротивление растеканию железобетонного параллелепипеда можно определить двумя путями.

Первый путь: замена параллелепипеда эквивалентной полусферой. Сопротивление растеканию полусферы определяется при эк-

вивалентном удельном сопротивлении грунта $\rho_{\text{ЭКВ}} = K\rho_1$ и при эквивалентном радиусе заземляющего электрода $r_0 = r - h_1 = 2,72$:

$$R_3 = \frac{\rho_{\text{ЭКВ}}}{2\pi r_0} = \frac{0,25 \cdot 600}{6,28 \cdot 2,72} = 8,78 \text{ Ом.}$$

Второй путь: определение действительного сопротивления растеканию осуществляется через его относительное значение:

$$R_3 = R_3^* \frac{\rho_1}{r_0} = 0,04 \frac{600}{2,72} = 8,82 \text{ Ом.}$$

Разница между двумя путями расчета определяется точностью значений K и R_3^* , полученных с помощью номограммы рис. 4.26.

Пример 2. Необходимо определить сопротивление растеканию железобетонной цилиндрической стойки, установленной в грунте, с параметрами $d = 0,4$ м, глубина фундаментной части $l = 4$ м, толщина слоя бетона между арматурой и грунтом $h_1 = 0,02$ м, удельное электрическое сопротивление влажного бетона $\rho_1 = 400$ Ом·м. Удельное сопротивление грунта $\rho_2 = 80$ Ом·м.

Решение.

1. Определяется отношение удельных сопротивлений $B = \rho_1/\rho_2 = 0,2$.

2. Определяется соотношение между эквивалентным радиусом заземляющего устройства, за который принимается длина фундаментной части стойки $l = 4$, и толщиной верхнего слоя проводящего пространства (бетона): $A = h_1/l = 0,005$.

3. С учетом полученных из номограммы рис. 4.26 с помощью линейной интерполяции данных найдем: $K = 0,28$, $\rho_{\text{ЭКВ}} = K \cdot \rho_1 = 112$ Ом·м.

4. Искомое электрическое сопротивление растеканию фундаментной части железобетонной стойки определим из соотношения

$$R_3 = \frac{\rho_{\text{ЭКВ}}}{2\pi r} \ln \frac{4l}{d} = \frac{112}{6,28 \cdot 4} \ln \frac{4 \cdot 4}{0,4} = 16,5 \text{ Ом.}$$

Пример 3. Для исходных данных 2-го примера необходимо определить сопротивление растеканию фундаментной части железобетонной стойки для удельного сопротивления проводящего пространства земли $\rho_2 = 160$ Ом·м.

Аналогично 2-му примеру найдем:

$$B = 0,04, A = 0,005, K = 0,42, \rho_{\text{ЭКВ}} = 168 \text{ Ом·м, } R_3 = 24,8 \text{ Ом.}$$

Полученные в 2-м и 3-м примерах значения сопротивлений растеканию фундаментов железобетонных стоек достаточно хорошо совпадают с многочисленными экспериментальными данными на основе измерений сопротивлений растеканию фундаментов железобетонных опор контактной сети, проведенных автором.

Так, на участке ст. Катайск—ст. Долматово Южно-Уральской ж.д. удельное электрическое сопротивление проводящего пространства земли менялось в диапазоне 12,6—326 Ом·м, сопротивление растеканию фундаментов железобетонных стоек 16—36 Ом (длина фундаментной части колебалась в пределах 3,5—4,5 м, а сопротивления измерялись не для всего диапазона удельных сопротивлений).

Проведя расчеты сопротивлений по аналогии со 2-м примером для крайних значений диапазона удельных сопротивлений и для длины фундаментной части железобетонной стойки $l = 4$ м, найдем диапазон изменения сопротивлений растеканию фундаментов железобетонных стоек, который составляет 11,8—53 Ом. Это указывает на хорошую сходимость результатов расчета и измерения для среднего значения величины удельного сопротивления, принятого в примерах.

При *горизонтальной границе раздела слоев проводящего пространства* математическая модель расчета несколько усложняется.

Для учета влияния плоской поверхности раздела сред с удельным сопротивлением ρ_1 и ρ_2 в проводящую среду с удельным сопротивлением ρ_1 поместим сферический источник тока $2I$ с центром в точке A (рис. 4.27).

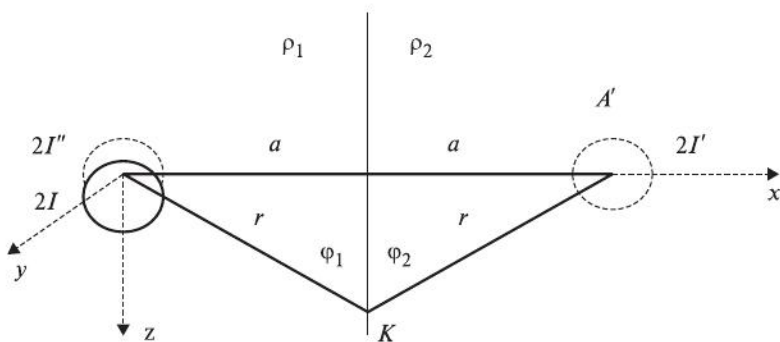


Рис. 4.27. Учет влияния плоской поверхности раздела сред

Решая задачу методом зеркальных изображений, поместим в точке A' , являющейся зеркальным изображением точки A , центр сферического фиктивного источника тока $2I'$ а в точке A — фиктивный источник $2I''$.

Токи $2I'$ и $2I''$ нужно подобрать так, чтобы влияние плоской границы двух сред было эквивалентно влиянию фиктивных источников тока, тогда суммарное поле действительного и фиктивного источников тока даст искомое электрическое поле на границе раздела двух сред с разной проводимостью. Эта цель может быть достигнута выбором граничных условий. Для точки K на границе раздела должны выполняться условия равенства потенциалов и непрерывности линий потенциального поля:

$$\varphi_1 = \varphi_2, \quad \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} = \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial \varphi_2}{\partial x}.$$

Потенциал электрического поля в среде с удельным сопротивлением ρ_1 , будем рассчитывать от двух источников $2I'$ и $2I''$:

$$\varphi_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi r} + \frac{I'\rho_1}{2\pi|r'|}.$$

Потенциал электрического поля в среде с удельным сопротивлением ρ_2 , будем рассчитывать от источника тока $2I''$:

$$\varphi_2 = \frac{I''\rho_2}{2\pi r}.$$

Решая эти выражения с учетом граничных условий, получим:

$$\frac{\rho_1}{2\pi r}(I + I') = \frac{\rho_2}{2\pi r} I'';$$

$$\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{I\rho_1}{2\pi r} + \frac{I'\rho_1}{2\pi r} \right) = \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial}{\partial x} \frac{I''\rho_2}{2\pi r}$$

или, принимая во внимание, что $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, получим:

$$I\rho_1 + I'\rho_1 = I''\rho_2,$$

$$I - I' = I''.$$

Окончательно:

$$I' = K_{1,2}I,$$

$$I'' = (1 - K_{1,2})I, \tag{4.8}$$

$$\varphi_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi r}(1 + K_{1,2}),$$

$$\varphi_2 = \frac{I\rho_2}{2\pi r}(1 - K_{1,2}),$$
(4.9)

где $K_{1,2} = 1 - \frac{2\rho_1}{\rho_1 + \rho_2}$.

Зная, как влияет поверхность раздела сред с разной электропроводимостью на электрическое поле сферического источника тока, можно определить электрическое поле полусферического источника тока при наличии в проводящем пространстве горизонтальной поверхности раздела сред с разной электропроводимостью.

Рассмотрим полусферическое ЗУ, расположенное в проводящей среде с двухслойной геоэлектрической структурой, с одной горизонтальной поверхностью раздела сред с удельными сопротивлениями ρ_1 и ρ_2 . Толщину верхнего слоя примем равной h (рис. 4.28).

Для решения задачи нижнее проводящее полупространство отражено в поверхности раздела земля—воздух, что приводит к образованию среды с двумя поверхностями раздела — истинной I и фиктивной II. При стекании с истинного заземляющего устройства тока I в образованном пространстве будет протекать ток $2I$.

Искомый потенциал φ_1 в точке M , принимая во внимание (4.8) и (4.9), будет представлять бесконечную сумму потенциалов, создаваемых действительным источником тока I и фиктивными источниками $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$, образуемыми зеркальными изображениями I и II в поверхности раздела земля—воздух и проводящих сред с удельными сопротивлениями ρ_1 и ρ_2 :

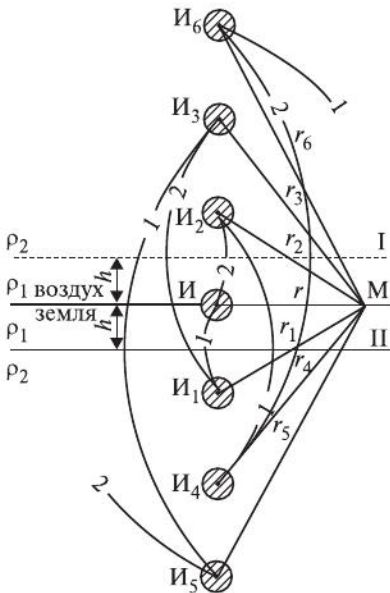


Рис. 4.28. Схема модели расчета с использованием зеркальных изображений

$$\varphi_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{1,2}^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right]. \quad (4.10)$$

Из соотношения (4.10) можно определить сопротивление растеканию полусферического заземляющего устройства R_3 радиуса r_3 в двухслойном проводящем пространстве земли:

$$R_3 = \frac{\rho_1}{2\pi r_3} + \frac{\rho_1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{1,2}^n}{\sqrt{r_3^2 + (2nh)^2}}. \quad (4.11)$$

Принимая радиус заземляющего устройства единичного размера $r_3 = 1$, удельное сопротивление верхнего слоя единичного удельного сопротивления $\rho_1 = 1$, с учетом $\rho_2 = B\rho_1$, $h = Ar_3$, получим выражение для относительного сопротивления полусферического ЗУ в двухслойной среде:

$$R_3^* = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(B-1)^n}{(B+1)^n \sqrt{1 + (2nA)^2}}. \quad (4.12)$$

По аналогии с рассмотренной задачей для полусферического ЗУ в двухслойной проводящей среде может быть рассмотрена задача для заземляющего электрода в виде *круглой плоской пластины*, расположенной на поверхности двухслойного проводящего пространства.

Рассматривая в этом случае влияние плоской границы раздела двух сред с разной проводимостью по аналогии с (4.9), найдем:

$$\varphi_1 = \frac{I\rho_1}{\pi d} \arcsin \frac{d}{2r} (1 + K_{1,2}), \quad \varphi_2 = \frac{I\rho_2}{\pi d} \arcsin \frac{d}{2r} (1 - K_{1,2}).$$

Рассматривая далее двухслойную модель с помощью метода зеркальных отражений, найдем:

$$\varphi_1 = \frac{I\rho_1}{\pi d} \left[\arcsin \frac{d}{2r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K_{1,2}^n \arcsin \frac{d}{2\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right],$$

где ρ_1 — удельное электрическое сопротивление верхнего слоя двухслойного проводящего пространства земли, Ом·м; $d = 2r_{\text{ЭКВ}}$ — диаметр диска или эквивалентный диаметр плоского заземляющего электрода на поверхности земли, $r_{\text{ЭКВ}}$ — эквивалентный радиус плоского заземляющего электрода, м; r — координата диска в проводящем пространстве земли, так как задача осесимметричная, r можно определить:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \text{или} \quad r = \sqrt{t^2 + r_{\text{ЭКВ}}^2}, \quad \text{м;}$$

t — глубина погружения плоского заземляющего электрода в проводящее пространство земли, м; h — толщина верхнего слоя проводящего пространства

земли, m ; $K_{1,2}$ — коэффициент удельных сопротивлений верхнего и подстилочного слоев проводящего пространства земли, определенный выше.

Рассмотренное соотношение позволяет определить сопротивление растеканию заземляющего электрода в виде плоского диска, расположенного в двухслойном проводящем пространстве земли, с учетом допущения, что при расположении диска вблизи от поверхности при $t \ll r_{\text{ЭКВ}}$ с достаточной степенью точности можно принять:

$$\arcsin \frac{r_{\text{ЭКВ}}}{\sqrt{t^2 + r_{\text{ЭКВ}}^2}} \approx \frac{\pi}{2}, \quad h = h_1 - t, \quad (t^2 + r_{\text{ЭКВ}}^2) \approx r_{\text{ЭКВ}}^2.$$

С учетом указанных допущений выражение для сопротивления растеканию ЗУ в виде плоской пластины примет вид:

$$R_3 = \frac{\rho}{\pi d} \left[\frac{\pi}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} K_{1,2}^n \arcsin \frac{d}{\sqrt{r_{\text{ЭКВ}}^2 + (2nh)^2}} \right].$$

Анализ суммы во втором слагаемом показывает, что при $\rho_1 > \rho_2$, когда ряд под знаком суммы является знакопеременным, так и при $\rho_2 > \rho_1$ сумма ряда может быть вычислена без существенной ошибки при 8—10 слагаемых, что реализуется с помощью ПЭВМ с заданной степенью точности.

Относительное сопротивление растеканию ЗУ в виде плоского круглого диска (или эквивалентной ему конструкции) при двухслойной структуре проводящего пространства земли может быть определено с учетом принятых для относительного сопротивления соотношений $r_{\text{ЭКВ}} = 1$, $\rho_1 = 1$, $B = \rho_2 / \rho_1$, $A = h / r_{\text{ЭКВ}}$:

$$R_3^* = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\pi}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{B-1}{B+1} \right)^n \arcsin \frac{1}{\sqrt{1 + (2nA)^2}} \right]. \quad (4.13)$$

При однородном проводящем пространстве земли в формулу необходимо подставить значения $B = 1$, $A = 0$, $t = 0$, тогда получим из формулы относительное сопротивление $R_3^* = 1/4$, что соответствует вычисленному и приведенному ранее значению относительного сопротивления растеканию круглой пластины для однородного проводящего пространства земли (см. табл. 4.9).

На рис. 4.29 приведена номограмма относительных сопротивлений растеканию круглой плоской пластины для двухслойного проводящего пространства земли. Приведенная номограмма позволяет

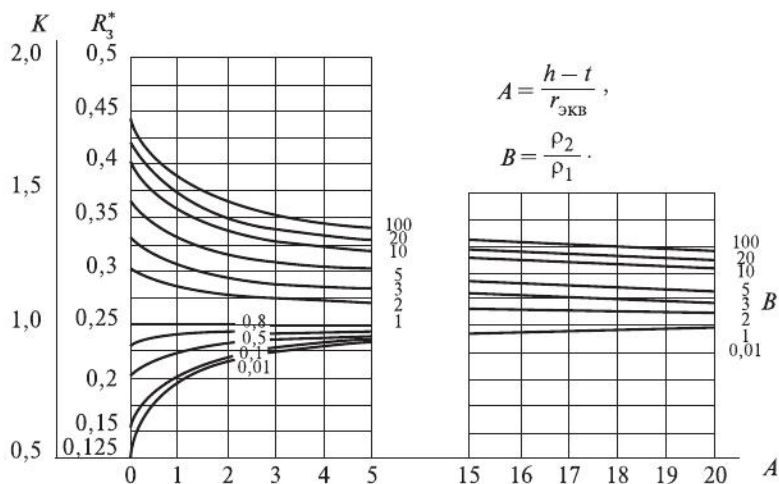


Рис. 4.29. Зависимость относительного сопротивления растеканию плоской круглой пластины в двухслойном проводящем пространстве земли от относительных размеров ЗУ и верхнего слоя земли A и относительного удельного сопротивления подстильного слоя B

определять относительное сопротивление плоских ЗУ, эквивалентных по размеру круглой пластине, а также с учетом относительных размеров ЗУ эквивалентное удельное сопротивление двухслойной структуры земли для данной конструкции заземляющего устройства.

Зная относительное сопротивление растеканию ЗУ, его действительное сопротивление можно определить из соотношения

$$R_3 = R_3^* \rho_3 / r_{\text{ЭКВ}}, \quad \rho_3 = K \rho_1,$$

где R_3^* и K определяются по номограмме рис. 4.29 в зависимости от значений относительного размера ЗУ и верхнего слоя земли A и относительного удельного сопротивления подстильного слоя земли B .

4.2.5. Оценка влияния конструкции сетчатого горизонтального заземляющего устройства на величину его сопротивления растеканию

В практике расчета и проектирования ЗУ влияние его сетчатой горизонтальной конструкции оценивается зависимостью его сопротивления растеканию от числа ячеек сетки, приходящихся на сторону прямоугольного ЗУ, предложенной д.т.н. Власовым С.П. (МИИТ). Эта зависимость вводится коэффициентом A согласно табл. 4.10.

Таблица 4.10

Зависимость величины коэффициента A от числа ячеек ЗУ

Число ячеек на стороне сетчатого ЗУ	1	2	4	8	16
Коэффициент A	0,82	0,63	0,61	0,54	0,48

Такая методика представляется достаточно убедительной при неизменном сечении полосы, составляющей конструкцию сетчатого ЗУ, и при квадратной его форме. Практика проектирования встречает затруднения в выборе коэффициента A при конструировании сетчатого ЗУ прямоугольной или сложной формы. В этом случае методика не дает ответа, для какой из сторон прямоугольника или стороны сложной фигуры выбирать параметр A .

Влияние размера полосы, образующей ячейку сетчатого ЗУ, было рассмотрено еще основоположником теории заземляющих устройств Ф. Оллендорфом в форме отношения сопротивления растеканию заземляющего электрода в виде кольца к сопротивлению растеканию заземляющего электрода в виде диска с радиусом r_k :

$$\frac{R_r}{R} \approx \frac{2}{\pi^2} \frac{2}{1+r_1/r_k} \ln 16 \frac{1+r_1/r_k}{1-r_1/r_k}, \quad (4.14)$$

где R_r — сопротивление растеканию кольца, Ом; R — сопротивление растеканию диска, Ом; r_1 — внутренний радиус кольца, м; r_0 — радиус диска, равный радиусу окружности, проходящей по оси симметрии полосы, образующей кольцо, м.

Соотношение является приближенным, потому что в его знаменателе фигурирует сопротивление растеканию диска несколько меньшего радиуса, чем наружный радиус кольца.

Это противоречие можно устранить легко, введя наружный радиус кольца (рис. 4.30) $r = r_0 + b/2$ и принимая в соотношении (4.14) в знаменателе сопротивление растеканию диска такого же радиуса, тогда соотношение примет вид:

$$\frac{R_r}{R} = \frac{0,405}{1+(d-2b)/(d-b)} \ln \frac{1+(d-2b)/(d-b)}{1-(d-2b)/(d-b)}, \quad (4.15)$$

где d — наружный диаметр кольца и диска, м.

Зависимость из приближенного соотношения (4.15) приведена на рис. 4.31, откуда можно сделать вывод, что при изменении радиуса кольца в пределах $0 < r_1 < 0,8r$ его сопротивление растеканию мало отличается от сопротивления растеканию диска, существенное повышение сопротивления растеканию кольца происходит

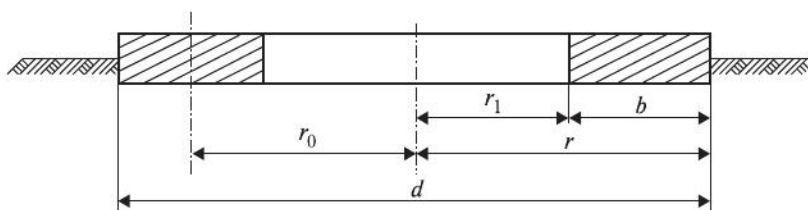


Рис. 4.30. Заземляющий электрод в виде диска и кольца

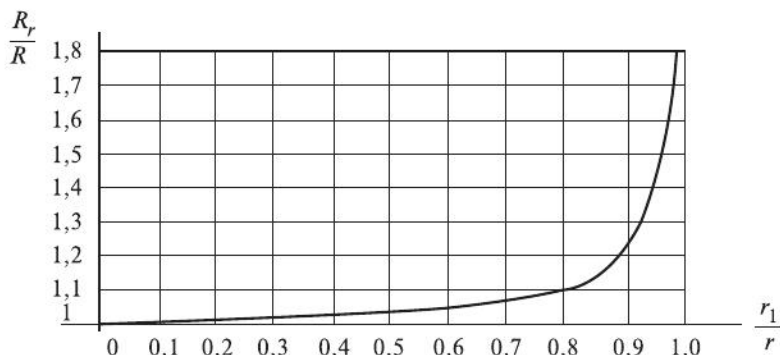


Рис. 4.31. Соотношение электрических сопротивлений плоских заземляющих электродов (сплошного и сетчатого)

при малых отклонениях внутреннего радиуса кольца r_1 и его радиуса r , т.е. в тех случаях, которые и наблюдаются в практике проектирования сетчатого горизонтального ЗУ, когда горизонтальный размер полосы сетчатого заземляющего устройства (СЗ) намного меньше ширины ячейки.

Анализ зависимости (рис. 4.31) показывает, что при реальных конструкциях СЗ, когда размер стороны ячейки колеблется в пределах 2—8 м, а горизонтальный размер ленточной полосы или диаметр арматурной (прутковой) стали 0,004—0,04 м, наблюдается существенное увеличение сопротивления растеканию сетчатого заземлителя по отношению к сплошному.

Рассмотрим модель горизонтального прямоугольного СЗ в виде горизонтального кругового ленточного СЗ (см. рис. 4.30).

При реализации модели принимаем в качестве масштабов моделирования для сетчатого заземляющего устройства отношение длины полосы реального квадратного ЗУ и длины полосы модели в виде кольца. Диаметр кольца равен стороне реального квад-

ратного СЗ, а масштаб моделирования для реального сплошного плоского квадратного ЗУ, моделируемого в виде сплошного диска, определяется отношением площадей реального и моделируемого ЗУ.

Отношение сопротивлений растеканию сетчатого и сплошного заземлителей можно выразить соотношением с учетом масштаба моделирования:

$$\frac{R_{rp}}{R_p} = \frac{K_{дл} R_{рм}}{K_{пл} R_m}, \quad (4.16)$$

где R_{rp} — сопротивление растеканию сетчатого ЗУ реальной квадратной формы, Ом; $R_{рм}$ — то же модели в виде кольцевого сетчатого ЗУ, Ом; R_p — сопротивление растеканию реального ЗУ в виде пластины квадратной формы, Ом; R_m — то же модели в виде сплошного диска, Ом; $K_{дл}$, $K_{пл}$ — соответственно масштабы длины и площади реального ЗУ и модели.

Масштаб моделирования СЗ и сплошной пластины в виде кольца и плоского круга составит отношение их длин и площадей. Масштаб, равный отношению удельных сопротивлений проводящего пространства земли для реального ЗУ и для модели, принят нами равным единице. При этом другие физические параметры не рассматриваются.

Принимая во внимание указанные соотношения из выражения (4.16), найдем для различных геометрических параметров соотношение сопротивлений растеканию сетчатого и сплошного ЗУ в виде параметра $A_{сз}$, учитывающего конструктивный характер СЗ и приведенного в табл. 4.11.

Таблица 4.11

Значения параметра $A_{сз}$ в зависимости от размеров сетчатого заземляющего устройства

Размер стороны СЗ, м	Число ячеек на стороне	Горизонтальной размер сечения полосы (прутка) d , м						
		0,004	0,008	0,012	0,024	0,048	0,096	0,192
2	1	0,866	0,804	0,769	0,707	0,650	0,592	0,535
4	1	0,928	0,866	0,831	0,769	0,707	0,650	0,592
6	1	0,964	0,902	0,866	0,804	0,743	0,685	0,623
	2	0,724	0,677	0,651	0,604	0,558	0,515	0,468
8	1	0,990	0,928	0,893	0,831	0,769	0,707	0,650
	2	0,745	0,697	0,671	0,624	0,578	0,531	0,488

Размер стороны СЗ, м	Число ячеек на стороне	Горизонтальной размер сечения полосы (прутка) d , м						
		0,004	0,008	0,012	0,024	0,048	0,096	0,192
12	1	1,03	0,964	0,928	0,866	0,804	0,743	0,685
	2	0,770	0,724	0,697	0,651	0,604	0,558	0,515
	4	0,645	0,605	0,582	0,504	0,504	0,465	0,443
16	1	1,05	0,990	0,955	0,893	0,831	0,769	0,707
	2	0,790	0,745	0,717	0,671	0,624	0,578	0,531
	4	0,659	0,621	0,598	0,560	0,521	0,482	0,443
	8	0,593	0,558	0,538	0,503	0,468	0,443	0,443
32	2	0,837	0,790	0,764	0,717	0,671	0,624	0,578
	4	0,698	0,659	0,637	0,598	0,560	0,521	0,482
	8	0,628	0,593	0,573	0,538	0,503	0,468	0,443
	16	0,592	0,559	0,541	0,508	0,475	0,443	0,443
64	1	1,18	1,11	1,08	1,02	0,955	0,893	0,831
	2	0,883	0,837	0,810	0,764	0,717	0,671	0,624
	4	0,733	0,698	0,676	0,637	0,598	0,560	0,521
	8	0,662	0,628	0,608	0,573	0,538	0,503	0,468
	16	0,625	0,592	0,573	0,541	0,508	0,475	0,443

С учетом полученных соотношений можно определить конструктивный параметр СЗ:

$$A_{сз} = 0,443R_r/R,$$

где R_r — сопротивление растеканию СЗ, Ом; R — сопротивление растеканию сплошной круглой пластины, эквивалентной по площади S прямоугольной пластине, Ом; $R = 0,443\rho\sqrt{S}$.

Значение величины $A_{сз}$ в зависимости от размера стороны и числа ячеек на стороне, а также размеров полосы (прутка) СЗ приведены в табл. 4.11 и в виде кривых на рис. 4.32, *а*, *б*.

Таким образом, сопротивление растеканию прямоугольного СЗ или СЗ сложной прямоугольной формы R_r с достаточной степенью точности может быть определено из соотношения

$$R_r = A_{сз}\rho_3/\sqrt{S}. \quad (4.17)$$

где ρ_3 — эквивалентное удельное сопротивление проводящего пространства многослойной земли, Ом·м; $A_{сз}$ — конструктивный параметр СЗ, определяемый из табл. 4.8, промежуточные значения коэффициента определяются методом линейной интерполяции между соседними значениями коэффициента; S — суммарная площадь СЗ прямоугольной или сложной формы, м².

Пример. Расчет сетчатого ЗУ по допустимому сопротивлению растеканию.

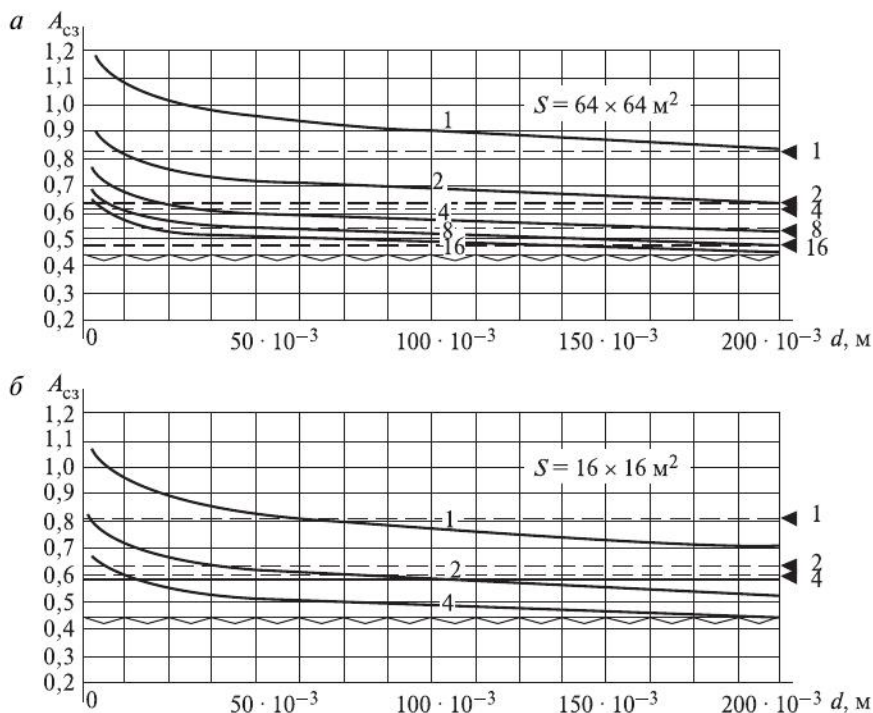


Рис. 4.32. Зависимость параметра A_{c3} от размера полосы (прутка) d и числа ячеек на стороне прямоугольного СЗ площадью $64 \times 64 \text{ м}^2$ (а) и $16 \times 16 \text{ м}^2$ (б); пунктир — обобщенные значения С.П. Власова, фигурная линия — предельное значение параметра $A_{c3} = 0,443$

Исходные данные:

Площадь, занимаемая сетчатым ЗУ (СЗ), $S = 45 \times 45 + 40 \times 40 = 3625 \text{ м}^2$. Глубина укладки ЗУ $t = 0,5 \text{ м}$. ЗУ выполнено из арматурной (прутковой) стали $d = 0,024 \text{ м}$, сторона ячейки СЗ составляет от 6 до 7 м, всего 85 ячеек.

Удельное сопротивление грунтов: $\rho_1 = 200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_2 = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, толщина («мощность» по терминологии геофизиков) верхнего слоя земли $h_1 = 2,6 \text{ м}$.

Конструкция электроустановки включает открытые распределительные устройства (ОРУ) 110 кВ с эффективно заземленной нейтралью и ОРУ тягового электроснабжения 3 кВ постоянного тока.

Решение.

1. Выбираем нормируемое значение сопротивления растеканию ЗУ для данной конструкции электроустановки: $R_H < 0,5$ Ом.

2. Устанавливаем, что на стороны 85 м, 45 м, 40 м СЗ сложной формы приходится соответственно: 13,7,6 ячеек СЗ. Из табл. 4.11 с учетом поперечного размера d арматурной стали устанавливаем конструктивный коэффициент сетчатого ЗУ $A_{сз}$ с использованием линейной интерполяции при определении промежуточных величин $A_{сз1} = 0,647$, $A_{сз2} = 0,611$, $A_{сз3} = 0,620$. В качестве расчетного значения конструктивного коэффициента принимаем наибольшее значение $A_{сз} = 0,647$.

3. Определяем эквивалентное удельное сопротивление проводящего пространства земли методом относительного сопротивления при глубине укладки 0,5 м.

На основе исходных данных $B = \rho_2/\rho_1 = 0,25$, $A = (h_1 - t)/r_0 = 0,0765$, где $r_0 = \sqrt{S}/\pi = 34$ м. Из номограммы рис. 4.29 получим коэффициент эквивалентного удельного сопротивления двухслойного проводящего пространства земли K , откуда $\rho_3 = K\rho_1 = 0,7 \times 200 = 140$ Ом·м.

Необходимо обратить внимание, что для плоского ЗУ полностью уложенного в проводящем пространстве земли с удельным сопротивлением ρ_1 эквивалентное удельное сопротивление двухслойного грунта ρ_3 не может быть меньше $0,5 \rho_1$ при любых реальных значениях ρ_2 .

4. Сопротивление растеканию плоского сетчатого ЗУ определяется из соотношения (4.17):

$$R_{сз} = A_{сз} \rho_3 / \sqrt{S} = 0,647 \times 140 / 60,2 = 1,5 \text{ Ом.}$$

Относительное сопротивление растеканию плоского СЗ в двухслойном проводящем пространстве земли можно определить из номограммы рис. 4.29: $R_{сз}^* = 0,170$, а конструктивное отношение R_r/R из табл. 4.12.

Таблица 4.12

Значения соотношения R_r/R для различных геометрических параметров СЗ

Размер стороны СЗ, м	Горизонтальный размер сечения полосы (прутка), м						
	0,004	0,008	0,012	0,024	0,048	0,096	0,192
2	1,96	1,82	1,74	1,60	1,47	1,34	1,21
4	2,10	1,96	1,88	1,74	1,60	1,47	1,34
6	2,18	2,04	1,96	1,82	1,68	1,55	1,41

Размер стороны СЗ, м	Горизонтальный размер сечения полосы (прутка), м						
	0,004	0,008	0,012	0,024	0,048	0,096	0,192
8	2,24	2,10	2,02	1,88	1,74	1,60	1,47
12	2,32	2,18	2,10	1,96	1,82	1,68	1,55
16	2,38	2,24	2,16	2,02	1,88	1,74	1,60
24	2,46	2,32	2,24	2,10	1,96	1,82	1,68
32	2,52	2,38	2,30	2,16	2,02	1,88	1,74
64	2,66	2,52	2,44	2,30	2,16	2,02	1,88
128	2,80	2,66	2,58	2,44	2,30	2,16	2,03

Окончательно сопротивление растеканию методом относительного сопротивления растеканию можно определить из соотношения

$$R_{сз} = \frac{R_r}{R} R_{сз}^* \frac{\rho_{\text{э}}}{r_0} = 2,16 \times 0,170 \times 140/34 = 1,51 \text{ Ом.}$$

Сопротивление растеканию плоского СЗ в рассмотренном примере не удовлетворяет нормируемому значению, поэтому для приведения его в соответствие с нормируемым значением и уменьшения электрического сопротивления оно должно быть конструктивно дополнено естественными ЗУ или вертикальными заземляющими электродами.

4.2.6. Проектирование сложных заземляющих устройств по допустимому (нормируемому) сопротивлению

Расчет проектируемого ЗУ состоит из следующих этапов:

Этап 1. Анализируются расчетные данные ЭУ, ее конструктивные особенности, план расположения основного оборудования, зданий и сооружений на территории ЭУ, а также данные изысканий о характеристике грунтов на месте расположения ЭУ.

Для расчета потребуется знать или определить следующие параметры: площадь, занимаемая территорией ЭУ — S , максимальное напряжение РУ ЭУ и режим нейтрали электрических сетей, удельное электрическое сопротивление верхнего слоя земли — ρ_1 , удельное сопротивление подстилочного слоя земли — ρ_2 , толщину (мощность) верхнего слоя земли — h_1 , величины сопротивления растеканию естественных заземлителей (рельсы неэлектрифицированных железных дорог, металлические оболочки кабелей, металлические продуктопроводы, кроме горючих веществ и др.).

Эман 2. На плане ЭУ в соответствии с расположением капитальных сооружений (здания; фундаменты трансформаторов, масляных выключателей, разъединителей, разрядников; кабельные каналы, маслосборные продуктопроводы, водопровод, рельсы железнодорожных путей, фундаменты железобетонных стоек и металлических опор и др.) прокладывается горизонтальный сетчатый заземлитель из продольных и поперечных заземляющих проводников из полосовой или арматурной стали сечением не менее 48 мм² согласно Правил. Ширина ячейки сетчатого горизонтального заземлителя принимается, как правило, 6—7 м.

Эман 3. При двухслойной структуре проводящего пространства земли определяется эквивалентное удельное сопротивление грунта. Ранее показано, что любые многослойные структуры проводящего пространства земли можно привести к эквивалентным двухслойным, однако в задачу этого учебника не входит знакомство с этими сложными методами расчета, применяемыми крайне редко в практике проектирования ЗУ.

Измеренное удельное сопротивление верхнего слоя проводящего пространства земли при окончательном расчете сопротивления с помощью поправочных коэффициентов приводится к эквивалентному, учитывающему состояние проводящего пространства во время измерения (табл. 4.13) и его сезонные изменения.

Таблица 4.13

Поправочные коэффициенты к значению измеренного (рассчитанного на основе измерений удельного сопротивления) сопротивления ЗУ для средней полосы России

Тип заземлителя	Размеры	$t = 0,7-0,8$ м			$t = 0,5$ м		
		K_1	K_2	K_3	K_1	K_2	K_3
Горизонтальная полоса	$l = 5$ м	4,3	3,6	2,9	8,0	6,2	4,4
	$l = 20$ м	3,6	3,0	2,5	6,5	5,2	3,8
Заземляющая сетка или контур	$S = 400$ м ²	2,6	2,3	2,0	4,6	3,8	3,2
	$S = 900$ м ²	2,2	2,0	1,8	3,6	3,0	2,7
	$S = 3600$ м ²	1,8	1,7	1,6	3,0	2,6	2,3
Заземляющая сетка или контур с вертикальными электродами длиной 5 м	$S = 900$ м ² $n \geq 10$ шт.	1,6	1,5	1,4	2,1	1,9	1,8
	$S = 3600$ м ² $n \geq 15$ шт.	1,5	1,4	1,3	2,0	1,9	1,7
Одиночный вертикальный заземлитель	$l = 2,5$ м	2,0	1,75	1,5	3,8	3,0	2,3
	$l = 3,5$ м	1,6	1,40	1,3	2,1	1,9	1,6
	$l = 5,0$ м	1,3	1,15	1,15	1,6	1,45	1,3

Сезонный коэффициент выбирается при изысканиях в теплый или переходный периоды года: K_1 — при влажном состоянии грунта в период измерений или при измерениях после выпадения осадков, K_2 — при средней влажности грунта, K_3 — при сухом грунте и выпадении осадков ниже нормы.

С помощью номограммы относительных сопротивлений плоского круглого заземлителя в двухслойной проводящей среде (рис. 4.29) определяется эквивалентное удельное сопротивление проводящего пространства земли ρ_3 с учетом относительных размеров ЗУ на основе расчетных значений коэффициентов A и B :

$$A = \frac{h_1}{r_{\text{ЭКВ}}}, \quad B = \frac{\rho_2}{\rho_1}, \quad r_{\text{ЭКВ}} = 0,565\sqrt{S},$$

где $r_{\text{ЭКВ}}$ — эквивалентный радиус ЗУ в виде плоского горизонтального диска, эквивалентного по площади ЗУ сложной формы; S — площадь сетчатого горизонтального ЗУ сложной формы.

Заман 4. Определяется сопротивление растеканию горизонтального сетчатого ЗУ из соотношения

$$R_{\text{сз}} = A_{\text{сз}} K_n \frac{\rho_3}{\sqrt{S}},$$

где $A_{\text{сз}}$ — коэффициент, учитывающий особенность конструкции сетчатого ЗУ по сравнению с плоской круглой пластиной и зависящий от числа ячеек сетчатого ЗУ и горизонтального размера полосы (прутка), из которого он изготовлен, а также величины заглубления в грунт; определяется из табл. 4.11 или номограмм, приведенных на рис. 4.32; промежуточные значения определяются методом линейной интерполяции; K_n — поправочный коэффициент сезонного изменения сопротивления ЗУ для средней полосы (см. табл. 4.13); ρ_3 — эквивалентное удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м.

Для двухслойного грунта ρ_3 зависит от соотношения B удельных сопротивлений верхнего и подстилочных слоев и относительного соотношения толщины верхнего слоя земли до поверхности ЗУ ($h_1 - t$) и эквивалентного радиуса плоского ЗУ $r_{\text{ЭКВ}}$:

$$B = \rho_2/\rho_1, \quad A = (h_1 - t)/r_{\text{ЭКВ}},$$

где ρ_2 — удельное электрическое сопротивление подстилочного слоя земли, Ом·м; ρ_1 — удельное электрическое сопротивление верхнего слоя земли, Ом·м; t — глубина расположения плоского ЗУ, м; h_1 — толщина (мощность) верхнего слоя земли, м; $r_{\text{ЭКВ}}$ — эквивалентный радиус плоского ЗУ площадью S , м.

Величина $\rho_{\text{э}}$ определяется коэффициентом K в зависимости от параметров A и B из номограммы рис. 4.29 с помощью соотношения $\rho_{\text{э}} = K\rho_1$.

Сопротивление растеканию может быть определено с помощью значения относительного сопротивления $R_{\text{зУ}}^*$ из этой же номограммы рис. 4.29 и соотношения

$$R_{\text{сз}} = R_{\text{зУ}}^* \frac{R_r}{R} \frac{\rho_{\text{э}}}{r_{\text{ЭКВ}}}$$

Эман 5. Полученное значение сопротивления ЗУ сравнивается с нормируемым $R_{\text{н}}$. Если оно оказывается больше нормируемого, определяется необходимое сопротивление растеканию естественных ЗУ и искусственных вертикальных заземляющих электродов из соотношения

$$R_{\text{э}} = \frac{R_{\text{сэ}} R_{\text{н}}}{R_{\text{сэ}} - R_{\text{н}}}$$

Эман 6. Выявляются естественные ЗУ, перечисленные в пп. 4.2.1, и рассчитывается их сопротивление растеканию. При этом подземные металлические коммуникации, а также рельсы подъездных путей используются в качестве естественных ЗУ только с разрешения предприятий и служб, осуществляющих их эксплуатацию.

Ограничения в применении металлических коммуникаций и рельсов в качестве естественных ЗУ вызваны следующими возможными обстоятельствами:

- изменениями условий электробезопасности при использовании коммуникаций из-за внесенных или вынесенных опасных потенциалов ЭУ;
- электрической коррозией ЗУ из-за протекающего постоянного тока тяговой сети;
- созданием условий для искрообразования в пожаро- и взрывоопасных технологиях;
- нарушением функционирования рельсовых цепей автоблокировки и электрической централизации .

Изменение условий электробезопасности при использовании протяженных металлических конструкций или рельсов в качестве ЗУ состоит в возможности «вынесения» потенциала ЭУ за ее пределы и «внесение» потенциала на ЗУ от посторонних источников

или потребителей электроэнергии, находящихся за пределами ЭУ. Это обстоятельство может ухудшить условия электробезопасности как для персонала, обслуживающего коммуникации, так и для персонала, обслуживающего ЭУ.

Для предотвращения ухудшения условий электробезопасности присоединение коммуникаций к заземляющему проводнику осуществляют не ближе 30 м от ближайших выводов коммуникаций из земли.

При использовании коммуникаций, расположенных вблизи трассы (рельсов) электрического рельсового транспорта (ЭТ), нужно считаться с возможностью электрической коррозии подземных сооружений и самого ЗУ, поэтому нельзя применять для защитного заземления коммуникации, снабженные защитой от коррозии, или тяговые рельсы ЭТ постоянного тока.

На тяговые рельсы ЭТ постоянного тока разрешается заземлять только отдельные конструкции (опоры контактной сети, светофоры, ЗУ постов секционирования, пунктов параллельного соединения, мосты, путепроводы и др.) с применением специальных мер защиты от электрической коррозии.

Участки рельсового пути с электрической тягой постоянного тока можно применять в качестве естественных заземления для защитного ЗУ, если они не применяются для процесса электрической тяги и электрически изолированы от остальных участков с помощью изолированных стыковых соединителей рельсового пути.

Применение рельсов в качестве естественных ЗУ на участках электротяги переменного тока или на неэлектрифицированных линиях в основном ограничивается возможным нарушением функционирования рельсовых цепей автоблокировки.

В случае подключения ЗУ при электрической тяге постоянного тока к тяговым нитям однониточных рельсовых цепей ток помехи в цепи заземления на рельсовую сеть не должен превышать 1,2 А при рельсовых цепях с частотой 50 Гц, 10 А — при рельсовых цепях 25 или 75 и более Гц при длительности более 2 с.

При подключении ЗУ с электротягой постоянного тока к среднему выводу дроссель-трансформатора двухниточной рельсовой цепи ток помехи в цепи заземления на рельсовую сеть не должен превышать 5 А при рельсовых цепях 25 или 50 Гц и применении

автоматической локомотивной сигнализации (АЛС); 50 А без применения АЛС в тех же случаях при длительности более 2 с.

Сопrotивление растеканию рельсового пути. Входное сопротивление рельсового пути определяется типом рельсов, числом путей, величиной переходного сопротивления рельсы—земля. По экспериментальным данным максимальное переходное сопротивление однопутного участка пути рельсы-земля в условиях вечномерзлых грунтов составляет 15 000 Ом·м (15 Ом·км).

Расчет сопротивления растеканию участка рельсового пути можно проводить приближенно по соотношению при $0,01 < l < 1,0$ км

$$Z_e = R_e \approx \frac{r_{II}}{nl},$$

где r_{II} — переходное погонное сопротивление «подземная магистраль—грунт» или «рельсы—земля» в наиболее неблагоприятный период года (табл. 4.12), Ом·км; n — число путей (магистралей) участка; l — длина участка, км.

Таблица 4.14

Максимальные значения переходного сопротивления «рельсы—земля» r_{II}

Переходное сопротивление одного пути, Ом·км	Климатические зоны			
	I	II	III	IV
Станционные и магистральные пути	20	15	10	5
Пути ангаров и депо	5	4	3	2

При неограниченной длине магистрали или рельсового пути в *одну сторону* необходимо учитывать продольное сопротивление рельсового пути и определять сопротивление естественного ЗУ из соотношения

$$Z_e = \frac{\sqrt{z_p r_{II}}}{n},$$

где z_p — продольное сопротивление 1 км магистрали или 1 км рельсовой линии с учетом стыков, Ом/км; n — число рельсовых путей.

При неограниченной длине магистрали или рельсового пути в *обе стороны* от места подключения их сопротивление растеканию (входное сопротивление) можно определить по формуле

$$Z_e = \frac{\sqrt{z_p r_{II}}}{2n}.$$

Сопротивление растеканию *железобетонных конструкций*, применяемых в качестве естественных ЗУ, может быть подсчитано с помощью методики, изложенной в пп. 4.2.4.

Сопротивление растеканию подземных частей железобетонных конструкций, занимающих большие площади, приближенно может быть определено из соотношения

$$Z_{\text{э}} = R_{\text{е}} \approx 0,5 \frac{\rho_{\text{э}}}{\sqrt{S}},$$

где $\rho_{\text{э}}$ — расчетное эквивалентное удельное сопротивление проводящего пространства земли, Ом·м; S — площадь железобетонных фундаментов в плане, м².

Замечание 7. При отсутствии естественных заземлителей или при недостаточном сопротивлении растеканию выявленных естественных заземлителей ЗУ дополняется вертикальными заземлителями (вертикальными электродами ЗУ).

Суммарное сопротивление вертикальных электродов $R_{\text{в}}$ можно рассчитать с учетом их коэффициентов использования $\eta_{\text{в}}$ (табл. 4.15) и коэффициентов использования плоского горизонтального сетчатого заземляющего устройства $\eta_{\text{г}}$ (табл. 4.16), соединяющего вертикальные электроды между собой. Коэффициенты использования учитывают эффект взаимного влияния электрических полей токов вертикальных электродов друг на друга и полей токов вертикального электрода и СЗ между собой и за счет этого несколько увеличивают сопротивление растеканию сложного ЗУ.

Таблица 4.15

Коэффициенты использования $\eta_{\text{в}}$ вертикальных электродов сложного ЗУ без учета полосы связи

Число заземляющих электродов n , шт.	Отношение расстояний между электродами к их длине, a/l					
	1	2	3	1	2	3
	При размещении в ряд			При размещении по контуру		
2	0,85	0,91	0,94			
4	0,73	0,83	0,89	0,69	0,78	0,85
6	0,65	0,77	0,85	0,61	0,73	0,80
10	0,59	0,74	0,81	0,56	0,68	0,76
20	0,48	0,67	0,76	0,47	0,63	0,71
40				0,41	0,58	0,66
60				0,39	0,55	0,64
100				0,36	0,52	0,62

Без учета естественных ЗУ необходимое сопротивление вертикальных заземляющих электродов можно получить из соотношения

$$R_B = \frac{R_H R_{c3} m \eta_B}{R_{c3} - R_H \eta_B},$$

где R_B — необходимое сопротивление растеканию n вертикальных электродов, Ом.

Таблица 4.16

Коэффициенты использования η_r горизонтальной полосы, соединяющей вертикальные электроды сложного ЗУ

Отношение расстояний между электродами к их длине, a/l	Число электродов, n						
	2	4	6	10	20	40	60/100
При размещении в ряд							
1	0,85	0,77	0,72	0,62	0,42		
2	0,94	0,86	0,84	0,75	0,56		
3	0,96	0,92	0,88	0,82	0,68		
При размещении по контуру							
1		0,45	0,40	0,34	0,27	0,22	0,2/0,19
2		0,55	0,48	0,40	0,32	0,29	0,27/0,23
3		0,70	0,64	0,56	0,45	0,39	0,36/0,33

Предыдущее соотношение можно предварить ориентировочным определением числа вертикальных электродов из соотношений:

$$n = \frac{R_{B1}}{R_B \eta_B}; R_{B1} = \frac{\rho_{\text{э}}}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{7l+4l}{7l+l} \right). \quad (4.18)$$

С учетом естественных заземлителей необходимое сопротивление растеканию вертикальных электродов может быть получено из соотношения

$$\left| R_B \right| \approx \frac{R_H \frac{R_{c3} Z_e}{R_{c3} + Z_e}}{\frac{R_{c3} Z_e}{R_{c3} + Z_e} - R_H}.$$

Приведенное равенство справедливо, так как величина Z_e имеет в основном активную составляющую, практически полностью определяющуюся значением модуля полного электрического сопротивления.

Далее необходимое число вертикальных электродов определяется из соотношений (4.18).

Этап 8. Окончательно подсчитывается сопротивление растеканию сложного ЗУ с учетом всех конструктивных элементов, примененных в проекте.

Подсчитывается суммарный расход металлопроката, объемы земляных работ, в необходимых случаях составляется смета расходов на сооружение ЗУ, схема прокладки сетчатого ЗУ вычерчивается на плане территории ОРУ подстанции. В проекте особо прорабатываются вопросы использования защитного ЗУ для заземления молниеотводов, осветительных мачт, вентильных разрядников, нулевых точек трансформаторов и генераторов.

4.3. Зануление и защитное отключение потребителей электроэнергии

4.3.1. Основные сведения о защитном занулении

Как указывалось выше, *занулением* в электроустановках напряжением до 1 кВ называется преднамеренное соединение частей электроустановки, нормально не находящихся под напряжением, с глухозаземленной нейтралью генератора или трансформатора в сетях трехфазного тока, с глухозаземленным выводом источника однофазного тока, с глухозаземленной средней точкой источника в сетях постоянного тока (рис. 4.33).

Область применения зануления — трехфазные четырехпроводные и пятипроводные электрические сети с глухозаземленной нейтралью и напряжением 660/380, 380/220 и 220/127 В (в числителе — линейное напряжение, в знаменателе — фазное); сети однофазного тока с глухозаземленным выводом и трехпроводные сети постоянного тока с глухозаземленной точкой источника тока.

Трехфазная и однофазная системы с напряжением 220/127 В для вновь проектируемых электрических сетей не используется, так как они являются менее экономичными и на практике имеют ограниченное применение. За рубежом получили распространение пятипроводные электрические сети, имеющие три фазных питающих провода и два нулевых (отдельно рабочий и защитный нулевой провод).

Наиболее широкое применение нашли трехфазные электрические сети с напряжением 380/220 В, потому что такие сети обеспечивают совместное питание силовых трехфазных электроприемни-

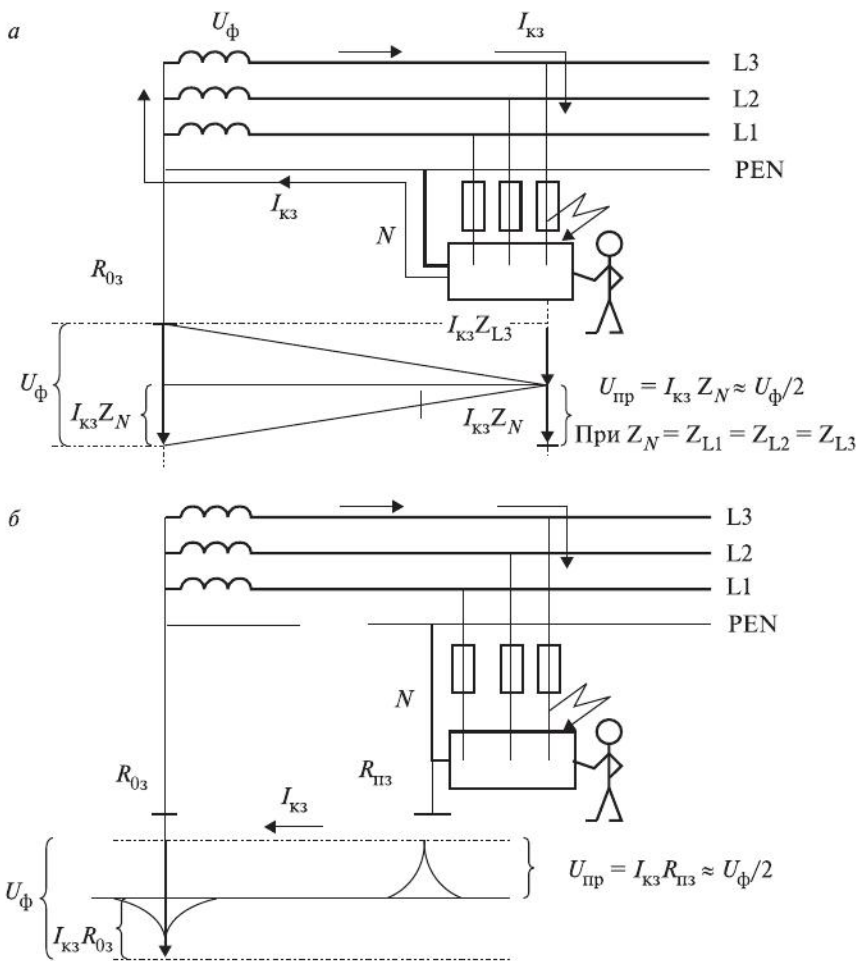


Рис. 4.33. Схема зануления электроустановок:

а — схема и потенциальная диаграмма напряжений короткозамкнутой цепи; *б* — то же, с повторным заземлителем с $R_{ПЗ} = R_{03}$ при обрыве нулевого провода

ков (электродвигатели, трансформаторы и т.п.) и однофазных установок (электроосветительные, электронагревательные приборы т.п.).

Электрическими сетями с глухозаземленной нейтралью называют трехфазные сети, у которых нулевая точка (нейтраль) вторичной обмотки питающего трансформатора, генератора электричес-

ки соединена с помощью заземляющего проводника с заземляющим устройством, имеющим сопротивление R_0 .

Нейтраль генератора, трансформатора на стороне до 1 кВ должна быть присоединена к ЗУ при помощи заземляющего проводника, сечение которого должно быть не менее указанного в табл. 4.17. Использование нулевого рабочего проводника, идущего от нейтрали генератора или трансформатора на щит распределительного устройства, в качестве заземляющего проводника не допускается. Указанное заземляющее устройство располагается в непосредственной близости от питающего трансформатора (допускается рядом со стеной здания подстанции).

Таблица 4.17

Наименьшие сечения заземляющих и нулевых защитных проводников

Наименование	Медь	Алюминий	Сталь		
			в зданиях	в наружных установках	в земле
Неизолированные проводники: сечение, мм ² диаметр, мм	4 —	6 —	— 5	— 6	— 10
Изолированные провода: сечение, мм ²	1,5 (1)	2,5	—	—	—
Заземляющие и нулевые жилы кабелей и многожильных проводов в общей защитной оболочке с фазными жилами: сечение, мм ²	1	2,5	—	—	—
угловая сталь: толщина полки, мм	—	—	2	2,5	4
полосовая сталь: сечение, мм ² толщина, мм	— —	— —	24 3	48 4	48 4
водогазопроводные трубы (стальные): толщина стенки, мм	—	—	2,5	2,5	3,5
тонкостенные трубы (стальные): толщина стенки, мм	—	—	1,5	2,5	Не допускается

Согласно ПУЭ в четырехпроводных трехфазных сетях (TN-C) глухое заземление нейтрали является обязательным.

Как было сказано выше, нулевым защитным проводником в электроустановках до 1 кВ называется проводник, соединяющий зануляемые части (корпуса) с глухозаземленной нейтралью генератора или трансформатора в трехфазных сетях, с глухозаземленным выводом источника в сетях однофазного тока, с глухозаземленной средней точкой источника в сетях постоянного тока. В соответствии с ПУЭ сечение провода нулевого защитного проводника во всех случаях должно быть не менее 50 % фазного проводника, а его проводимость не должна быть меньше проводимости фазного провода.

В качестве заземляющих и нулевых защитных проводников, в том числе с целью увеличения их проводимости, могут быть использованы:

- специально предусмотренные для этой цели проводники;
- металлические конструкции зданий (фермы, колонны и т.п.);
- арматура железобетонных строительных конструкций и фундаментов;
- металлические конструкции производственного назначения (подкрановые пути, каркасы распределительных устройств, галереи, площадки, шахты лифтов, подъемников, элеваторов и т.п.);
- стальные трубы электропроводок;
- алюминиевые оболочки кабелей;
- металлические кожухи и опорные конструкции шинопроводов, металлические короба электроустановок;
- металлические стационарные открыто проложенные трубопроводы всех назначений, кроме трубопроводов горючих и взрывоопасных веществ и смесей, канализации и центрального отопления.

В качестве нулевых защитных проводников должны быть в первую очередь использованы нулевые рабочие проводники кроме следующих случаев:

- при занулении переносных электроприемников;
- при занулении электроустановок во взрывоопасных зонах.

Принцип действия системы зануления — превращение пробоя изоляции на доступный для прикосновения корпус электроустановки в однофазное короткое замыкание (к.з.) в электрической цепи: корпус—нулевой защитный провод—вторичная обмотка трансформатора—корпус, что обеспечивает:

– быстрое и надежное срабатывание защитной аппаратуры (автоматического выключателя или плавкого предохранителя) и отключение поврежденной ЭУ;

– напряжение прикосновения при равенстве проводимостей фазных и нулевого (PEN) провода становится в два раза ниже фазного напряжения.

Таким образом, система зануления (см. рис. 4.33, *а, б*) выполняет две защитные функции:

– обеспечивает надежное отключение при повреждении изоляции в ЭУ;

– снижает напряжение прикосновения в 2 раза.

При отсутствии повторных заземлений и обрыве нулевого провода (см. рис. 4.33, *б*) опасность поражения людей увеличивается, так как пробой изоляции на корпус происходит при отсутствии системы зануления. Все корпуса, соединенные с поврежденным корпусом, оказываются под фазным напряжением относительно земли. Повторные ЗУ нулевого провода устанавливаются на концах ВЛ (или ответвлений от них), через каждые 200 м ВЛ, а также на вводах от ВЛ к электроустановкам (распределительным щитам, вводам в здания), которые подлежат занулению.

При этом в первую очередь следует использовать естественные заземляющие устройства.

Зануление электроустановок следует выполнять:

– при напряжении 380 В и выше переменного тока и 440 В и выше постоянного тока — во всех электроустановках (кроме корпусов электроприемников с двойной изоляцией);

– при напряжениях выше 42 В, но ниже 380 В переменного тока и выше 110 В, но ниже 440 В постоянного тока — в помещениях с повышенной опасностью, особо опасных и в наружных установках;

– при всех напряжениях переменного и постоянного тока — во взрывоопасных зонах.

Если безопасность не может быть обеспечена путем устройства заземления или зануления либо если устройство заземления или зануления вызывает трудности по условиям выполнения или по экономическим соображениям, то рекомендуется применять в качестве основной или дополнительной меры защиты — защитное отключение.

Проектирование зануления включает в себя следующие этапы:

- подготовка исходных данных и составление расчетной схемы замещения системы зануления;
- выбор сопротивления ЗУ нулевой точки трансформатора (генератора) и сопротивления повторных заземляющих устройств;
- расчет отключающей способности защитных аппаратов;
- выбор защитных аппаратов;
- определение максимального напряжения корпуса электроустановки относительно земли и составление заключения об электробезопасности обслуживания электрооборудования.

В качестве исходных данных для расчета системы зануления необходимо иметь:

- схему питания потребителей электроэнергии от трансформаторной подстанции (ТП) до потребителей;
- характеристики ТП (мощность и схему соединения обмоток питающих трансформаторов, напряжения первичной и вторичной сторон);
- характеристики всех элементов электрической сети питания потребителя электроэнергии (конструкция и длина линий, сечения питающих и нулевых проводников, расстояние между фазными и нулевым проводами ВЛ, марки проводов и кабелей);
- удельное сопротивление грунтов в месте заземления нейтрали трансформатора ТП и в местах расположения повторных заземлителей, при реконструкции действующих электроустановок — величину сопротивлений заземляющих устройств нейтрали питающего трансформатора и повторных ЗУ;
- характеристики защитных аппаратов (величину токов срабатывания, полное время отключения электрической цепи, конструктивные особенности исполнения).

Выбор длины и сечения проводов (ВЛ, КЛ, шинопроводов), типа питающего трансформатора осуществляется при выборе схемы электроснабжения потребителей и зависит от мощности и расположения отдельных потребителей.

4.3.2. Выбор сопротивления заземления нейтрали трансформатора и сопротивления заземления повторных заземляющих устройств

Выбор нормальных значений сопротивления заземляющего устройства нулевой точки питающего трансформатора (нейтрали) R_0

и сопротивлений повторных ЗУ R_{Π} осуществляется в зависимости от напряжения электроустановки и удельного сопротивления грунта согласно требованиям ПУЭ, в том числе:

– сопротивление заземления нейтрали трансформатора R_0 в любое время года должно быть не более 2, 4 и 8 Ом соответственно при линейных напряжениях 660, 380 и 220 В источника трехфазного тока или 380, 220, 127 В источника однофазного тока, которое должно быть обеспечено с учетом естественных заземляющих устройств, а также повторных заземляющих устройств нулевого провода ВЛ до 1 кВ. При этом сопротивление искусственного ЗУ должно быть не более 15, 30 и 60 Ом соответственно при тех же напряжениях;

– общее сопротивление всех повторных заземлителей (в том числе и естественных) нулевого провода каждой ВЛ в любое время года должно быть не более 2, 4 и 8 Ом соответственно при линейных напряжениях 660, 380 и 220 В источника тока. При этом сопротивление растеканию заземлителя, каждого из повторных заземлителей, должно быть не более 15, 30 и 60 Ом соответственно при тех же напряжениях;

– при удельном электрическом сопротивлении земли ρ более 100 Ом·м допускается увеличивать указанные нормы в 0,01 ρ раз.

4.3.3. Расчет отключающей способности защитных аппаратов

Согласно ПУЭ для обеспечения надежного автоматического отключения электроустановки при пробое изоляции на корпус проводимость фазных и нулевых защитных проводников должна быть такой, чтобы при замыкании на корпус выполнялось следующее требование к величине кратности тока однофазного короткого замыкания:

$$K = \frac{I_{\text{кз1}}}{I_3} \geq K_{\text{доп}}, \quad (4.19)$$

где $K_{\text{доп}}$ — допустимая кратность тока однофазного короткого замыкания $I_{\text{кз1}}$ по отношению к номинальному току или току срабатывания защитного аппарата I_3 зависит от конструкции аппарата максимального тока (табл. 4.18).

Наименьший расчетный ток однофазного короткого замыкания находится по выражению (в кА)

$$I_{\text{кзл}} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\text{T}}\sqrt{3} + Z_{\text{пт}}}, \quad (4.20)$$

где в знаменателе имеется в виду сумма комплексных величин: $Z_{\text{T}}\sqrt{3}$ — полное сопротивление фазы трансформатора токам однофазного короткого замыкания, мОм; $Z_{\text{пт}}$ — полное сопротивление петли фаза—ноль от трансформатора до точки к.з., мОм; U_{ϕ} — фазное напряжение сети, В.

Таблица 4.18

Выбор кратности тока короткого замыкания

Ток защитного аппарата, I_3	Кратность тока к.з., $K_{\text{доп}}$	
1. Номинальный ток плавкой вставки предохранителя, $I_{\text{н пв}}$	3, во взрывоопасных зонах 4	3, во взрывоопасных зонах 4
2. Номинальный ток установки нерегулируемого $I_{\text{нр}}$ или регулируемого $I_{\text{рр}}$ расцепителя автоматического выключателя, имеющего обратозависимую от тока характеристику	3, во взрывоопасных зонах 6	3, во взрывоопасных зонах 6
3. Уставка тока мгновенного срабатывания (отсечка) $I_{\text{со}}$ автоматического выключателя, имеющего только электромагнитный расцепитель	1,1 · $I_{\text{н}} \cdot N$ для автоматических выключателей с мгновенным расцепителем, где N равно 5, 10, 20 при характеристиках расщепления B , C и D соответственно; $I_{\text{н}}$ — номинальный ток автоматического выключателя	1,4 ($I_{\text{н}} \leq 100$ А) 1,25 ($I_{\text{н}} > 100$ А), где $I_{\text{н}}$ — номинальный ток автоматического выключателя

С учетом индуктивного сопротивления питающей энергосистемы $X_{\text{с}}$ и суммарного переходного сопротивления $R_{\text{н}} = 15$ мОм (рубильников, автоматов, контактов и др.), значение полного сопротивления фазы $Z_{\text{T1}}/3$ может определяться из выражения

$$Z_{\text{T1}} = \sqrt{(X_{1\text{T}} + X_{2\text{T}} + X_{0\text{T}} + 2X_{\text{с}})^2 + (R_{1\text{T}} + R_{2\text{T}} + R_{0\text{T}} + R_{\text{п}})^2}, \quad (4.21)$$

где $X_{1\text{T}}$, $R_{1\text{T}}$ — индуктивное и активное сопротивление трансформатора токам прямой последовательности, мОм; $X_{2\text{T}}$, $R_{2\text{T}}$ — то же токам обратной последовательности, мОм; $X_{0\text{T}}$, $R_{0\text{T}}$ — то же токам нулевой последовательности, мОм.

Значения полных, активных и индуктивных сопротивлений трансформаторов на напряжение 6 (10)/0,4 кВ приведены в табл. 4.19.

Таблица 4.19

**Полные активные и индуктивные сопротивления трансформаторов
напряжением 6(10)/0,4 кВ**

Мощность, кВ·А	Схема соединения	$U_k, \%$	$X_{1T}, X_{2T},$ МОм	$X_{0T},$ МОм	$R_{1T}, R_{2T},$ МОм	$R_{0T},$ МОм	$Z_{T1}/3,$ МОм
25	звезда- звезда	4,5	243,6		153,9		1037
40		4,5	157		88		649
63		4,5	102		52		412
100		4,5	64,7	582	31,5	253,9	260
160		4,5	41,7	367	16,6	150,8	162
250		4,5	27,2	235	9,4	96,5	104
400		4,5	17,1	149	5,5	55,6	65
630		5,5	13,6	96	3,1	30,3	43
1000		5,5	8,5	61	2,0	19,1	27
1600		5,5	4,9	38	1,3	11,9	16,6
25	треугольник- звезда	4,7	243	243	176	176	302
40		4,7	159	159	87	87	187
63		4,7	105	105	59	59	120
100		4,5	66	66	36,3	36,3	75,3
160		4,5	43	43	19,3	19,3	47
250		4,5	27	27	10,7	10,7	30
400		4,5	17	17	5,9	5,9	18,7
630		5,5	13,5	13,5	3,4	3,4	14
1000		5,5	8,6	8,6	2,0	2,0	9
1600		5,5	5,4	5,4	1,1	1,1	5,7

Полное сопротивление участков линии петли фаза-нуль равно

$$Z_{пт} = Z_{пу1} L_1 + Z_{пу2} L_2 + \dots + Z_{пуn} L_n, \quad (4.22)$$

где $Z_{пуn}$ — полное удельное сопротивление n -го участка петли фаза—нуль от трансформатора до точки к.з., МОм/м; L_n — длина n -го участка петли фаза—нуль, м.

Полное удельное сопротивление n -го участка линии петли фаза—нуль может быть определено из выражения

$$Z_{пуn} = \sqrt{(R_{фуп} + R_{нуп})^2 + (X_{внуп} + X_{фуп} + X_{нуп})^2}, \quad (4.23)$$

где $R_{фуп}$, $R_{нуп}$ — активное удельное сопротивление соответственно фазного и нулевого провода, МОм/м; $X_{фуп}$, $X_{нуп}$ — внутреннее индуктивное удельное сопротивление фазного и нулевого проводов, МОм/м; $X_{внуп} = 0,126 \ln(2D/d_p)$ — внешнее индуктивное удельное сопротивление n -го участка петли фаза—нуль, МОм/м; D — максимальное расстояние между фазными и нулевым проводами ВЛ, м; d_p — расчетный диаметр нулевого провода ВЛ, м.

При расчетах по формуле (4.21) активное удельное сопротивление проводов необходимо определять при следующей максимальной допустимой температуре:

80° С для кабелей с бумажной изоляцией; 70 °С для неизолированных проводов ВЛ; 65 °С для кабелей с резиновой и пластмассовой изоляцией;

80° С для алюминиевой оболочки трехжильных кабелей, используемой в качестве нулевого провода, по формуле

$$R_{уд} = R_{уд20}[1 + \alpha(t_{доп} - 20)], \quad (4.24)$$

где $R_{уд}$ – удельное сопротивление провода при максимальной допустимой температуре $t_{доп}$, °С; $R_{уд20}$ – удельное сопротивление провода при температуре провода 20 °С; α – температурный коэффициент (для меди 0,0041 1/°С; для стали 0,006 1/°С; для алюминия 0,0044 1/°С).

Активное и внутреннее индуктивное удельные сопротивления стальных проводов зависят от тока и определяются по опытным данным. Внутреннее индуктивное сопротивление медных и алюминиевых проводов незначительно по сравнению с внешним и в расчетах им можно пренебречь. Внешнее индуктивное удельное сопротивление кабельной линии при напряжениях до 1 кВ в расчетах можно принимать равным 0,06 мОм/м.

Для четырехжильных кабелей в алюминиевой оболочке для невзрывоопасных зон принимается суммарная проводимость нулевой жилы и оболочки.

Для взрывоопасных зон проводимость алюминиевой оболочки не учитывается, определяется только сопротивление жилы кабеля, используемой в качестве нулевого провода.

4.3.4. Выбор плавких предохранителей

Плавкий предохранитель представляет собой защитный аппарат, работа которого основана на отключении электрической цепи за счет перегорания плавкой вставки под действием протекающего по ней электрического тока.

Плавкие предохранители характеризуются следующими основными параметрами:

– номинальное напряжение предохранителя, т.е. такое напряжение электрической сети, при котором предохранитель может работать длительное время;

– номинальный ток предохранителя $I_{\text{нп}}$ — ток, на который рассчитаны токоведущие части предохранителя и контактные соединения по условию длительного нагрева, а также прочность корпуса;

– номинальный ток плавкой вставки $I_{\text{нпв}}$ — ток, который выдерживает плавкая вставка без плавления длительное время;

– предельный отключаемый ток предохранителя — максимальное действующее значение периодической составляющей тока, который может отключить предохранитель;

– время — токовая (защитная) характеристика предохранителя — зависимость продолжительности перегорания плавкой вставки от величины протекающего по ней тока.

Технические данные и характеристики предохранителей на номинальное напряжение 380 В приводятся в их паспортных данных. Конструкции предохранителей могут быть разборными и неразборными, в разборной конструкции имеется возможность замены плавкой вставки.

Выбор предохранителей для защиты одиночных электроприемников (ЭП) производится с учетом следующих условий:

$$I_{\text{нп}} \geq I_{\text{н}}, \quad (4.25)$$

где $I_{\text{н}}$ — номинальный ток электроприемника, потребителя, А.

$$I_{\text{нпв}} \geq I_{\text{н}}, \quad (4.26)$$

$$I_{\text{нпв}} \geq I_{\text{пуск}}/\alpha, \quad (4.27)$$

где α — коэффициент, учитывающий длительность пуска; $\alpha = 2,5$ для асинхронных двигателей с легкими условиями пуска (длительность пуска 0,5–2 с) и $\alpha = 1,8$ — с тяжелыми условиями пуска (длительность пуска 5–10 с); $I_{\text{пуск}} = 6I_{\text{н}}$ — пусковой ток одиночного электродвигателя, А; $I_{\text{н}} = P_{\text{н}}/(3U_{\text{ф}} \cos \varphi)$ — номинальный ток электродвигателя, А; $P_{\text{н}}$ — номинальная мощность электродвигателя, Вт; $U_{\text{ф}}$ — фазное напряжение сети, В; $\cos \varphi = 0,87$ — коэффициент мощности электродвигателя.

$$I_{\text{нпв}} \leq I_{\text{кз}}/K_{\text{доп}}, \quad (4.28)$$

где $K_{\text{доп}} = I_{\text{кз}}/I_{\text{н}}$ — отношение тока однофазного короткого замыкания к максимальному рабочему току нагрузки.

Минимальное значение допустимой кратности тока однофазного к.з. нормируется в Правилах (табл. 4.20).

4.3.5. Выбор автоматических выключателей

Современные электромагнитные выключатели в ЭУ до 1000 В выбираются по токовременным характеристикам выключателей,

которые приведены в паспортных данных и в справочниках по коммутационным аппаратам для ЭУ до 1000 В. Наиболее распространены в настоящее время выключатели, имеющие в конструкции электромагнитный выключатель и нерегулируемый (тепловой) расцепитель, что позволяет осуществлять защиту ЭУ потребителя от аварийных режимов с помощью электромагнитного выключателя и от длительной перегрузки с помощью нерегулируемого теплового расцепителя.

Таблица 4.20

Минимальные значения допустимой кратности тока однофазного короткого замыкания в электроустановках до 1 кВ

Ток защитного аппарата, I_z	Кратность тока, % (КДОП)
1. Номинальный ток плавкой вставки предохранителя, $I_{нпв}$	300 % (3,0)
2. Ток уставки автоматического выключателя $I_{нр}$, имеющего только максимальный мгновенно действующий расцепитель (отсечку)	450 % (4,5)
3. Номинальный ток расцепителя автоматического выключателя с нерегулируемой обратно зависящей от тока характеристикой (независимо от наличия или отсутствия отсечки)	100 % (1,0)
4. Ток трогания расцепителя автоматического выключателя с регулируемой обратно зависящей от тока характеристикой	125 % (1,25)
5. Если на автоматическом выключателе по п. 4 имеется еще отсечка	Кратность тока срабатывания не ограничивается

Автоматические выключатели по конструкции могут быть одно-, двух- и трехполюсными и служат для автоматического отключения ЭУ при повреждениях, перегрузках, а также для включения и отключения токов нагрузки. Управление выключателями может быть ручное или дистанционное.

Автоматическое отключение выключателя при токе к.з. и перегрузках осуществляется встроенным в выключатель расцепителем тока, или сокращенно расцепителем, который бывает следующих типов:

– тепловой расцепитель, имеющий обратно зависимую от тока характеристику продолжительности срабатывания, используется для защиты от перегрузок и является резервным при защите от токов к.з.;

- электромагнитный расцепитель (токовая отсечка) с малой продолжительностью срабатывания, предназначен для защиты от КЗ;
- комбинированный расцепитель, состоящий из теплового и электромагнитного расцепителей.

Автоматические выключатели характеризуются следующими основными параметрами:

- номинальным напряжением — напряжением, при котором обеспечивается длительная работа выключателя;
- номинальным током выключателя $I_{нв}$ — максимальным длительным током главных контактов выключателя;
- номинальным током расцепителя $I_{нр}$ — максимальным длительным током, при котором расцепитель может работать неограниченно долго, не срабатывая;
- током уставки расцепителя $I_{ср}$ — наименьшим током срабатывания расцепителя, на который он настраивается;
- током мгновенного срабатывания (током отсечки) электромагнитного расцепителя $I_{со}$.

Технические данные и характеристика некоторых автоматических выключателей типа ВА, АД, ВД приводятся в технических характеристиках на продукцию и справочниках (табл. 4.21).

Таблица 4.21

Технические характеристики автоматических выключателей ВА 47-29 (100)

Технические характеристики	Тип выключателя	
	ВА-47-29	ВА-47-100
Номинальное напряжение частотой 50 Гц, В	230/400	230/400
Номинальный ток $I_{н}$, А	0,5; 1,6; 2,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 13; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63	10, 16, 25, 32, 35, 40, 50, 63, 80, 100
Номинальная отключающая способность, А	4500	10 000
Характеристики срабатывания электромагнитного расцепителя	В, С, D	С, D
Число полюсов	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4
Максимальное сечение присоединяемых проводов, мм ²	25	35

При выборе выключателей для защиты одиночных ЭП должны выполняться следующие условия:

$$I_{\text{нв}} \geq I_{\text{н}}; \quad (4.29)$$

$$I_{\text{нр}} \geq I_{\text{н}}; \quad (4.30)$$

$$I_{\text{со}} \geq K_{\text{н}} I_{\text{пуск}}; \quad (4.31)$$

где $K_{\text{н}}$ — коэффициент надежности отстройки отсечки от пускового тока электродвигателя, равный 1,8 для выключателей типа АВМ; 2,1 — для выключателей типов ВА; 1,9 — для выключателей типов А3120, А3130, А3140;

$$I_{\text{нр}} \leq I_{\text{кз}}/K_{\text{доп}} \quad (4.32)$$

для выключателей с тепловым, комбинированным или электромагнитными автоматическими выключателями (расцепителями); коэффициент кратности $K_{\text{доп}}$ приведен в табл. 4.18.

Выбор автоматических выключателей осуществляется непосредственно по токовым временным характеристикам срабатывания электромагнитных расцепителей В, С, D или по соотношению $1,1I_{\text{ном}}N$, где $N = 5, 10, 20$ (соответственно для характеристик В, С, D), $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток автоматического выключателя.

4.3.6. Определение максимального напряжения прикосновения на корпусе электроустановок при применении зануления

Все рассмотренные выше аппараты защиты ЭУ могут применяться для электрического питания ЭП в электрических сетях с системой зануления. Однако следует иметь в виду, что они не всегда будут обеспечивать полную электробезопасность для ремонтного персонала и других лиц, обслуживающих эти ЭУ, т.е. зануление не будет в полной мере выполнять защитную функцию снижения напряжения прикосновения до безопасного уровня. Это связано с тем, что на корпусах оборудования, выполненных по системе TN-C, могут возникать в аварийных режимах напряжения, превышающие предельно допустимые уровни.

Максимальное напряжение на корпусе ЭУ относительно удаленной земли при пробое изоляции определяется из выражений (см. рис. 4.33):

$$U_{\text{к}} = I_{\text{кз}} z_{\text{н}} \quad \text{или}$$

$$U_{\text{к}} = I_{\text{кз}} R_{\text{эп}} \quad (\text{при обрыве нулевого провода}), \quad (4.33)$$

где $R_{\text{эп}}$ — эквивалентное сопротивление повторных заземлителей, Ом; $z_{\text{н}}$ — полное сопротивление n участков нулевого провода от нейтрали питающего трансформатора до точки пробоя изоляции, Ом;

$$Z_n = z_{\text{нуд}1} L_1 + z_{\text{нуд}2} L_2 + \dots + z_{\text{нуд}n} L_n,$$

где $z_{\text{нуд}n}$ — полное удельное сопротивление n -го участка нулевого провода от питающего трансформатора до точки короткого замыкания:

$$z_{\text{нуд}n} = \sqrt{(r_{\text{нуд}n})^2 + (x_{\text{нуд}n})^2}, \quad (4.34)$$

где $r_{\text{нуд}n}$ и $x_{\text{нуд}n}$ — активное и индуктивное удельное сопротивление n -го участка нулевого провода от трансформатора до точки короткого замыкания.

Для оценки электробезопасности обслуживания ЭУ при аварийных режимах замыкания на землю необходимо знать не только величину возможного напряжения прикосновения, но и продолжительность аварийного режима.

Нормируемые величины предельно допустимых уровней напряжений также существенно различаются для производственных и бытовых электроустановок.

Как было сказано ранее, предельные допустимые уровни напряжений прикосновения и токов $U_{\text{пду пр}}$ установлены для путей тока в теле человека от одной руки к другой и от руки к ногам (ладонь—ладонь, ладонь—ступни, ладони—ступни, ступня—ступня). Эти уровни напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека в течение более 1 с до 10 с, соответствуют отпускающим (переменным) и неболевым (постоянным) токам. В то же время они должны быть меньше напряжения прикосновения, которое определяется из соотношения

$$U_{\text{пр}} = \alpha_{\text{пр}} U_{\text{к}}, \quad (4.35)$$

где $\alpha_{\text{пр}}$ — коэффициент прикосновения, $\alpha_{\text{пр}} < 1$.

Таким образом, должно выполняться соотношение

$$U_{\text{ПДУпр}} \left(\text{при } t_{\text{норм}} \right) \geq \alpha_{\text{пр}} I_{\text{К1}} R_{\text{ЭП}} \left(\text{при } t_{\text{откл}} \right). \quad (4.36)$$

Напряжение прикосновения к корпусу электроустановки $U_{\text{пр}}$ при известной полной продолжительности процесса отключения защитными аппаратами (предохранителями и автоматическими выключателями) $t_{\text{откл}}$ должно быть меньше величины предельно допустимого уровня напряжения прикосновения $U_{\text{ПДУпр}}$ при нормируемой продолжительности воздействия $t_{\text{норм}}$ электрического тока на организм человека.

Существующие защитные аппараты имеют разную продолжительность отключения ЭУ, поэтому при расчетах для оценки элект-

требезопасности могут быть приняты следующие максимальные ее значения:

- для выключателей с электромагнитным или комбинированным расцепителем $t_{\text{выкл}} = 0,05$ с;
- для выключателей с тепловым расцепителем при токах величиной до $10I_{\text{нр}}$, $t_{\text{выкл}} > 1$ с (т.е. при 10-кратном превышении тока установки выключателя продолжительность срабатывания больше 1 с).
- для плавких вставок предохранителей при токах, величиной до $5I_{\text{нпв}}$, $t_{\text{выкл}} > 1$ с.

При больших токах к. з. определение продолжительности отключения ЭУ плавкими вставками предохранителей можно осуществить по ампер-секундным защитным характеристикам, а в случае использования выключателей с тепловым расцепителем необходимо воспользоваться их защитными характеристиками.

4.3.7. Защитное отключение электроустановок

Защитным отключением в электроустановках до 1 кВ называется автоматическое отключение всех фаз (полюсов) участка сети, обеспечивающее безопасные для человека сочетания тока и продолжительности его прохождения при замыканиях на корпус или снижении уровня изоляции ниже определенного значения.

Защитное отключение рекомендуется применять в качестве основной или дополнительной меры защиты, если безопасность не может быть обеспечена путем устройства заземления или зануления либо если вызывает трудности по условиям выполнения или по экономическим соображениям. Защитное отключение должно осуществляться устройствами (аппаратами), удовлетворяющими в отношении надежности действия специальным техническим условиям.

Впервые систематизация устройств защитного отключения была осуществлена в работах Е.Ф. Цапенко, где защитное отключение электрических сетей до 1 кВ с изолированной нейтралью рассматривалось в качестве одной из форм контроля изоляции. В настоящее время устройства защитного отключения (УЗО) широко применяются в практике защиты и автоматики систем электропитания.

Можно сформулировать *основные требования к системе защитного отключения*, обеспечивающей безопасность человека:

– повышенная надежность срабатывания, вероятность отказа не должна превышать 10^{-6} , т.е. $p_0 \leq 10^{-6}$;

– высокое быстродействие, а именно: продолжительность отключения, складывающееся из продолжительности действия защиты t_3 и продолжительности действия автомата или выключателя с приводом t_B , не должна превышать 0,2 с, т.е. $t_{\text{откл}} < t_3 + t_B < 0,2$ с;

– исключение ложных срабатываний, а в случаях невозможности полного их исключения осуществление защитного отключения устройствами автоматического повторного включения (АПВ);

– высокая чувствительность и точность работы с возможными отклонениями по параметру отключения до ± 2 %.

К сожалению, большинство схем защитного отключения не обладают свойством селективности (избирательности), т.е. отключают электрическое присоединение полностью, в том числе неповрежденные участки. Это обстоятельство сдерживает широкое применение УЗО.

Устройства защитного отключения работают на основе измерения токов и напряжений нулевой последовательности, возникающих в любых трехфазных электрических сетях при однофазных замыканиях или при несимметричном снижении изоляции фаз трехфазных ЭУ.

Частным случаем снижения изоляции одной из фаз трехфазной ЭУ является случайное прикосновение к фазному проводу человека, что подробно было рассмотрено в гл. 2.

Для измерения токов нулевой последовательности используются схемы фильтров токов и напряжений нулевой последовательности, представляющие собой различные схемы соединения измерительных трансформаторов тока и напряжения (рис. 4.34, а, б), а в электроустановках ниже 1000 В так называемые асимметры или схемы искусственных нулевых точек (рис. 4.35, а, б).

В сетях до 1000 В фильтром нулевой последовательности ФНП может использоваться соединения в звезду трех равных по величине сопротивлений, нулевая точка которых через измерительный прибор или реле присоединяется к заземлению.

В сетях выше 1000 В с эффективно заземленной и изолированной нейтралью ФНП токов и напряжений нулевой последовательности используются для постоянного контроля изоляции ЭУ и для работы аппаратов специальных защит при коротких однофазных замыканиях в сетях и при других повреждениях.

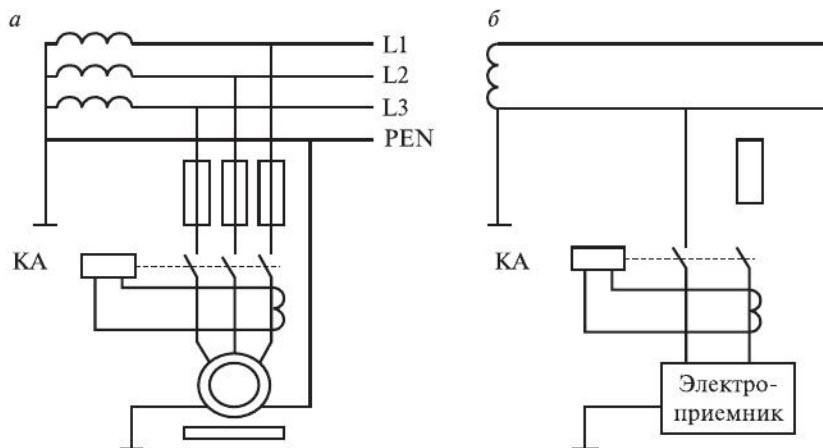


Рис. 4.34. Схемы фильтров токов нулевой последовательности в трехфазной (а) и однофазной сети (б)

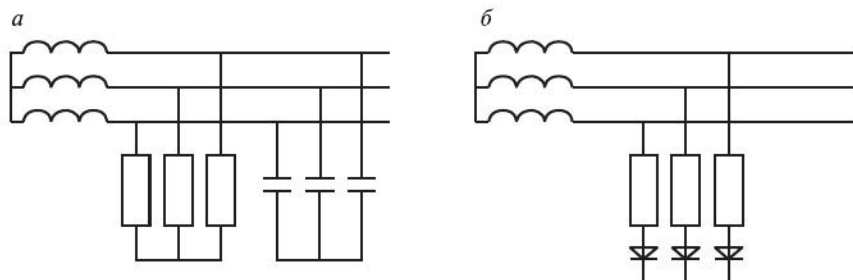


Рис. 4.35. Схемы асимметров или искусственных нулевых точек в электрических сетях с изолированной нейтралью: а — на основе активных или реактивных резисторов; б — на основе полупроводниковых диодов

Система защитного отключения в сетях выше 1000 В не применяется из-за малой вероятности случайных прикосновений в этих сетях и большого ущерба при отключении отдельных присоединений при ложных срабатываниях для энергопотребляющих организаций.

Схемы защитного отключения осуществляются, как правило, на основе применения схемы соединения в звезду трех одинаковых линейных сопротивлений и полупроводниковых диодов (см. рис. 4.35, а, б). Схема позволяет использовать выпрямленный ток нулевой последовательности, что в свою очередь, позволяет ис-

пользовать в качестве аппаратов защиты более надежно работающие электромагнитные реле постоянного тока.

На рис. 4.36 приведена принципиальная схема УЗО с использованием в ФНП полупроводниковых диодов. Датчиком входного сигнала служит ФНП, состоящий из трех последовательных цепей резисторов и полупроводниковых диодов, соединенных в звезду. Для этой цели могут применяться и другие фильтры.

Реле тока, включенное последовательно с регулируемым резистором для регулирования тока уставки, между нулевой точкой ФНП и заземляющим устройством, срабатывает, когда однополупериодный выпрямленный ток нулевой последовательности достигнет тока срабатывания $I_{\text{ср}}$ реле.

В качестве входного сигнала УЗО, кроме токов и напряжений нулевой последовательности, используются величины потенциала корпуса электрического оборудования и тока замыкания на землю.

УЗО, реагирующие на потенциал корпуса, отключают ЭУ при возникновении на заземленном или зануленном корпусе повышенного потенциала по отношению к вспомогательному электроду. На рис. 4.37 представлена принципиальная схема одного из таких устройств.

Устройства, реагирующие на ток замыкания на землю, отключают ЭУ при появлении токов короткого замыкания в заземляющем проводе. Принципиальная схема УЗО этого типа приведена на рис. 4.38.

Входной параметр контролируется токовым реле РТ, обладающим малым сопротивлением и включенным во вторичную обмотку трансформатора тока, установленного в цепи тока замыкания на землю через заземляющий провод. При замыкании одной из фаз на корпус ток, протекающий по заземляющему проводу, вызовет срабатывание реле, которое отключит установку от сети.

Область применения данных УЗО ограничивается теми случаями, когда корпуса ЭУ изолированы от ЗУ или нулевого провода, а следовательно, и один от другого. Такими установками являются ручной электрифицированный инструмент, передвижные ЭУ и т.п. В этом случае защита работает селективно.

Устройства, реагирующие на напряжение нулевой последовательности, отключают ЭУ в сетях с изолированной нейтралью в момент возникновения глухого замыкания одной или двух фаз на землю,

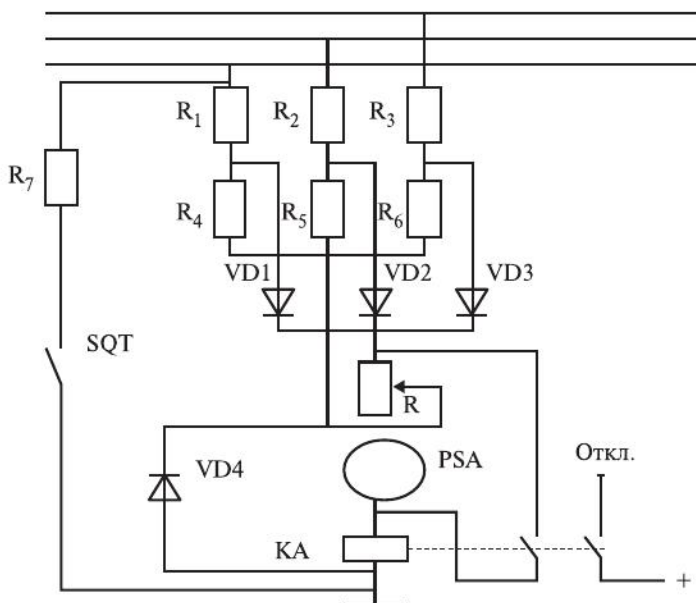


Рис. 4.36. Принципиальная схема защитного отключения в сети с изолированной нейтралью

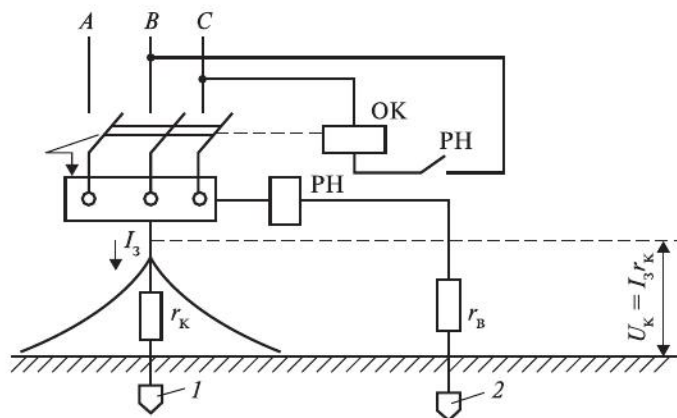


Рис. 4.37. Принципиальная схема УЗО, реагирующая на потенциал корпуса относительно вспомогательного заземления:
 1 — заземляющее устройство корпуса; 2 — вспомогательное заземление; PH — реле напряжения; ОК — отключающая катушка автомата

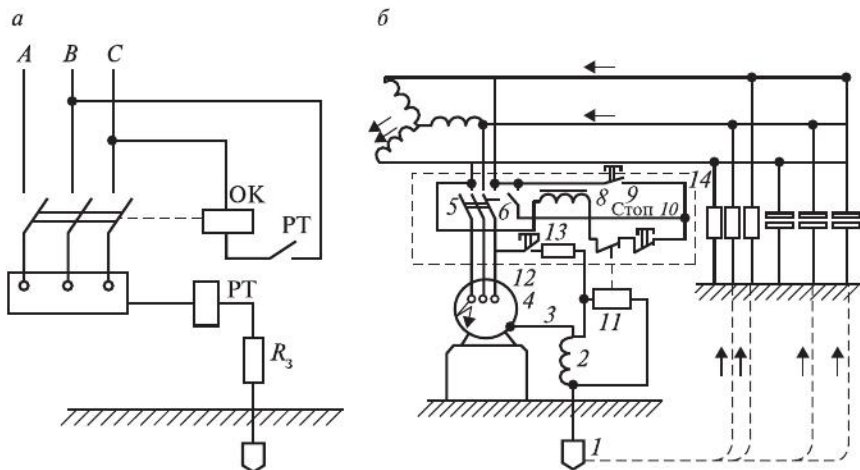


Рис. 4.38. Принципиальные схемы УЗО, реагирующих на ток замыкания на землю:

а — схема со стоковым реле; *б* — схема с трансформатором тока в заземляющем проводе; РТ — токовое реле и его контакт в цепи отключающей катушки; R_3 — сопротивление заземляющего устройства; 1 — заземляющее устройство; 2 — трансформатор тока; 3 — заземляющий провод; 4 — электродвигатель; 5 — контакты пускателя; 6 — блок-контакт; 7 — рабочая катушка; 8 — сердечник пускателя; 9 и 10 — кнопки останова и включения; 11 — реле максимального тока; 12 — кнопка опробования; 13 — вспомогательное сопротивление; 14 — пускатель

в том числе при замыкании фазы на заземленный корпус и при случайном прикосновении человека к токоведущей части ЭУ. Они предназначены для обеспечения безопасности человека при случайном прикосновении к заземленному (зануленному) корпусу при замыкании на него одной из фаз, т.е. может служить дополнительной мерой защиты при наличии защитного заземления или зануления.

Принципиальная схема устройства показана на рис. 4.39. Датчиком входного сигнала служит фильтр напряжения нулевой последовательности, состоящий из трех конденсаторов, соединенных в звезду. Реле напряжения, включенное между нулевой точкой фильтра и землей, срабатывает, когда напряжение нулевой последовательности, т.е. напряжение между нейтральной точкой источника тока и землей U_0 , достигнет значения напряжения срабатывания $U_{ср}$. Выбор уставки реле сводится к определению U_0 , при котором должно произойти отключение сети.

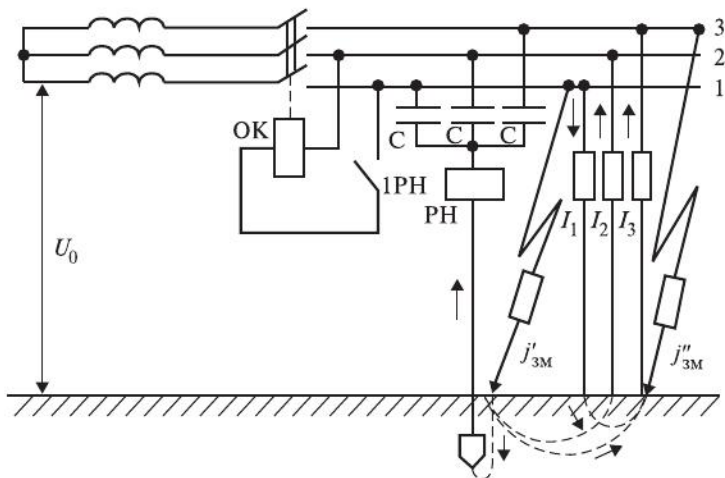


Рис. 4.39. Принципиальная схема УЗО, реагирующего на напряжение, с ФНП из трех конденсаторов

Область применения таких УЗО — трехфазные трехпроводные сети до 1кВ с изолированной нейтралью малой протяженности, т.е. обладающие высоким сопротивлением изоляции и малой емкостью сети относительно земли. Достоинство схемы в том, что она обеспечивает отключение сети при переходе на нее высшего напряжения трансформатора. Датчиком входного сигнала в таких схемах служит ФНП токов или трансформатор тока нулевой последовательности (ТТНП).

На рис. 4.40 представлена схема трехфазного пускателя для ручного инструмента, оборудованного УЗО с ТТНП, реагирующим на ток нулевой последовательности. При величине тока нулевой последовательности, достигшей тока уставки реле РЗ, происходит отключение электроинструмента.

На рис. 4.41 представлен серийно выпускаемый аппарат защитного отключения шахтный АЗШ. Аппарат предназначен для защиты людей от поражения электрическим током и других опасных последствий утечек тока на землю в электрических сетях трехфазного переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 и 660 В с изолированной нейтралью питающего трансформатора.

Аппарат состоит из устройства контроля сопротивления изоляции и устройства автоматической компенсации емкостной состав-

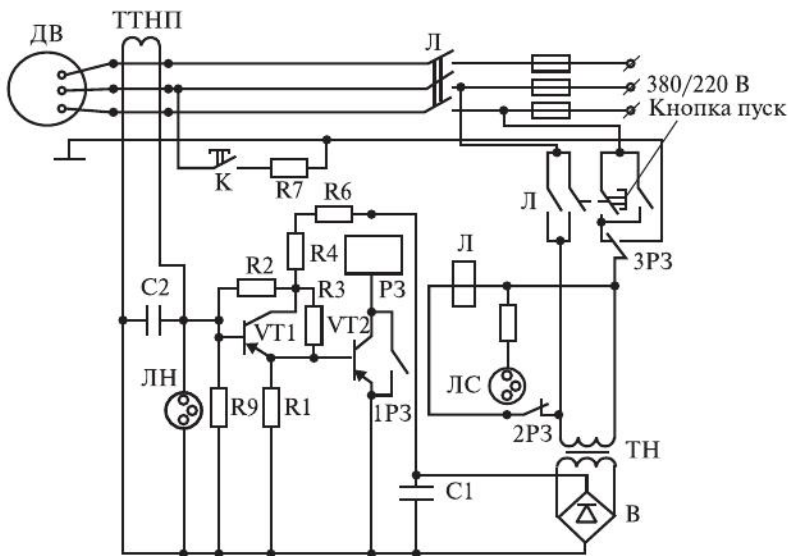


Рис. 4.40. Принципиальная схема УЗО, реагирующая на ток нулевой последовательности:

ТНП — трансформатор тока нулевой последовательности; РЗ — реле защитное; Л — магнитный пускатель; ЛН — тиратрон, выполняющий роль порогового устройства; ЛС — тиратрон — индикатор работы устройства

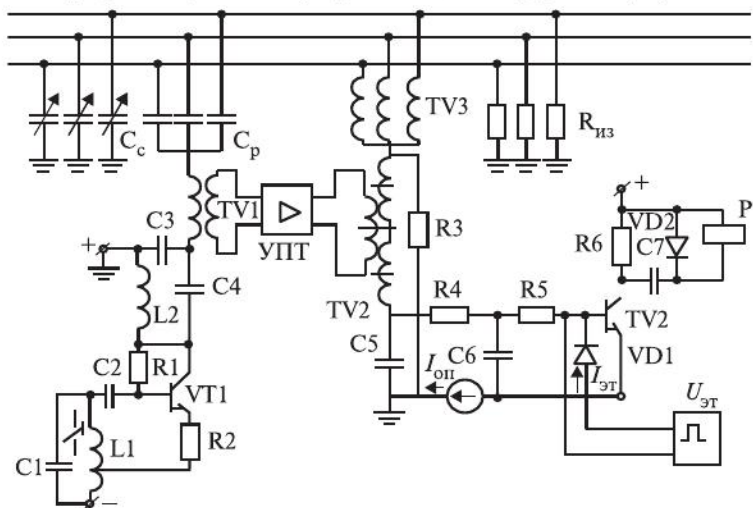


Рис. 4.41. Принципиальная электрическая схема аппарата защитного отключения АЗШ

ляющей тока утечки. Функциональная схема устройства автоматической компенсации представляет собой схему измерения емкости сети под рабочим напряжением и цепь компенсации, индуктивность которой меняется в зависимости от емкости сети. В схеме измерения используется явление резонанса токов в контуре, содержащем индуктивность и емкость.

Принцип измерения емкости состоит в том, что в качестве колебательного контура используется сама рабочая сеть. На этот контур подается сигнал эталонной частоты. В зависимости от степени рассогласования собственной частоты контура, содержащего измеряемую емкость сети, и частоты эталонного источника, амплитуда сигнала, снимаемая с части контура, изменяется. По величине этой амплитуды определяется емкость сети, находящейся под рабочим напряжением.

Сигнал, являющийся функцией измеряемой емкости сети, преобразуется в ток подмагничивания компенсирующего дросселя, который в зависимости от этого тока изменяет свою индуктивность. Компенсирующая цепь, включенная между фазами сети и землей и изменяющая свою индуктивность в зависимости от емкости сети, обеспечивает компенсацию емкостной составляющей токов утечки.

Схема (см. рис. 4.41) содержит генератор эталонной частоты (VT_1 , L_1 , L_2 , C_1 , C_2 , R_1 , R_2), к коллектору которого через конденсатор C_4 подключен колебательный контур, состоящий из конденсатора C_3 , трансформатора TV_1 , емкостного присоединительного фильтра C_p и емкости сети C_c . Вторичная обмотка трансформатора TV_1 через усилитель постоянного тока УПТ подключена к обмотке управления компенсирующего дросселя TV_2 .

Цепь компенсации состоит из присоединительного дроссель-трансформатора TV_3 , компенсирующего дросселя и разделительного конденсатора C_5 . При отсутствии тока в обмотке управления компенсирующий дроссель настроен в резонанс с емкостью сети, близкой к нулю. При изменении емкости сети меняется амплитуда сигнала, снимаемого со вторичной обмотки трансформатора TV_1 , соответственно сигнал преобразуется в ток подмагничивания компенсирующего дросселя, настраивая его в резонанс с емкостью сети. При этом емкостная составляющая тока утечки оказывается скомпенсированной.

Устройство контроля сопротивления изоляции содержит схему контроля сопротивления изоляции и исполнительный орган, воздействующий на нулевой и независимый расцепители или отключающую катушку автоматического выключателя. Принцип работы устройства основан на сравнении амплитудного значения постоянного оперативного ($U_{оп}$) сигнала с эталонным импульсным ($U_{эт}$) сигналом прямоугольной формы. Измерительная схема содержит элемент сравнения оперативного $I_{оп}$ и эталонного $I_{эт}$ токов, выполненный на диоде VD1, шунтирующим вход усилителя VT2, к входу которого через конденсатор C7 подключено исполнительное реле Р. В качестве источника питания исполнительного реле используется конденсатор C7. При бесконечно большой величине сопротивления изоляции $R_{из}$, контролируемой сети оперативный ток замыкается по цепи «плюс» $U_{оп}$ сопротивление R3, рабочие обмотки компенсирующего дросселя, резисторы R4 и R5, база-эмиттерный переход транзистора VT2, «минус» $U_{оп}$. Величина оперативного тока при этом находится в диапазоне изменения мгновенных значений эталонного тока.

Через переход база-эмиттер транзистора усилителя VT2 протекает импульсный ток, обусловленный разностью между $I_{оп}$ и $I_{эт}$, который периодически открывает и закрывает усилитель. При этом, когда транзистор VT2 открыт, происходит заряд конденсатора C7 через диод VD2 и коллектор-эмиттерный переход VT2. Когда усилитель закрывается, происходит разряд конденсатора C7 через обмотку реле Р и сопротивление R6. Среднее значение разрядного тока конденсатора C7 обуславливает срабатывание реле Р и удержание его якоря в притянутом состоянии.

При снижении сопротивления изоляции контролируемой сети оперативный ток увеличивается и при достижении им порогового значения, обусловленного *требованиями безопасности*, транзистор VT2 открывается. Разрядный ток конденсатора C7 уменьшается до нуля. В результате реле отключается и воздействует на автоматический выключатель, который отключает сеть с поврежденной изоляцией.

Для устранения влияния напряжения смещения нейтрали при однофазных утечках и повышения устойчивости работы при переходных процессах, вызванных коммутационными операциями в сети, вход транзистора VT2 подключен к разделительному

конденсатору С5 через RC-фильтр на резисторах R4, R5 и конденсаторе С6.

4.4. Применение малых напряжений в условиях повышенной опасности, классы электротехнических изделий по способу защиты человека

Условия работ в отношении опасности поражения людей электрическим током можно разделить на следующие категории:

- условия без повышенной опасности;
- условия повышенной опасности;
- особо опасные условия;
- особо неблагоприятные условия;
- условия работ на открытом воздухе.

Согласно Правил признаками, характеризующими условия *повышенной опасности*, являются:

- наличие сырости или токопроводящей пыли (сырыми помещениями называются помещения, в которых относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %);
- наличие токопроводящих оснований (металлические, земляные, бетонные, железобетонные, кафельные, кирпичные и т.п. полы);
- высокая температура (жаркими помещениями называются помещения, в которых под воздействием различных тепловых излучений температура превышает постоянно или периодически (более 1 суток) +35 °С);
- имеется возможность одновременного прикосновения с одной стороны — к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т.п., а с другой стороны — к металлическим корпусам оборудования.

При условиях повышенной опасности для питания электроприемников, доступных прикосновению, допускается применять *малое напряжение, не превышающее 42 В*.

Признаками, характеризующими *особо опасные условия*, являются:

- особая сырость (особо сырыми помещениями называются помещения, в которых относительная влажность воздуха близка к 100 %, потолок, стены, пол и предметы покрыты влагой);

— наличие химически активной или органической среды (помещения с химически активной или органической средой называются помещения, в которых постоянно или в течение длительного времени содержатся агрессивные пары, газы, жидкости, образуются отложения или плесень, разрушающие изоляцию и токоведущие части электрооборудования);

— наличие одновременно двух или более признаков повышенной опасности.

При наличии *особо опасных условий* для питания электроприемников, доступных прикосновению, также допускается применять *малое напряжение, не превышающее 42 В*.

Класс *особо неблагоприятных условий* впервые введен в Межотраслевых правилах. Такие условия создаются при работах «в сосудах, аппаратах и других металлических емкостях с ограниченной возможностью перемещения и выхода». В особо неблагоприятных условиях необходимо применять переносные светильники напряжением не выше 12 В.

Работы *на открытом воздухе* относятся к особо опасным условиям независимо от климатических метеоусловий.

Классы *электротехнических изделий* по способу защиты человека от поражения электрическим током установлены ГОСТ 12.2.007.0 (табл. 4.22):

0 — изделия, имеющие по крайней мере рабочую изоляцию и не имеющие элементов для заземления, если эти изделия не отнесены к классу II или III;

0I — изделия, имеющие по крайней мере рабочую изоляцию, элемент для заземления и провод без заземляющей жилы для присоединения к источнику питания;

I — изделия, имеющие по крайней мере рабочую изоляцию и элемент для заземления; провод к источнику питания должен иметь заземляющую жилу и вилку с заземляющим контактом;

II — изделия, имеющие двойную или усиленную изоляцию и не имеющие элементов для заземления;

III — изделия, не имеющие ни внутренних, ни внешних электрических цепей с напряжением свыше 42 В. Изделия, получающие питание от внешнего источника, могут быть отнесены к классу III только в том случае, если они предназначены для присоеди-

нения непосредственно к источнику питания с напряжением не выше 42 В, у которого при холостом ходе оно не превышает 50 В. При использовании в качестве источника питания трансформатора или преобразователя его входная и выходная обмотки не должны быть электрически связаны и между ними должна быть двойная или усиленная изоляция.

Согласно Межотраслевым правилам электроинструменты и ручные электрические машины класса 0 по типу защиты от поражения током допускаются к использованию только с применением электрозщитных средств.

Таблица 4.22

Условия использования в работе электроинструмента и ручных электрических машин различных классов

Место проведения работ	Класс по типу защиты от поражения электрическим током	Условия применения электрозщитных средств
1	2	3
Помещения без повышенной опасности	0	С применением хотя бы одного электрозщитного средства
	I	При системе TN-S — без применения электрозщитных средств при подключении через УЗО или с применением хотя бы одного электрозщитного средства. При системе TN-C — с применением хотя бы одного электрозщитного средства
	II	Без применения электрозщитных средств
	III	То же
Помещения с повышенной опасностью	0	При системе TN-S — с применением хотя бы одного электрозщитного средства и при подключении через УЗО или при подключении через УЗО или при питании только одного электроприемника (машина, инструмент) от отдельного источника (разделительный трансформатор, генератор, преобразователь). При системе TN-C — с применением хотя бы одного электрозщитного средства и при питании только одного электроприемника от отдельного источника

1	2	3
Помещения с повышенной опасностью	I	При системе TN-S — без применения электрозащитных средств при подключении через УЗО или при питании только от одного электроприемника (машина, инструмент) от отдельного источника (разделительный трансформатор, генератор, преобразователь). При системе TN-C — с применением хотя бы одного защитного средства
	II	Без применения электрозащитных средств
	III	Без применения электрозащитных средств
Особо опасные помещения. Вне помещений (наружные работы)	0	Не допускается применять
	I	С УЗО или с применением хотя бы одного электрозащитного средства
	II	Без применения электрозащитных средств
	III	Без применения электрозащитных средств
При наличии особо неблагоприятных условий (в сосудах, аппаратах и других металлических емкостях с ограниченной возможностью перемещения и выхода)	0	Не допускается применять
	I	Не допускается применять
	II	С применением хотя бы одного электрозащитного средства. Без применения электрозащитных средств при подключении через УЗО или при питании только одного электроприемника от отдельного источника
	III	Без применения электрозащитных средств

В табл. 4.22, принято:

– система TN — система, в которой нейтраль источника питания глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки присоединены к глухозаземленной нейтрали источника с помощью нулевых защитных проводников;

– система TN-S — система TN, в которой нулевой защитный (PE) и нулевой рабочий (N) проводники разделены на всем ее протяжении (пятипроводная система);

– система TN-C — система TN, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники совмещены в одном проводнике (PEN) на всем ее протяжении (четырепроводная система).

4.5. Защитное выравнивание разности потенциалов при обслуживании электроустановок потребителей

Защитное выравнивание разности потенциалов — техническое защитное средство, представляющее собой объединение двух точек электрической цепи, в которых может возникнуть разность потенциалов в виде напряжений прикосновения или шага, за счет применения металлических проводников с низкой электрической проводимостью.

В современных правилах для обозначения выравнивания потенциалов с целью обеспечения безопасности применяются два термина близкие по своему техническому смыслу: выравнивание потенциалов и выравнивание потенциалов.

Уравнивание потенциалов — электрическое соединение проводящих частей для достижения равенства их потенциалов.

Выравнивание потенциалов — снижение разности потенциалов (шагового напряжения) на поверхности земли или пола при помощи защитных проводников, прокладываемых в земле, в полу или на их поверхности и присоединенных к ЗУ (или путем применения специальных покрытий земли).

По существу защитное заземление и защитное зануление являются средствами выравнивания разности потенциалов (уравнивания потенциалов) между корпусом оборудования и стационарным заземляющим устройством с помощью заземляющих присоединений или нулевого провода.

В электроустановках железнодорожного транспорта для снижения напряжения шага на территории ЭУ (включая тяговую подстанцию) применяется контурное или контурное сетчатое ЗУ для *выравнивания* потенциалов поверхности территории. Для устранения возможного появления разности потенциалов между контактной сетью и изолированной вышкой дрезины при работе под напряжением с помощью специальной штанги между элементами контактной сети и рабочей площадкой изолирующей вышки устанавливается шунтирующая перемычка для *уравнивания* потенциалов.

Для защиты от наведенного опасного напряжения на участках переменного тока применяется выравнивание разности потенциалов многократным заземлением отключенной контактной сети на рельс.

Можно сформулировать *правила электробезопасности* для электромонтеров контактной сети, которое включает в себя следующие аксиомы:

– все элементы (части) контактной сети и конструкция, на которой находится работник, должны иметь металлическое соединение между собой, т.е. быть под одним потенциалом с помощью уравнивания потенциалов;

– прежде чем коснуться элемента (части) контактной сети, нужно убедиться, что они имеют металлическое соединение с конструкцией, на которой находится работник;

– в случае отсутствия такого металлического соединения нужно его установить с помощью заземляющей или шунтирующей штанги или установить специальную перемычку и только после этого можно выполнять работу.

На рис. 4.42 показано сложное заземляющее устройство, состоящее из контурного СЗ и вертикальных стержневых электродов, и графики распределения потенциалов на поверхности территории ЭУ относительно нулевого потенциала. Сплошными линиями показаны результирующие потенциалы точек земли, а пунктирными потенциалы составляющих контур ЗУ элементов.

Рис. 4.43 иллюстрирует характер изменения потенциалов на поверхности земли при применении контурного сетчатого заземляющего устройства. Характер изменения потенциалов зависит от формы ЗУ, его конструкции, глубины заложения, а также от структуры проводящего пространства земли.

В исследованиях (Воронина А.А.) получены коэффициенты прикосновения для сетчатых заземляющих устройств в зависимости от относительной длины и плотности сетки, а также глубины погружения СЗ в грунт.

Для защиты от наведенного опасного напряжения на участках переменного тока применяется выравнивание разности потенциалов многократным заземлением отключенной контактной сети на рельс.

В грунте с однородным удельным сопротивлением напряжение прикосновения может быть определено по формуле

$$U_{\text{пр}} = \alpha_{\text{пр}} I_3 R_3, \quad (4.37)$$

где I_3 — ток короткого замыкания на заземляющее устройство; R_3 — сопротивление растеканию заземляющего устройства; $\alpha_{\text{пр}}$ — коэффициент напряжения прикосновения.

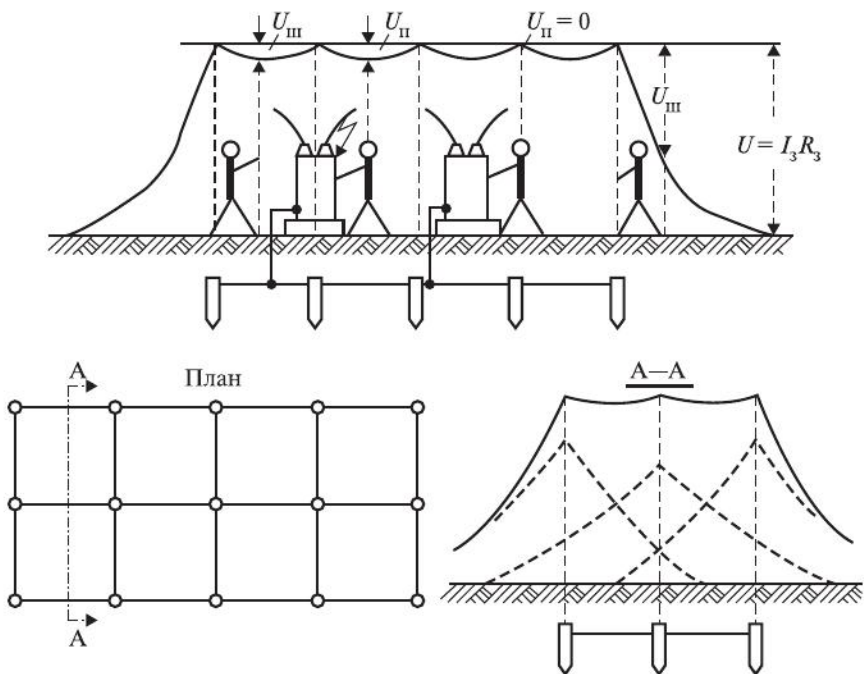


Рис. 4.42. Выравнивание потенциалов поверхности электроустановки с помощью контурного сетчатого заземляющего устройства

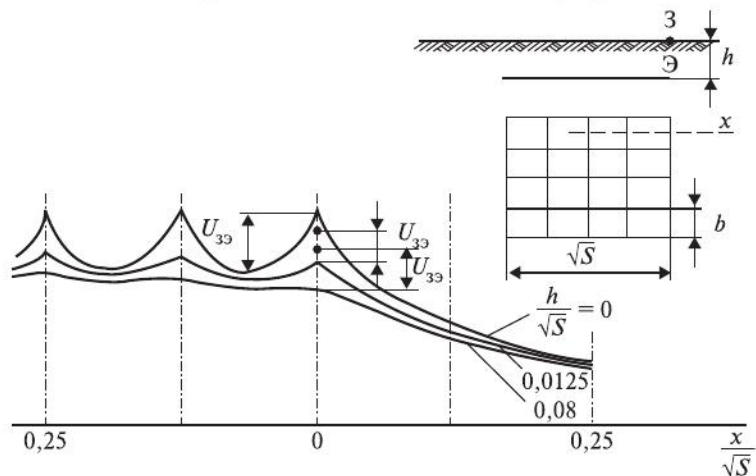


Рис. 4.43. Кривые распределения потенциалов на поверхности земли при различной глубине расположения h заземляющего устройства

Для заземляющих сеток коэффициент прикосновения внутри ячейки контурного сетчатого заземляющего устройства (см. рис. 4.43) в зависимости от коэффициента глубины погружения ЗУ в грунт α_h (табл. 4.23) определяется из соотношения

$$\alpha_{\text{пр}} = \alpha_{\text{прр}} \alpha_h; \quad (4.38)$$

а для контурного сетчатого заземляющего устройства с вертикальными электродами по контуру

$$\alpha_{\text{пр}} = \alpha_{\text{прр}} \alpha_h \alpha_{\text{в}}, \quad (4.39)$$

где $\alpha_{\text{прр}}$ — коэффициент прикосновения в центре угловой ячейки контурного сетчатого заземляющего устройства (рис. 4.44); $\alpha_{\text{в}}$ — коэффициент, учитывающий снижение коэффициента прикосновения в зависимости от длины вертикальных электродов по контуру (см. рис. 4.44).

Таблица 4.23

Коэффициент, учитывающий влияние глубины расположения контурного сетчатого заземляющего устройства

Относительная глубина от поверхности $\frac{h}{\sqrt{S}}$	0,001	0,005	0,01	0,02	0,04	0,08
Коэффициент α_h	0,91	0,84	0,79	0,76	0,72	0,68

Для защиты от наведенного опасного напряжения на участках переменного тока применяется выравнивание разности потенциалов многократным заземлением отключенной контактной сети на рельс.

Для контурного ЗУ, представляющего собой квадратную ячейку с учетом диаметра горизонтального электрода d и площади заземляющего устройства S , коэффициент напряжения прикосновения имеет максимальное значение

$$\alpha_{\text{пр. max}} = \frac{\lg \sqrt{S/d} - 0,25}{\lg \sqrt{S/d} + 1,27}. \quad (4.40)$$

Представленные материалы и зависимости (см. рис. 4.44) позволяют рассчитать напряжение прикосновения на территории ЭУ при применении выравнивающего разность потенциалов поверхности земли контурного сетчатого заземляющего устройства.

Применение контурного СЗ позволяет снизить напряжения прикосновения и шага на территории электроустановки, однако по краям СЗ разность потенциалов, определяющая величину напряжений прикосновения и шага, остается высокой.

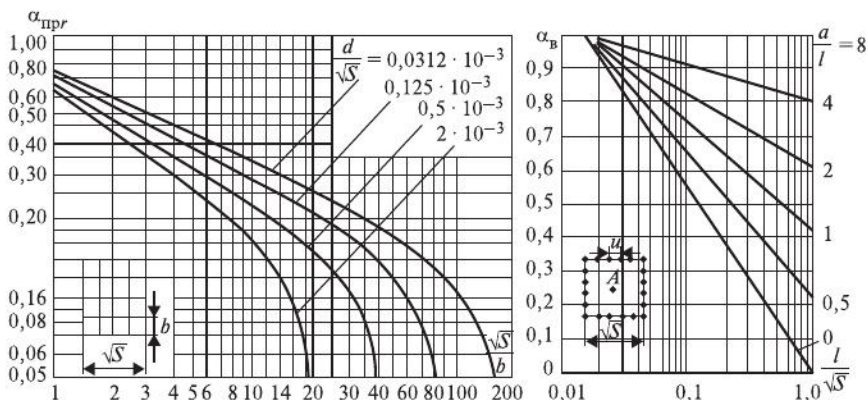


Рис. 4.44. Зависимость коэффициента прикосновения $\alpha_{\text{пр}}$ от диаметра d сетчатых электродов заземляющего устройства и зависимость коэффициента α_v от длины l вертикальных электродов

Замыкание тяговой сети на заземляющее устройство тяговой подстанции переменного тока имеет особенности, так как защитное ЗУ является элементом рельсового фидера наряду с протяженными ЗУ — рельсами подъездных и главных путей. По элементам рельсового фидера протекает тяговый ток и ток к.з. при замыкании на ЗУ тяговой подстанции. Определение напряжений прикосновения и шага является достаточно сложной задачей.

На рис. 4.45 приведена принципиальная схема электрической цепи при однофазном питании места к.з. справа и слева от соседних подстанций (пунктир на рисунке) для однопутного участка. Электрические схемы при одностороннем питании места к.з. от соседней подстанции для одного из путей двухпутного участка будут частными случаями этой схемы.

Задача состоит в определении распределения токов в месте повреждения между ЗУ и линиями с несовершенной изоляцией по отношению к земле или линиями с утечкой тока в землю (рельсы, тросовые заземляющие объединения опор, протяженное ЗУ и т.п.), а также в проведении расчета на этой основе напряжений на заземляющих устройствах и на участках этих линий.

Принимаем, что величина тока к.з. на землю находится известными методами расчета тока к.з. в однофазных электрических сетях.

Напряжение в месте повреждения определяется током к.з., который представляет собой сумму токов заземленной фазы, токов

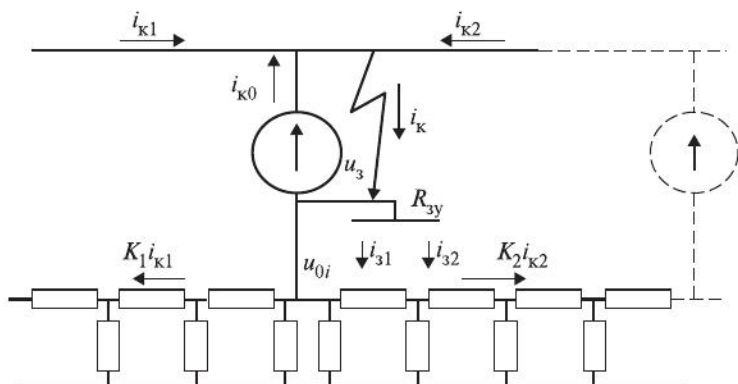


Рис. 4.45. Принципиальная схема электрической цепи короткого замыкания на заземляющее устройство подстанции, к которому подключены два протяженных заземляющих устройства

заземляющего устройства и цепных схем и может быть выражен соотношением

$$i_k = \sum_{j=1}^N K_j i_{kj}$$

или, если считать все ответвления подключенными к одной точке с учетом направлений векторов тока, а параметр K равным для всех цепных схем, то ток, протекающий по земле и цепным схемам, можно определить из соотношения

$$i_{k3} = K i_k - i_{k0}, \quad (4.41)$$

где i_k — полный ток в месте повреждения; i_{k0} — доля тока в заземленной фазе трансформатора.

На основе свойств цепных схем токи в переходных сопротивлениях могут быть получены из соотношения

$$i_{пс} = \frac{R_3 \alpha_{пс}}{r_i} i_k \exp(-ng_i). \quad (4.42)$$

Ток в металлической части протяженного заземляющего устройства (в рельсах) i_{3j} и ток в земле i_{yj} в отходящих от подстанции линиях в виде цепных схем j могут быть получены из соотношений

$$\begin{aligned} i_{3j} &= (1 - K_j) i_{kj} + \beta_{пj} i_{k3} \exp(-ng_j), \\ i_{yj} &= K_j i_{kj} - \beta_{пj} i_{k3} \exp(-ng_j). \end{aligned} \quad (4.43)$$

Входное сопротивление в месте замыкания с учетом влияния подключенных цепных линий может быть оценено с помощью коэффициента токораспределения $\alpha_{\text{ПС}}$:

$$Z_{\text{ВХ}} = R_3 \alpha_{\text{ПС}}. \quad (4.44)$$

Напряжение на заземляющем устройстве подстанции может быть найдено, в общем случае, при подключенных к нему отличных по параметрам линий с несовершенной изоляцией (линиях с утечкой тока) из соотношения

$$u_3 = Z_{\text{ВХ}} i_{\text{К}} = R_3 \alpha_{\text{ПС}} \sum_{j=1}^N K_j i_j. \quad (4.45)$$

Решая уравнения цепных схем с учетом граничных условий, можно найти напряжение в n -й точке любой цепной схемы и точки в заземляющем устройстве и земле:

$$u_{ni} = u_{0i} \operatorname{ch} n g_i + Z_i (i_{y0i} - K_i i_{\text{К}}) \operatorname{sh} n g_i, \quad (4.46)$$

$$i_{y0i} = K_i i_{\text{К}} - i_{zi}.$$

Принимаем из условий задачи граничные условия (рис. 4.46):

$$u_3 = u_{0i} = \sum_{i=1}^n Z_i i_{zi}.$$

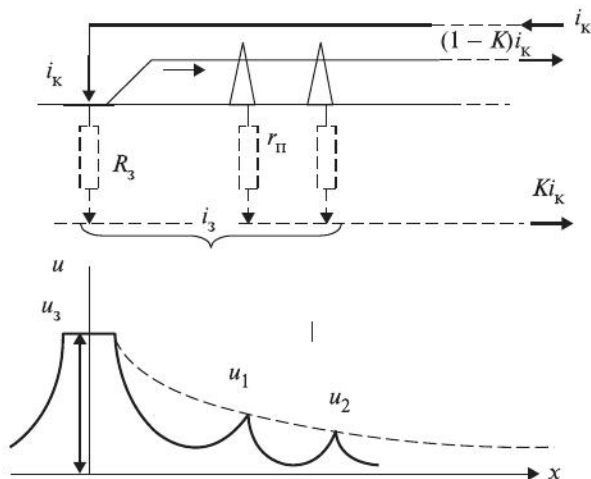


Рис. 4.46. Потенциал поверхности земли и ЗУ линии при замыкании высоковольтной линии на подстанции

Подставляя выражения граничных условий в первое уравнение системы (4.46), найдем напряжение на n -м элементе любой цепной схемы, присоединенной к заземляющему устройству тяговой подстанции,

$$u_{nj} = u_3 \operatorname{ch}ng_j - u_3 \operatorname{sh}ng_j = u_3 \exp(-ng_j)$$

или окончательно

$$u_{ni} = R_3 \alpha_{\text{пс}} \exp(-ng_i) \sum_{j=1}^N K_j i_{\text{к}j}. \quad (4.47)$$

Рассмотренная модель расчета напряжений на элементах ЗУ позволяет решать задачи с продольной неоднородностью линий с несовершенной изоляцией (с утечкой тока), т.е. линий, у которых каждый элемент n_j цепной схемы имеет свою характеристическую постоянную g_j и характеристическое сопротивление Z_j , определяемых продольными сопротивлениями Z и поперечными $r_{\text{п}}$.

Особенностью конструкции рельсового фидера тяговой сети («цепи отсоса») является использование ЗУ, РЛ подъездного пути, воздушного фидера и перемычки, расположенной в земле. По этим элементам протекает тяговый ток при расположении тяговой нагрузки, как правило, вдали от подстанции. При к.з. на тяговой подстанции ток к.з. будет протекать по элементам рельсового фидера, и в зависимости от величины тока через ЗУ i_3 напряжение относительно нулевого потенциала удаленной «земли» можно определить из соотношения

$$U_3 = i_3 R_3.$$

Входное сопротивление в точке к.з. на тяговой подстанции определяется не только сопротивлением ЗУ, но и подключенными к нему отдельными цепными линиями (заземляющая линия, РЛ, линия «трос—опоры», перемычка). Ток разветвляется по параллельным путям, и через ЗУ протекает только часть тока к.з.

При протекании тока по пути «ВВ линия—ЗУ линия» (где «ВВ линия» — это линия с изоляцией на полное напряжение ЭУ, а «ЗУ линия» — это линия без специальной изоляции от земли или линии с утечкой тока в землю, как правило выполняющие роль защитного ЗУ) вследствие взаимоиндуктивной связи контуров

«ВВ линия—земля» и «ЗУ линия—земля» на большом протяжении по ЗУ линии будет протекать ток $(1 - K)i_k$, а по земле Ki_k .

Коэффициент взаимоиндуктивной связи контуров K можно определить из соотношения

$$K = 1 - \frac{Z_{\text{л}}}{r_{\text{п}}},$$

где $Z_{\text{л}}$ — взаимоиндуктивное электрическое сопротивление высоковольтной линии и ЗУ линии участка цепной схемы, Ом; $r_{\text{п}}$ — переходное сопротивление этого же участка цепной схемы, Ом.

Напряжение на входном сопротивлении заземляющего устройства тяговой подстанции вместе с присоединенными ЗУ линиями можно выразить из соотношения

$$u_3 = i_k Z_{\text{вх}} = \alpha_{\text{пс}} R_3 \sum_{j=1}^L K_j i_{kj}. \quad (4.48)$$

В качестве примера на рис. 4.46 показана кривая напряжения на ЗУ подстанции и элементах присоединенной к нему одной цепной линии с учетом коэффициента связи ВВ линии и ЗУ линии.

Расчет распределения потенциалов на поверхности земли в месте расположения ЗУ и вынесенных потенциалов за пределы территории подстанции представляет большой интерес с точки зрения электробезопасности персонала и населения.

Если предположить, что ЗУ представляет собой круглый диск с эквивалентным радиусом $r_0 = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$, где S — площадь ЗУ, то распределение потенциалов вокруг него описывается, как известно, соотношением

$$u_{3x} = u_3 \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{r_0}{x + r_0}, \quad (4.49)$$

где x — расстояние, отсчитываемое от края диска, м.

Зависимость (4.49) из-за отклонения формы контурного заземляющего устройства от формы круглого диска, конструктивных особенностей контурного ЗУ, неоднородностей грунтов всегда носит приближенный характер, поэтому для облегчения расчетов ее можно заменить, с достаточной степенью точности, суммой двух экспоненциальных функций:

$$u_{zx} = u_3 \left[0,4 \exp\left(-\frac{x}{4r_0}\right) + 0,6 \exp\left(-\frac{x}{0,333r_0}\right) \right]. \quad (4.50)$$

При $x > r_0$ функция в (4.50) хорошо аппроксимируется одной экспонентой

$$u_{zx} \approx u_3 \exp\left(-\frac{x}{4r_0}\right).$$

Откуда можно легко получить максимальный коэффициент прикосновения при $x = 1$ на границе заземляющего устройства

$$\alpha_{\text{прmax}} = 0,4 \exp\left(-\frac{0,443}{\sqrt{S}}\right) + 0,6 \exp\left(-\frac{5,32}{\sqrt{S}}\right). \quad (4.51)$$

Для оценки вынесенных потенциалов по линиям, присоединенным к ЗУ, при формировании цепной схемы из элементов, кратных длине пролета, целесообразно принять соотношения

$$n = \frac{x}{l}, \quad \lambda = \frac{l}{4r_0}, \quad n\lambda = \frac{x}{4r_0},$$

где l — длина пролета рассматриваемой линии или длина однородного элемента цепной схемы, м.

С учетом влияния потенциала заземляющего устройства тяговой подстанции на изменение потенциала линии, представленной в виде цепной схемы, можно показать, что уравнение четырехполюсника для части схемы, находящейся в зоне влияния ЗУ тяговой подстанции, примет вид

$$u_n + \chi u_3 e^{-n\lambda} = u_3 (1 + \chi) \operatorname{ch}ng + Z \left(i_{y0} - Ki_{\kappa} - \frac{\lambda\chi}{g} \frac{u_3}{Z} \right) \operatorname{sh}ng, \quad (4.52)$$

$$\left(i_{yn} - Ki_{\kappa} - \frac{\lambda\chi}{g} \frac{u_3}{Z} e^{-n\lambda} \right) = \left(i_{y0} - Ki_{\kappa} - \frac{\lambda\chi}{g} \frac{u_0}{Z} \right) \operatorname{ch}ng + \frac{u_0}{Z} (1 + \chi) \operatorname{sh}ng,$$

где при ранее принятых обозначениях $\chi = \frac{0,4g^2}{\lambda^2 - g^2}$.

При использовании выражения (4.47) для определения в общем виде напряжения на n -м элементе цепной схемы при учете влияния напряжения ЗУ необходимо откорректировать коэффициент токораспределения $\bar{\alpha}_{\text{пс}}$:

$$\bar{\alpha}_{\text{пс}} = \frac{1}{R_3 + \sum_1^L \left(\frac{\tau}{Z_j} - \frac{1}{2r_{nj}} \right)},$$

где $\tau = 1 + \chi - \frac{\lambda\chi}{g}$ — коэффициент, фиктивно увеличивающий характеристические сопротивления всех отходящих ЗУ линий, учитывая тем самым наличие потенциалов электрического поля заземляющего устройства подстанции.

Напряжение вдоль любой из ЗУ линий, присоединенных к заземляющему устройству тяговой подстанции, при замыкании ВВ линии внутри подстанции на заземляющее устройство может быть выражена соотношением

$$u_n = R_3 \bar{\alpha}_{\text{пс}} \left[(1 + \chi)e^{-ng} - \chi e^{-n\lambda} \right] \sum_{j=1}^L K_j i_{kj}. \quad (4.53)$$

При замыкании на землю на ЗУ линию вблизи подстанции напряжение на ЗУ подстанции можно выразить из соотношения [с учетом выражений (4.39) и 4.45)]

$$u_3 = R_3 \bar{\alpha}_{\text{пс}} (i_{\text{кз}} - C i_{\text{кН}}), \quad (4.54)$$

где C — выражение из квадратных скобок соотношения (4.53).

На рис. 4.47 представлены кривые изменения напряжения на элементах цепных схем для случая короткого замыкания на землю внутри подстанции в соответствии со схемой замещения, приведенной на рис. 4.45, причем нижняя кривая соответствует цепной схеме с утечкой тока не в сосредоточенных точках n , а на всем протяжении цепной схемы (рельсы, протяженный заземлитель).

Интересно построение векторов напряжения на элементах цепной схемы и годографа (геометрического места расположения вершин векторов напряжения) этих векторов на комплексной плоскости при замыкании на землю внутри подстанции.

В соответствии с соотношением (4.42) множитель e^{-ng_j} представляет собой комплексную величину, поэтому при увеличении n снижается модуль величины, а при умножении на другое комплексное число $\alpha_{\text{пс}}$ видоизменяется соотношение между мнимой и действительной частями напряжения.

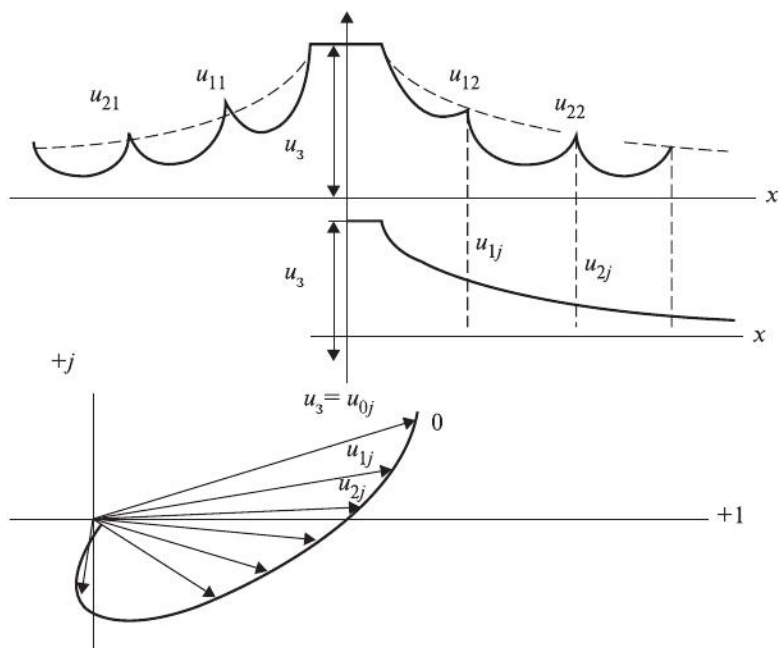


Рис. 4.47. Потенциалы элементов цепных схем, векторы напряжений цепной схемы j и их годограф при замыкании на землю на тяговой подстанции

Изменение тока вдоль цепных схем приведено на рис. 4.48 для случая к.з. внутри подстанции.

При замыкании на землю внутри подстанции часть тока i_{kj} , протекающая по ЗУ линии, в каждой характерной точке линии состоит из двух составляющих: тока в металлическом проводнике i_{yj} и тока в земле i_{3j} . Значение тока в земле может быть положительным, т.е. совпадающим с выбранным направлением тока, так и отрицательным, т.е. противоположным этому направлению, что определяется коэффициентами токораспределения между продольным и переходным сопротивлением i -го элемента ЗУ линии α_{ni} , β_{ni} . Для подстанции с сопротивлением растеканию заземляющего устройства R_3 , к которому присоединено N цепных схем с характеристическими сопротивлениями четырехполюсников Z_j и переходными сопротивлениями линия—земля r_3 , коэффициенты токораспределения между ЗУ и отходящими линиями можно выразить из соотношений их проводимостей:

$$\alpha_{nj} = \frac{\frac{1}{R_3}}{\frac{1}{R_3} + \sum_{j=1}^N \left(\frac{1}{Z_j} - \frac{1}{2r_j} \right)}, \quad \beta_{nj} = \frac{\frac{1}{Z_j} - \frac{1}{2r_j}}{\frac{1}{R_3} + \sum_{j=1}^N \left(\frac{1}{Z_j} - \frac{1}{2r_j} \right)}.$$

Из рис. 4.48 хорошо видно, что ток ЗУ линии в месте присоединения к заземляющему устройству подстанции протекает в основном по металлической части, а на некотором удалении от подстанции — в земле. Показано, что в месте присоединения заземляющего фидера (точка 0) возможно появление токов по направлению к подстанции при выбранном направлении тока замыкания от подстанции. Для практики это означает, что величина тока в петле «ВВ линия—земля» у тяговой подстанции меньше, чем на линии

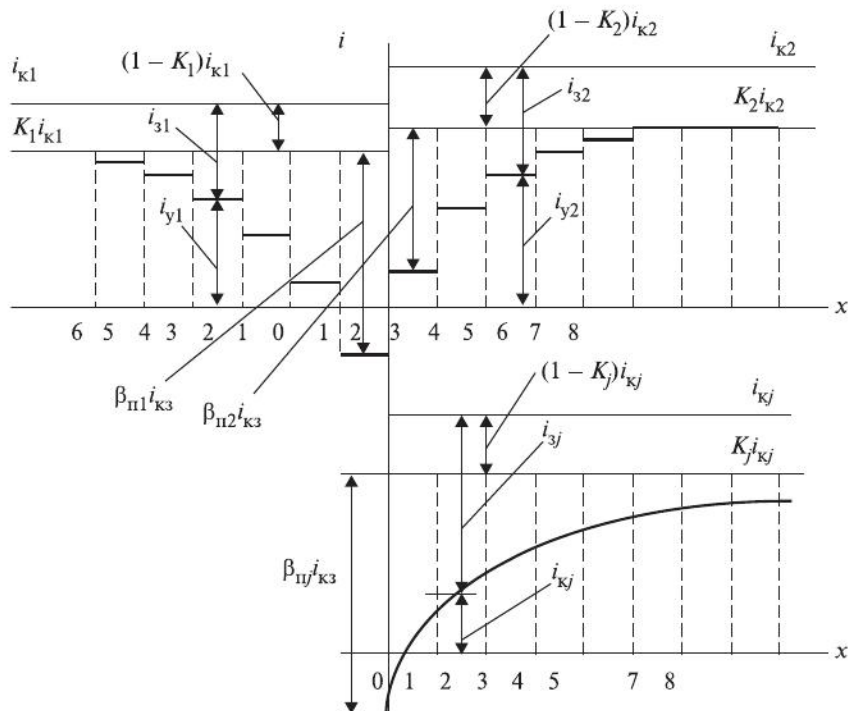


Рис. 4.48. Распределение токов в трех (1, 2, j) цепных схемах, присоединенных к ЗУ, при замыкании на землю внутри подстанции (цепная схема j моделирует непрерывную ЗУ линию в виде рельсов или протяженного заземлителя)

на удалении от подстанции. Величина вынесенного потенциала ЗУ линией (см. рис. 4.47) по величине является существенно большей, чем потенциал точек земли при протекании тока при отсутствии ЗУ линий только по заземляющему устройству тяговой подстанции.

4.6. Применение блокировок безопасности

Блокировка устройства — часть электротехнического изделия (устройства), предназначенная для предотвращения или ограничения выполнения операций одними частями изделия при определенных состояниях или положениях других частей изделия в целях предупреждения возникновения в нем недопустимых состояний или исключения доступа к его частям, находящимся под напряжением.

Различают два вида блокировок: блокировки безопасности и оперативные.

Блокировками безопасности называют такие блокировки электротехнического изделия (устройства), которые предотвращают вход лиц эксплуатационного и ремонтного персонала в камеры распределительных устройств или испытательного оборудования, в которых существует возможность прикосновения или опасного приближения к частям оборудования, находящимся под напряжением.

Оперативными блокировками называют такие блокировки, которые препятствуют неправильным действиям персонала при осуществлении переключений в схемах электрических соединений.

В качестве *электрических* блокировок безопасности (рис. 4.49) дверей ограждения 1 распределительных устройств и испытательных установок могут применяться блок-контакты 4, связанные с механизмом открывания замка 3 или двери 7 и включенные в цепь удерживающей катушки 2 магнитного пускателя МП. При включенной установке 6 и попытке открывания замка (двери) с преодолением усилия пружины 5 разомкнутся блок-контакты, включенные в цепь удерживающей катушки, что приведет к отключению установки в случае, если ее забыли отключить кнопкой «Стоп».

В качестве блокировки безопасности дверей могут применяться электрические замки, которые можно открыть с помощью электромагнитного ключа при наличии напряжения питания оперативным током контактов замка.

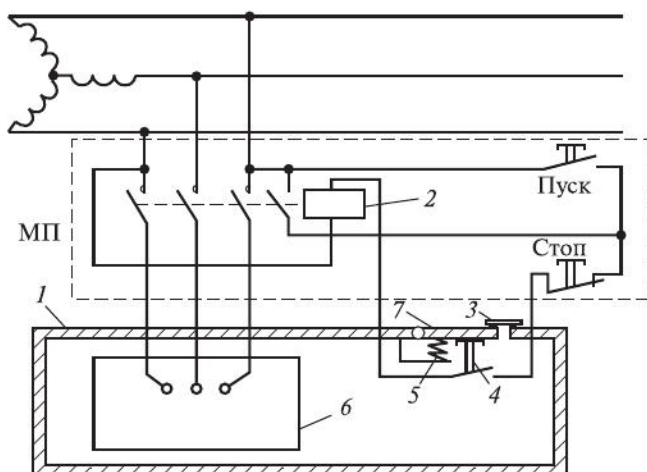


Рис. 4.49. Схема электрической блокировки дверей испытательной установки

На рис. 4.50 приведена схема питания электрического замка Y , исключающего вход персонала в камеру при наличии на оборудовании напряжения. Электрическая цепь питания замка содержит размыкающие (нормально замкнутые) вспомогательные контакты $SQT1$ и $SQT2$ разъединителей $QS1$ и $QS2$. Вход в камеру возможен только при видимом разрыве электрической цепи, т.е. при одновременном отключенном положении разъединителей $QS1$ и $QS2$.

Наиболее распространенным видом *оперативной блокировки* является блокировка выключателя и разъединителей от неправильных операций с разъединителями. Применяются механические и электромагнитные блокировки.

На рис. 4.51 приведена схема *механической блокировки замков* линейного и одного шинного разъединителя с выключателем.

Каждый разъединитель и выключатель имеют свой запорный замок, состоящий из корпуса 3 и подвижного стержня 2 . Перемещающийся стержень входит в стопорное отверстие привода 1 блокируемого аппарата. На другом конце перемещаю-

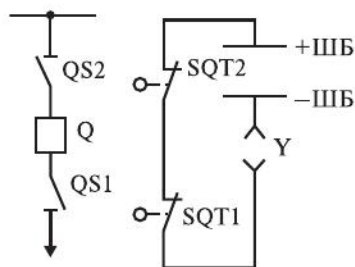


Рис. 4.50. Принципиальная электрическая схема блокировки безопасности

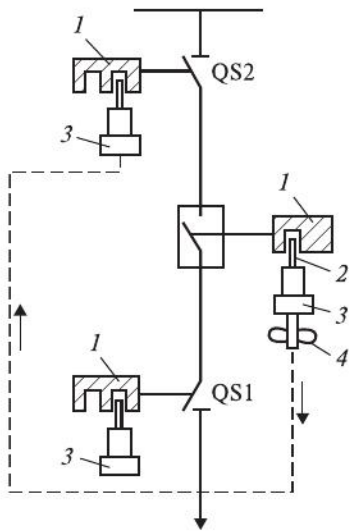


Рис. 4.51. Принципиальная схема механической замковой блокировки разъединителей и выключателя

шего стержня механического замка имеются специальные выступы, соответствующие прорезям переносного ключа 4. Ключ в замки разъединителей может быть вставлен или вынут только в конечных положениях привода, когда фиксирующий стержень входит в предназначенное для него отверстие. Во избежание ошибок ключ и замок выключателя выполняются с определенным секретом таким образом, что ключ нельзя вытащить из замка, пока выключатель не перейдет в отключенное положение.

Блокировка работает следующим образом. Во включенном положении выключателя и разъединителей единственный ключ находится в замке механической блокировки выключателя. Вынуть его можно только в отключенном положении выключателя.

При снятии ключа в отключенном положении выключателя подвижный стержень замка запирает привод выключателя в отключенном положении. После этого вынутым ключом производят отпирание замка линейного разъединителя QS1 и переводят его в отключенное положение.

При снятии ключа в отключенном положении разъединителя стержень замка запирает привод разъединителя в этом положении. После этого производят аналогичные операции с шинным разъединителем QS2 и его механическим замком. Для включения электрической цепи все операции выполняют в обратной последовательности.

Механическая блокировка линейного разъединителя и заземляющего ножа предотвращает включение разъединителя при включенном заземляющем ноже и включение заземляющих ножей при включенном разъединителе (рис. 4.52).

Принцип работы механической блокировки линейного разъединителя и заземляющего ножа с помощью дисков с фигурными вырезами I заключается в том, что диск I, вращающийся вокруг

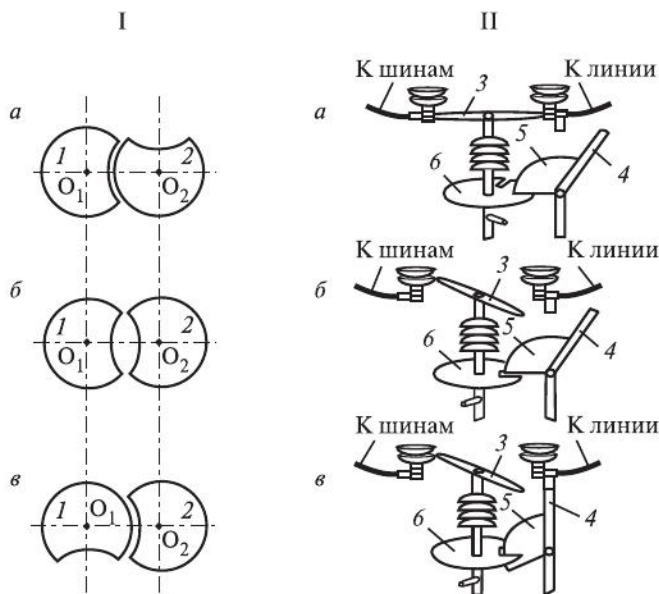


Рис. 4.52. Схемы механических блокировок линейного разъединителя и заземляющего ножа с помощью дисков с фигурными вырезами (I) и с помощью диска и фигурного сегмента (II)

оси O_1 , принадлежит заземляющему ножу, а диск 2, вращающийся вокруг оси O_2 , принадлежит линейному разъединителю. Во включенном положении линейного разъединителя диски занимают положение *a*, в котором диск 1 заземляющего ножа повернуться не может. В положении *б* диски оказываются после отключения линейного разъединителя и поворота диска 2. В этом положении заземляющий нож с диском 1 может быть включен, после чего диски займут положение *в*. После этого включить линейный разъединитель с поворотом диска 2 невозможно, пока не будет отключен заземляющий нож с поворотом диска 1 в положение *б*.

Принцип работы механической блокировки линейного разъединителя и заземляющего ножа с помощью диска и фигурного сегмента II отличается перпендикулярным расположением друг к другу диска 6 разъединителя 3 и фигурного сегмента 5 заземляющего ножа 4. При блокировке положения разъединителя 3 фигурный сегмент 5 входит в прорезь диска 6, что препятствует повороту разъединителя 3 во включенное положение.

Широко распространена в настоящее время *электромагнитная блокировка* разъединителей и выключателей с использованием электромагнитных замков (рис. 4.53).

Замок состоит из пластмассового корпуса 2, в котором размещаются контактные гнезда 5 и запорный стержень 13 с пружиной 12. Замок устанавливается так, чтобы стержень 13 фиксировал положение привода, входя в специальные отверстия в нем 15' и 15".

Переносный ключ состоит из корпуса 6, внутри которого расположена катушка электромагнита 7 с подвижным стальным сердечником 8 с закрепленным на нем кольцом 9.

При отключенном выключателе, когда разрешается отключить разъединитель, через включенные блок-контакты 10 выключателя 11 напряжение оперативного постоянного тока подается на контактные гнезда замка 5. При необходимости отключить разъединитель электромагнитный ключ вставляется штырями в гнезда замка 5, по катушке начинает протекать постоянный ток и сердечник намагничивается. Запорный стержень замка входит в соприкосновение с намагниченным сердечником ключа, притягивается к нему магнитными силами и при помощи кольца вытягива-

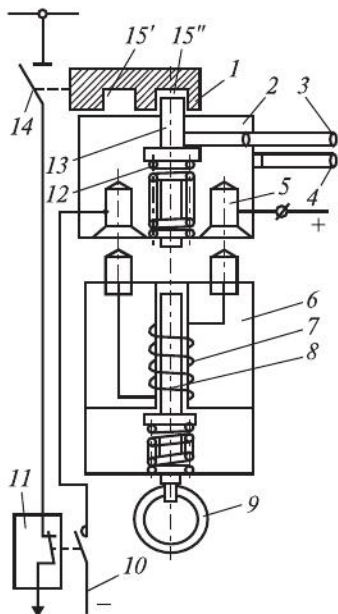


Рис. 4.53. Схема электромагнитной блокировки:

1 — элемент привода разъединителя со стопорными отверстиями; 2 — пластмассовый корпус замка; 3 — подвижный рычаг для открывания замка вручную; 4 — неподвижный рычаг для закрепления пломбированием подвижного рычага; 5 — контактные гнезда; 6 — пластмассовый корпус ключа; 7 — катушка электромагнита; 8 — подвижный сердечник электромагнита; 9 — кольцо; 10 — блок-контакты выключателя; 11 — выключатель; 12 — пружина замка; 13 — запорный стержень замка; 14 — разъединитель; 15', 15'' — стопорные отверстия привода разъединителя во включенном и отключенном положениях

ется из блокировочного гнезда, отпирая замок и позволяя произвести отключение разъединителя.

Свою роль блокировки выполняют только при исправном состоянии и бережном отношении персонала. Отказы в работе часто возникают вследствие некачественного монтажа распределительных устройств, смещения блокирующих узлов (валов, рукояток, ограждений), неисправности вспомогательных блок-контактов сигнальных КСА, коррозии и загрязнения блок-замков. Для предотвращения случаев отказа блокировки необходимы периодические проверки ее действия, защита от неблагоприятных атмосферных явлений и загрязнений, вносимых из окружающей среды, срочный ремонт при повреждениях.

Запрещение блокировкой выполнения операций должно восприниматься персоналом как абсолютно правильное, не требующее какого-либо вмешательства в ее работу.

Если блокировка не разрешает проведение какой-либо операции, кажущейся на первый взгляд правильной, переключения следует прекратить и проверить:

- правильность выбранного коммутационного аппарата, подлежащего отключению;
- положение всех тех коммутационных аппаратов, операции с которыми должны были предшествовать проводимой операции;
- целостность предохранителей в цепях и самой цепи блокировки и исправность электромагнитного ключа.

Если проверка не даст результата, оперативный персонал должен возвратиться на щит управления и сообщить энергодиспетчеру, отдавшему распоряжение о переключении, о невозможности выполнения операции.

Оперативному персоналу, непосредственно производящему переключения, запрещается принудительно деблокировать неисправную (по его мнению) блокировку. Неисправность блокировки должна удостоверяться лицом, ответственным за ее техническое состояние, и по его указанию выводиться из работы.

Оперативные переключения в распределительных устройствах, где блокировка частично отсутствует или выведена из работы из-за неисправности, должны производиться по *бланкам переключений*.

4.7. Использование защитных свойств рельсовой сети

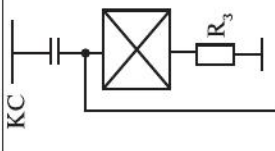
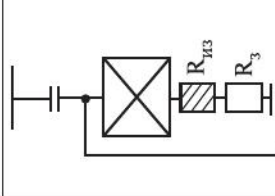
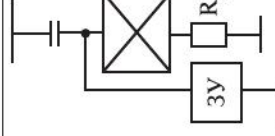
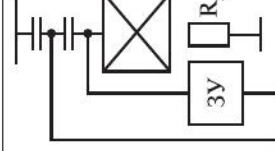
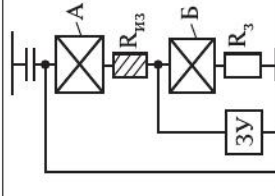
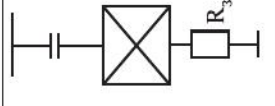
В тяговых сетях электрифицированных железных дорог постоянного и переменного тока в качестве технического защитного средства — защитного заземления применяется присоединение конструкций, подлежащих заземлению, на рельсовую сеть (РС) или рельсовую линию (РЛ), которые выполняют роль естественных заземляющих устройств.

Электрические схемы замещения для различных видов заземления на РЛ приведены на рис. 4.54.





Применение заземления на РЛ, расположенных вблизи от электрифицированных линий конструкций, являющихся элементом системы электроснабжения (опоры контактной сети, посты секционирования, разъединители, разрядники и т.п.), а также других конструкций (искусственные сооружения, светофоры, шкафы и т.п.), вызвано необходимостью срабатывания максимальной токовой защиты контактной сети от токов к.з.. Защита осуществляется с помощью быстродействующих выключателей. Максимальная токовая защита реагирует только на ток к.з., который может вызвать повреждение контактной сети, оборудования тяговых подстанций и других конструкций. Быстродействующая максимальная токовая защита отключает ток к.з. до момента достижения им максимального установившегося значения, которое при существующих мощностях тяговых подстанций может составлять десятки килоампер.

При максимальной токовой защите ток уставки защиты выключателя должен быть выше тока суммарной тяговой нагрузки, питаемой этим выключателем. Поскольку уровень тяговых токов иногда достигает уровня минимальных установившихся токов к.з. (особенно на участках с электротягой постоянного тока), то основным условием эффективной работы максимальной токовой защиты является *минимизация сопротивления электрической цепи* тока к.з.

Следствием отказа максимальной токовой защиты могут быть тяжелые повреждения в тяговой сети: отжиг значительной длины контактного провода, требующий капитального ремонта контактной сети; сгорание и разрушение конструкций, случаи электротравматизма. До настоящего времени известны и поддаются расчету электрические сопротивления таких элементов, входящих в цепь короткого замыкания, как питающая энергосистема, питающие эле-

Электрические схемы замещения для различных видов заземления на рельсовую сеть					
Глухое	Глухое с дополнительной изоляцией от земли	Через защитное устройство	Комбинированное с нейтральной вставкой	Комбинированное с дополнительной изоляцией между конструкциями	Без заземления на рельсовую сеть
I	II	III	IV	V	VI
					
$R_3 \geq R_{\text{норм}}$					
$R_3 < R_{\text{норм}}$					
Условие применения					
Глухое заземление обязательно			Глухое заземление не обязательно		
Глухое заземление обязательно			Глухое заземление конструкции А обязательно		

Условные обозначения:

-  — заземляемая конструкция;
-  — защитное устройство (ИП, ЗД, ТЗ, ЗД + 2ИП);
-  — изоляция контактной сети;
-  — контактная сеть;

 — заземляющий проводник;

 — рельсовая сеть;

 R_3 — сопротивление току утечки через конструкцию в землю;

 $R_{\text{из}}$ — сопротивление дополнительной изоляции

Рис. 4.54. Принципиальные электрические схемы замещения возможных видов заземления с использованием рельсовых линий

менты тяговой подстанции, тяговая сеть (контактная и рельсовые сети). Значения же входных сопротивлений в месте к.з. часто не учитываются при выборе уставки максимальной токовой защиты.

Как правило, электрическое сопротивление части короткозамкнутой цепи в месте короткого замыкания, если не принять специальных мер, обеспечивающих его наименьшее значение, является определяющей величиной во всей цепи к.з. Суммарное сопротивление всех элементов цепи до места короткого замыкания очень невелико (от сотых до десятых долей ома). Собственное сопротивление растеканию тока в земле с конструкций (опор контактной сети, светофорных мачт, мостов и путепроводов, релейных шкафов и т.п.), на которые возможно попадание напряжения контактной сети может иметь значительную величину (от нескольких ом до сотен килоом). Кроме этого, необходимо выполнение условий защиты от электрической коррозии расположенных в грунте фундаментов конструкций и надежность работы рельсовых цепей автоблокировки.

Короткое замыкание может произойти при пробое или перекрытии изоляции на электроподвижном составе, при пробое или перекрытии изоляции на опорах контактной сети или других поддерживающих контактную сеть конструкциях, при обрыве проводов с падением их на рельсы, светофорную мачту, релейный шкаф, любые другие объекты, расположенные вблизи пути, или на землю.

Отключение к.з. на ЭПС обеспечивается, как правило, собственным быстродействующим выключателем, имеющим значение тока уставки ниже тока уставки выключателей тяговой подстанции. При отказе выключателя ЭПС короткие замыкания надежно отключаются выключателем тяговой подстанции, так как все элементы цепи короткого замыкания внутри ЭПС (металлический корпус ЭПС надежно соединен через колесные пары с рельсами) имеют низкое сопротивление.

Более сложная электрическая цепь создается при замыкании контактной сети на конструкцию, изолированную от РЛ (см. рис. 4.54).

При замыкании контактной сети на конструкцию, изолированную от РЛ, по ней протекает полный ток к.з., а при сопротивлении растеканию самой конструкции значительно больше, чем электрическое сопротивление других элементов цепи короткого замыкания, она может оказаться под полным напряжением контактной

сети. При такой ситуации ток к.з. может не достигать тока уставки, а быстродействующий выключатель подстанции не срабатывать, что может привести к тяжелым последствиям. Следовательно, для осуществления работы максимальной токовой защиты без использования РЛ в случае применения защитного ЗУ его *сопротивление должно быть малым* (не превышающим 0,5 Ом) и поддающимся расчету.

Более легкие условия отключения к.з. возникают при металлическом контакте проводов контактной сети и рельсов, например при обрыве контактного провода и падении его на рельсы.

Случаи короткого замыкания могут быть причиной повреждения сооружений и конструкций, которые обеспечивают безопасность движения поездов. При коротком замыкании требуется быстрое и надежное отключение контактной сети, что возможно лишь при низком сопротивлении цепи к.з., включая часть электрической цепи в месте к.з. Такие условия обеспечиваются металлическим (глухим) соединением заземляемой конструкции с РЛ (см. рис. 4.54). В этом случае при коротком замыкании основная часть тока в месте замыкания будет протекать по РЛ, часть тока будет протекать по конструкции, имеющей электрическую связь с землей через сопротивление R_3 , на которой возникают напряжения прикосновения. Установлены зоны, в которых должны заземляться на РЛ конструкции, доступные прикосновению, включая полосу 5 м по обе стороны от оси пути (зона возможного падения провода при обрыве на уровне головки рельсов), так как на этих конструкциях может оказаться высокое напряжение прикосновения. При глухом соединении конструкций к РЛ возникает *опасность выноса напряжения РЛ на конструкцию* в стационарных режимах работы.

К перечню конструкций, подлежащим заземлению на рельс, относят прежде всего опоры контактной сети, мосты и путепроводы, на которых крепится контактная сеть, корпуса постов секционирования и пунктов параллельного соединения, конструкции и приводы секционных разъединителей, роговые разрядники, а также светофорные мачты, релейные шкафы, надземные трубопроводы, гидравлические колонки и т.п.

Заземление на РЛ выполняется стальным прутком диаметром 12 мм при электротяге постоянного тока или 10 мм при электро-

тяге переменного. Пруток прикрепляют к тяговому рельсу или соединительными болтовыми зажимами к средней точке путевого дроссель-трансформатора рельсовой цепи. В особо ответственных местах с точки зрения безопасности, где возможно частое прикосновение к конструкциям людей (опоры контактной сети с секционными разъединителями, разрядниками, корпуса постов секционирования и пунктов параллельного соединения, опоры и конструкции в общедоступных местах и в местах, где производится посадка и высадка пассажиров, на переездах, мостах, путепроводах), — уравнивание потенциалов с РЛ (заземление на РЛ) выполняют двойным проводом.

Глухое соединение конструкций и устройств с РЛ обеспечивает надежное отключение токов к.з., поэтому иногда оно оценивается как «идеальное с точки зрения техники безопасности». Как показано далее в работе, это не всегда соответствует представлениям об электробезопасности устройств с точки зрения допустимых напряжений прикосновения на РЛ в стационарных режимах работы, особенно в связи с наличием стандарта норм предельно допустимых уровней напряжений прикосновения и токов (ГОСТ 12.1.038-82 (2001)). Глухое соединение некоторых конструкций и устройств с РЛ оказывается во многих случаях недопустимым по другим причинам: искрообразования, возможного нарушения работы рельсовых цепей, а на участках постоянного тока возможно электрокоррозионного разрушения конструкций токами утечки тяговых токов с РЛ.

Отмеченные явления связаны с утечкой тяговых и сигнальных токов через сопротивление R_3 , если оно *меньше определенного нормируемого* значения по условиям работы рельсовых цепей или по условиям электрической коррозии сооружений. Возникает **противоречие**: по условиям электробезопасности сопротивление R_3 должно быть как можно *меньше*, а по условиям работы рельсовых цепей и защиты сооружений от коррозии возможно *больше*. Существует комплекс технических мероприятий для устранения этого противоречия: *повышение сопротивления заземления* собственно конструкций с применением специальных изолирующих элементов с большим $R_{из}$ (рис. 4.55, в) или *присоединение* их к рельсам *через специальные защитные устройства* (искровой промежуток, полупроводниковые диоды и т.п.), которые предотвращают утечку токов с

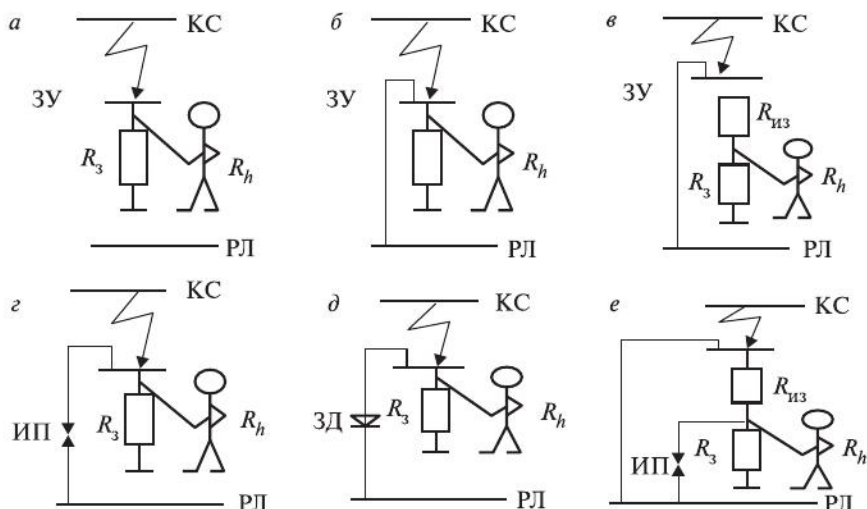


Рис. 4.55. Варианты возможных прикосновений (а—е) при коротком замыкании контактной сети на заземленные конструкции:

а — заземление конструкции без соединения с рельсом; б — заземление конструкции на рельс; в — заземление при наличии изоляции конструкции от ЗУ; г — заземление конструкции на рельс через искровой промежуток; д — заземление конструкции на рельс через диодный заземлитель; е — заземление на рельс через искровой промежуток конструкции, изолированной от ЗУ

рельсов, но надежно соединяют конструкцию с РЛ во время короткого замыкания (рис. 4.55 г, д).

При необходимости глухого присоединения к РЛ, например, рабочего заземления разрядника или защитного заземления привода разъединителя применяют изоляцию заземляющего присоединения и части конструкции (заземляемый рог разрядника или привод) от другой части конструкции (опора контактной сети), осуществляя глухое заземление одной части и заземление через защитное устройство другой (рис. 4.55, е). При заземлении мостов и пешеходных мостиков делают нейтральные вставки, которые наглухо заземляют на РЛ, а конструкцию моста заземляют на РЛ через защитное устройство. Аналогично поступают при заземлении опор гибких поперечин. Протяженные конструкции (мосты, путепроводы) заземляются на РЛ только в одном месте.

В последние годы на электрифицированных участках постоянного тока практически повсеместно применяют групповое зазем-

ление опор контактной сети, когда группу опор объединяют тросом с длиной плеча до 600 м и общей протяженностью до 1200 м, который присоединяется к РЛ в одной точке.

Установлено, что применение группового заземления опор контактной сети обладает существенным недостатком с точки зрения надежности работы максимальной токовой защиты в тяговых сетях постоянного тока. Это связано с присоединением группового заземления к РЛ в одной точке и включением последовательно в электрическую цепь короткого замыкания троса группового заземления опор, величина электрического сопротивления (длины плеча) которого в некоторых случаях становится соизмеримой с величиной сопротивления всей цепи короткого замыкания.

На рис. 4.55 моделируются также случаи прикосновения при различных вариантах выполнения заземления конструкций железнодорожного транспорта, доступных прикосновению.

Анализ электрических схем прикосновения показывает, что при нормировании сопротивления заземления конструкций R_3 на достаточно высоком уровне (выше 5 Ом по условиям электрической коррозии) в схеме *a* напряжение прикосновения в случае повреждения изоляции оказывается практически равным напряжению контактной сети. В схемах *б*, *г*, *д* напряжение прикосновения определяется последовательно включенными электрическими сопротивлениями цепи короткого замыкания и, так как величины этих сопротивлений значительно ниже параллельно включаемого электрического сопротивления тела человека, напряжение прикосновения является безопасным. В схемах *в*, *е* можно говорить о напряжениях *прикосновения* и *до прикосновения*, которые могут отличаться друг от друга, если электрические сопротивления R_3 и R_h имеют величину одного порядка.

В этом случае под *напряжением до прикосновения* понимается напряжение между двумя точками электрической цепи, которых может коснуться человек, а под напряжением прикосновения понимается напряжение между двумя точками электрической цепи в момент прикосновения к этим точкам человека. В дальнейшем в тексте употребляется только термин «напряжение прикосновения» в соответствующем ему смысле.

Опуская анализ всех качеств конструкций ЗУ, отметим основные негативные качества применяемых ЗУ с использованием рельсов, характеризующие их электробезопасность:

– глухое заземление на РЛ — создаются условия для вынесения опасных потенциалов при стационарных (нормальных) режимах работы тяговой сети на заземленные конструкции, при отсоединении заземляющего присоединения от РЛ (такие отсоединения производятся регулярно при ремонте рельсового пути) создаются условия для попадания полного напряжения контактной сети на заземленные конструкции (при этом невозможно отключить поврежденный участок средствами защиты);

– заземление на РЛ через искровой промежуток — при отказе ИП нарушается непрерывность тяговой сети при к.з. с последствиями при отсоединении заземляющего присоединения от РЛ;

– групповое заземление в одной точке через ИП, ЗД или ИП и ЗД последовательно — в цепь короткого замыкания включено дополнительное электрическое сопротивление троса группового заземления, что снижает чувствительность максимальной защиты, вероятность отказа защитных устройств увеличивается с последствиями отсоединения заземляющего присоединения;

– системы защитного отключения без соединения конструкций, подлежащих заземлению, к РЛ (в настоящее время практически не применяются из-за низкой помехоустойчивости и низкой надежности срабатывания) — созданы условия для вынесения опасных напряжений РЛ при к.з. и срабатывании защитного отключения на конструкции контактной сети, не обеспечивается защитное заземление при применении опор контактной сети для линий нетягового электроснабжения.

Глава 5. ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА ПОСТОЯННОГО ТОКА И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

5.1. Основные характеристики электрического рельсового транспорта постоянного тока

К электрической тяговой сети электрического рельсового транспорта относятся следующие основные электрические элементы: тяговые подстанции, контактная и рельсовая сети, а также связывающие их питающие и рельсовые (отсасывающие) линии.

К электрическому рельсовому транспорту относятся различные его виды: железнодорожный (магистральный грузовой, магистральный пассажирский, пассажирский высокоскоростной, пригородный), городской (метрополитен, трамвай), промышленный, карьерный и рудничный транспорт. Основные технические характеристики этих видов транспорта приведены в табл. 5.1.

Многообразие видов транспорта и систем их электроснабжения связано с видом применяемого электрического подвижного состава (ЭПС). То обстоятельство, что в тяговой сети постоянного тока не применяется номинальное напряжение выше 3000 В, связано, с одной стороны, с трудностью осуществления коммутационных аппаратов (контакторов и автоматических быстродействующих выключателей), вспомогательных двигателей для привода компрессоров и вентиляторов, с другой — с оптимальной конструкцией тягового двигателя постоянного тока, наибольшее напряжение на котором не превышает 1500 В. Напряжение 3000 В подается на постоянное последовательное соединение двух двигателей. Тяговые двигатели постоянного тока из-за их оптимальных тяговых характеристик применяются, как правило, в ЭПС постоянного и переменного тока, при этом электровозы и электропоезда переменного тока включают в себя силовую преобразовательную установку переменного тока промышленной частоты в постоянный ток для питания тяговых дви-

гателей. В последние годы выпускаются в опытной серии электро-
возы постоянного тока с асинхронными двигателями.

Таблица 5.1

Основные характеристики рельсового электрического транспорта

Вид	Род тока	Напряжение номинальное на токоприемнике, кВ	Напряжение номинальное на шинах подстанции, кВ	Средняя удельная тяговая нагрузка, А/км	Установленная мощность тяговых агрегатов подстанции, МВт
Железнодорожный	Пост.	3,0	3,3	100—200	12—24
	Перем.	25,0	27,5	15—30	50—80
Метрополитены	Пост.	0,750	0,825	800—1000	4—6
Трамвай	Пост.	0,550	0,6	300—500	0,6—1,2 (1,8—3,6)
Промышленный	Пост.	1,5; 3,0	1,65; 3,3		
	Перем.	6,0; 10,0	6,6; 11,0		
	Пост.	0,5; 1,5; 3,0	0,6; 1,65; 3,3		
Карьерный	Перем.	6,0; 10,0	6,6; 11,0		
	Пост.	0,25	0,3		
Рудничный	Перем. (ВЧ — 5 кГц)	1,5			

В зависимости от рода тока и напряжения, подводимого к ЭПС, различают системы электрической тяги: постоянного тока, однофазного тока промышленной частоты, однофазного тока пониженной частоты $16\frac{2}{3}$ Гц (за рубежом), трехфазного тока промышленной частоты (за рубежом).

При системе тяги на постоянном токе от электрических станций или районных подстанций энергосистемы трехфазный ток при помощи ЛЭП подводится к тяговым подстанциям (ТП), расположенным вдоль железной дороги, где напряжение понижается, а трехфазный переменный ток преобразуется в постоянный. По электрической тяговой сети электроэнергия в виде постоянного тока передается от ТП к ЭПС и далее без преобразований поступает к его тяговым двигателям. Последовательно могут включаться два двигателя в три параллельных цепи, три — в две параллельных цепи и шесть двигателей — в одну цепь (соответственно эти соединения называются: параллельное, последовательно-параллельное и последовательное).

Особенностью тяговой сети является использование рельсового пути в качестве одного из питающих ЭПС проводов электрической тяговой сети.

Одним из важнейших технологических недостатков электрификации железных дорог на постоянном токе является *распространение ЭМП в проводящем пространстве земли* или процесс протекания значительной части тягового тока по земле (блуждающие токи) и разрушение подземных металлических конструкций из-за процесса электрической коррозии (электролитического растворения металлов).

Осуществление защиты стационарных конструкций контактной сети от электрической коррозии вызывает необходимость применения различных защитных устройств: искровых промежутков (ИП), групповых объединений опор с диодными заземлителями (ЗД) и групповых объединений опор с комбинацией ЗД и ИП. Для защиты других подземных сооружений от электрической коррозии применяется система активных и пассивных мер.

Активной системой защитных мер называют меры, снижающие токи в земле от источника их возникновения — электрических железных дорог постоянного тока. К ним относят дренажную защиту, протекторную защиту подземного сооружения, катодную защиту и различные их сочетания: усиленную дренажную защиту, дренажно-катодную защиту и т.п.

Наиболее эффективными являются специальные активные защитные меры: перевод системы электроснабжения электрической тяги постоянного тока на систему электроснабжения переменного тока; уменьшение продольного сопротивления рельсов применением электрических соединителей и тяжелых типов рельсов; увеличение переходного сопротивления рельсы—грунт; применение полимерных прокладок между верхним строением пути и шпалами; сохранение чистоты щебня в балластной призме; уменьшение расстояния между тяговыми подстанциями; снижение тока в рельсовой линии применением схем с источниками тока; применение разнополярного питания контактной сети двухпутного участка; оптимальное расположение шунтирующих перемычек между рельсовыми путями двухпутного участка.

Пассивной системой защитных мер называют меры, предотвращающие воздействие и проникновение блуждающих токов на подземные сооружения. К пассивной системе относят все виды изо-

ляции подземных сооружений от грунта и секционирование протяженных подземных сооружений, в том числе вентильное секционирование РС.

Другим технологическим недостатком электрификации является *многофункциональное использование рельсов*. В гл. 1 была показана структура функций рельсового пути электрифицированного железнодорожного транспорта. Многофункциональное использование рельсового пути может создавать опасные ситуации, характеризующиеся следующими особенностями:

- возможностью возникновения электротравм при обслуживании рельсов и присоединенных к ним устройств в нормальных и в аварийных режимах работы, например, при замыкании контактной сети на рельс;

- отказом рельсовых цепей автоблокировки из-за влияния на их работу электрических процессов в заземляющих и питающих устройствах системы электроснабжения;

- трудностью одновременного удовлетворения требований обеспечения электробезопасности (*снижения* сопротивления изоляции рельсов для уменьшения напряжений шага и прикосновения) и обеспечения надежности рельсовых цепей автоблокировки и защиты конструкций от электрической коррозии (*повышения* сопротивления изоляции рельсов);

- автоматическим отключением тяговой сети при защите от атмосферных перенапряжений;

- вредным воздействием на окружающую среду и человека электромагнитного поля (ЭМП) тяговой сети — мощного источника излучения поля промышленной частоты, особенно его магнитной составляющей;

- возможностью разрушения подземных металлических сооружений и коммуникаций от электрической коррозии из-за протекания токов в земле (блуждающих токов) при электрической тяге постоянного тока (особенно);

- опасностью возгорания при перевозке и переработке нефтеналивных грузов из-за возможности искрообразования в рельсах и присоединенных к ним конструкциях.

Передача больших электрических мощностей по рельсовым линиям (РЛ) и земле, их многофункциональное использование, несимметричность воздушных линий (контактных сетей) при протекании

кании токов электрической тяги и распределении напряжений на элементах тяговых сетей, питающих электрические локомотивы, создают условия для возникновения:

- напряжений прикосновения в РЛ и присоединенных к ним конструкциях в рабочих и аварийных режимах работы тяговой сети;

- напряжений прикосновения на защитном ЗУ тяговых подстанций, в связи с использованием его в качестве элемента тяговой сети, в рабочих и аварийных режимах;

- интенсивного загрязнения биосферы ЭМП, неблагоприятно воздействующим на обслуживающий персонал и население.

Объективное развитие железнодорожного транспорта по пути его электрификации требовало решения возникающих проблем защиты человека и окружающей среды от негативного воздействия ЭМП. Уже в первых работах по проблемам электрификации железных дорог, на заре ее развития, поднимались и решались проблемы защиты от негативных последствий распространения ЭМП в окружающей среде. Первоначально это касалось проводящего пространства земли, так как сначала электрификация велась по системе постоянного тока, проблема сводилась к *защите сооружений* от воздействия «блуждающих токов».

В послевоенные годы в связи с развитием электрифицированного транспорта как на магистральном железнодорожном транспорте, так на промышленном и городском, развитием трубопроводного транспорта, усложнением коммуникаций коммунального хозяйства проблема защиты подземных сооружений от электрической коррозии превратилась в межотраслевую.

Большой вклад в разработку теории, принципов расчета и проектирования защиты от неблагоприятного воздействия токов в рельсах и земле на сооружения, присоединенные к ним конструкции и устройства внесли специалисты в области электроснабжения электрических железных дорог: И.М. Ершов, В.И. Дмитриев, Р.Н. Карякин, Б.И. Косарев, А.В. Котельников, А.А. Кудрявцев, Б.Г. Лордкипанидзе, К.Г. Марквардт, Г.Г. Марквардт, Л.С. Панфиль, В.Н. Пупынин, Э.П. Селедцов, Н.Г. Сергеев, С.М. Сердинов, И.В. Стрижевский, М.Г. Шалимов и др.

Несмотря на выход в свет в последние годы ряда фундаментальных работ в этой области, большое число сложных и все еще нерешенных задач требуют исследования и решения.

5.2. Параметры тяговой сети постоянного тока

Параметры тяговой сети определяют распределение потенциала и тока в рельсах на электрических железных дорогах постоянного тока.

В качестве модели распределения потенциала и тока в рельсах в стационарном режиме принята цепная электрическая схема замещения (рис. 5.1). Распределение напряжений и токов в рельсах осуществляется на основе решения системы дифференциальных уравнений для цепной схемы

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\varphi_x}{dx} &= -r_p I_{px}, \\ dI_{px} &= -\frac{\varphi_x}{r_{II}} dx. \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

Решая систему уравнений (5.1), найдем:

$$\left. \begin{aligned} I_{px} &= Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x}, \\ \varphi_x &= m(Ae^{\gamma x} - Be^{-\gamma x}), \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

где $\gamma = \sqrt{\frac{r_p}{r_{II}}}$ — коэффициент затухания РЛ, 1/км; $m = \sqrt{r_p r_{II}}$ — волновое сопротивление РЛ, Ом; r_p — продольное сопротивление РЛ постоянному току, Ом/км; r_{II} — переходное сопротивление «рельсы—земля», Ом·км.

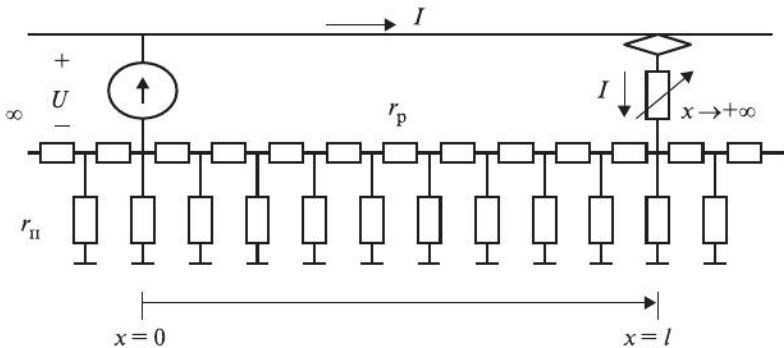


Рис. 5.1. Принципиальная схема распределения токов в рельсовой сети и земле в стационарном режиме на электрифицированных участках железных дорог постоянного тока

Если принять допущение о том, что рельсы слева от точки, где $x = 0$ и справа от точки где $x = l$ бесконечной длины и электрическая цепь на этих участках имеет волновое сопротивление m , грунт и переходное сопротивление однородны по длине участка, а применяемые рельсы одного типа, тогда для выбранного направления токов (рис. 5.2) и граничных условий при полном стекании тока из рельсов в землю

$$\left. \begin{aligned} \text{при } x = 0 \text{ (справа)} \quad I_{\text{px}} &= -I/2 = A + B, \\ &-Im/2 = -m(A - B), \end{aligned} \right\}$$

откуда $A = 0$, $B = -I/2$.

Система уравнений (5.2) для участка $0 - l/2$ примет вид:

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{px}} &= -\frac{I}{2} e^{-\gamma x}, \\ \varphi_x &= -\frac{Im}{2} e^{-\gamma x}. \end{aligned} \right\}$$

Для граничных условий при $x = 0$ и $x = l/2$, решая систему уравнений (5.2), получим:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= Ae^{\gamma l/2} + Be^{-\gamma l/2}, \\ -\frac{I}{2} &= A + B; \end{aligned} \right\}$$

при тех же допущениях найдем

$$I_{\text{px}} = -\frac{I}{2} \cdot \frac{e^{\gamma(x-l)} - e^{-\gamma x}}{1 - e^{-\gamma l}},$$

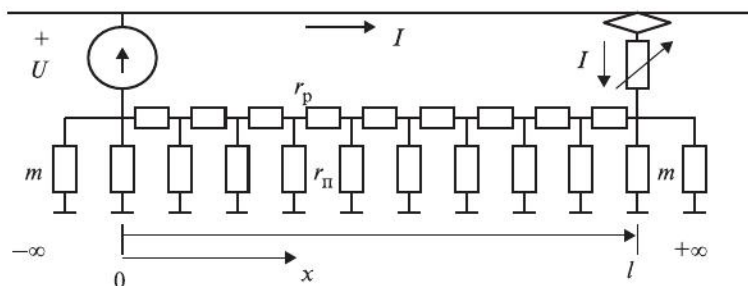


Рис. 5.2. Принципиальная схема замещения для расчета потенциала и тока в рельсовой сети

$$\Phi_x = \frac{Im}{2} \cdot \frac{e^{-\gamma(l-x)} - e^{-\gamma x}}{1 - e^{-\gamma l}}. \quad (5.3)$$

Как было показано выше, расчетные соотношения получены при существенном допущении, что весь ток рельсовой сети в месте подключения тяговой нагрузки стекает в землю. Такой режим теоретически возможен в крайне редких случаях: при низком переходном сопротивлении «рельсы—земля» и значительном удалении электрической нагрузки от источника напряжения.

Другим существенным допущением модели является моделирование достаточно протяженного поезда или, как обычно принято говорить, электроподвижного состава (ЭПС) физической точкой. Учитывая тенденцию последних лет при электрификации железных дорог, расстояния между источниками напряжения (тяговыми подстанциями) уменьшаются и составляют в последние годы при электрификации на постоянном токе номинальным напряжением на шинах ТП 3,3 кВ 10—15 км. Это обстоятельство вызывает необходимость учитывать в расчетной модели значительную долю тока, протекающего непосредственно по рельсам, а не по электрической цепи «рельсы—земля». Физический смысл распределения токов в рельсовой сети иллюстрирует рис. 5.3.

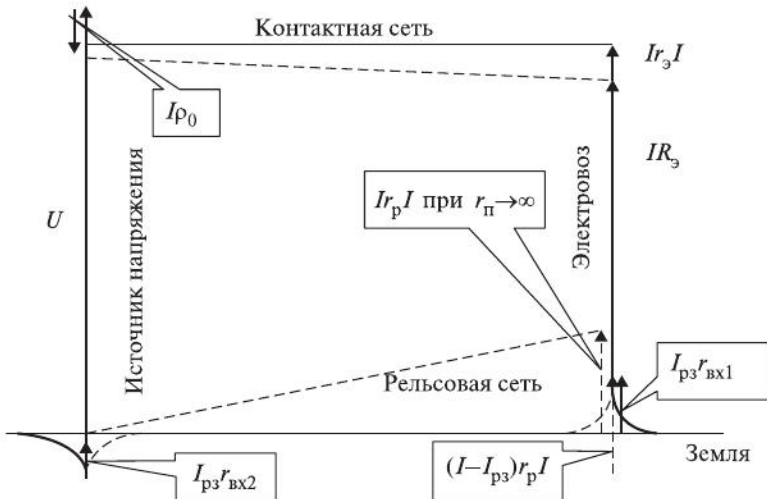


Рис. 5.3. Потенциальная диаграмма электрической цепи «источник напряжения—контактная сеть—электрический локомотив—рельсовая линия»

Применяя первый закон Кирхгофа к замкнутой цепи, можно записать следующие два уравнения для двух возможных контуров тока с учетом протекания тока по рельсам и земле, первый из которых по пути «источник напряжения—контактная сеть—ЭПС—рельсовая сеть», а второй — «источник напряжения—контактная сеть—ЭПС—рельсовый путь—земля—рельсовый путь»:

$$U = I\rho_0 + Ir_{\kappa}l + IR_{\text{Э}} + (I - I_{\text{рз}})r_{\text{р}}l;$$

$$U = I\rho_0 + Ir_{\kappa}l + IR_{\text{Э}} + I_{\text{рз}}r_{\text{вх1}} + I_{\text{рз}}r_{\text{вх2}}.$$

Решая уравнения совместно, найдем важное промежуточное соотношение распределения токов в рельсовой сети в зависимости от составляющих электрических сопротивлений

$$\frac{I}{I_{\text{рз}}} - 1 = \frac{r_{\text{вх1}} + r_{\text{вх2}}}{r_{\text{р}}l},$$

откуда

$$I_{\text{рз}} = I \frac{r_{\text{р}}l}{r_{\text{вх1}} + r_{\text{вх2}} + r_{\text{р}}l},$$

$$I_{\text{р}} = I \frac{r_{\text{вх1}} + r_{\text{вх2}}}{r_{\text{вх1}} + r_{\text{вх2}} + r_{\text{р}}l}. \quad (5.4)$$

Подставляя из (5.4) выражение для тока, стекающего из рельсовой сети в землю $I_{\text{рз}}$, в уравнение (5.3), получим выражения, характеризующие суммарный ток в рельсах и потенциал рельсов относительно удаленной земли:

$$I_{\text{р}\Sigma} = \frac{I_{\text{р}}}{2} + I_{\text{рх}} = \frac{I}{2} \left[\frac{r_{\text{вх1}} + r_{\text{вх2}}}{r_{\text{вх1}} + r_{\text{вх2}} + r_{\text{р}}l} \left(\frac{e^{\gamma(x-l)} - e^{-\gamma x}}{1 - e^{-\gamma l}} \right) \right], \quad (5.5)$$

$$\varphi_x = \frac{Im}{2} \left(\frac{e^{-\gamma(1-x)} - e^{-\gamma x}}{1 - e^{-\gamma l}} \right) \frac{r_{\text{р}}l}{r_{\text{вх1}} + r_{\text{вх2}} + r_{\text{р}}l}.$$

Вывод. Из выражения (5.5), применяя закон Ома к соотношению для разности потенциалов между рельсовой сетью и землей для участка цепи, следует, что входное электрическое сопротивление рельсовой сети с учетом шунтирующего влияния рельсов и без учета гиперболических функций, характеризующих распростране-

ние потенциала в пространстве вдоль рельсовой сети, может определяться из соотношения

$$R_{\text{вх}p} = \frac{mr l}{r_{\text{вх}1} + r_{\text{вх}2} + r l_p}. \quad (5.6)$$

В случае $r_{\text{вх}1} = r_{\text{вх}2} = m/2$ выражение примет вид

$$R_{\text{вх}p} = \frac{mr l}{m + r l_p}.$$

Электрическое сопротивление рельсов линии (сети) постоянно-му току r_p может быть определено с учетом соотношения

$$r_p = \frac{r_{\text{пл}}}{2n},$$

где $r_{\text{пл}}$ — электрическое сопротивление стального рельса постоянному току (табл. 5.2), Ом/км; n — количество путей.

Таблица 5.2

Электрическое сопротивление стальных рельсов постоянному току

Тип рельса	Площадь сечения, мм ²	Периметр, мм	Сопротивление постоянному току при 20 °С, Ом/км	
			одного рельса	с учетом стыков
Р-75	9503	794	0,0221	0,0248
Р-65	8270	774	0,0254	0,0285
Р-50	6600	670	0,0318	0,0359
Р-43	5700	560	0,0367	0,0412

Электрическое сопротивление рельсов постоянному току может снижаться при температурах ниже -20 °С более чем на 20 %.

Напряжение РЛ относительно удаленной земли и напряжение прикосновения к рельсу может превышать нормируемые уровни в нормальном стационарном режиме работы электрической тяги и в режиме к.з. контактной сети на РЛ, а также в режиме пуска ЭПС. Короткое замыкание контактной сети на рельс может возникать при повреждении изоляции в контактной сети и в ЭПС.

При определении параметров переходного режима к.з. или пуска ЭПС и изменения напряжения РЛ относительно удаленной земли в этом случае необходимо учитывать схему замещения (рис. 5.4) электрической цепи для переходного режима короткого замыкания контактной сети на рельс или пуска ЭПС (см. рис. 5.2).

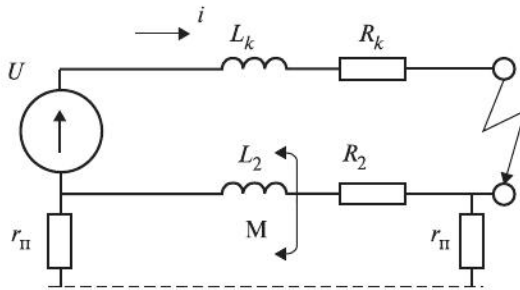


Рис. 5.4. Принципиальная схема замещения электрической цепи короткого замыкания контактной сети на рельс

Индуктивность РЛ L_2 включает внутреннюю индуктивность, определяемую из соотношения для внутреннего электрического сопротивления рельсов для частоты переменного тока ω ,

$$Z_{\text{рвн}} = \frac{r_{\text{пл}}}{2n} + \left(\frac{0,56}{nu} \sqrt{\mu\rho} + j \frac{0,42}{nu} \sqrt{\mu\rho} \right) \sqrt{\omega}, \quad (5.7)$$

и внешнюю индуктивность, определяемую соотношением с использованием известной формулы Φ . Полячка для коэффициента взаимоиנדукции между контурами при синусоидальном токе с частотой ω ,

$$Z_{\text{рвнш}} = \left(\frac{\pi}{2} \cdot 10^{-4} + j \cdot 10^{-4} + j \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln B \right) \omega - j \cdot 10^{-4} \omega \ln \omega, \quad (5.8)$$

где u — периметр сечения рельса, м; μ — магнитная проницаемость материала рельса, зависящая от состава рельсовой стали и величины тока в рельсах; ρ — удельное электрическое сопротивление материала рельса, Ом·м (для рельсовой стали ρ принимается $21 \cdot 10^{-4}$ Ом·м); ω — частота синусоидального переменного тока, 1/с;

$$B = \frac{1 \cdot 10^5 \sqrt{\rho}}{R_{\text{рз}}};$$

$R_{\text{рз}}$ — эквивалентный радиус рельса или рельсовой линии, м; $R_{\text{рз}} = \sqrt{R_{\text{п}} a_{\text{п}}}$ — для однопутного участка, $R_{\text{рз}} = \sqrt[4]{R_{\text{п}} a_{\text{п}} a_{1,2}^2}$ — для двухпутного участка; $R_{\text{п}} = \frac{u}{2\pi}$ — радиус окружности, длиной равной периметру рельса, м; $a_{\text{п}}$ — расстояние между осями рельсов рельсовой линии, м ($a_{\text{п}} = 1,6$ м); $a_{1,2}$ — расстояние между осями путей двухпутного участка, м.

Индуктивность тяговой сети L_k определяется индуктивностью контура «контактная сеть—земля» и включает индуктивности реак-

тора в цепи заземляющего фидера ТП и последовательно включенных дросселей-трансформаторов рельсовой цепи автоблокировки.

Индуктивность основной обмотки дроссель-трансформаторов, включаемой последовательно в цепь РЛ, как правило, через каждые 2 км (длина рельсовой цепи), приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Индуктивность основной обмотки основных типов дроссель-трансформаторов, применяемых в рельсовых цепях

Тип дроссель-трансформатора	Полное сопротивление основной обмотки переменному току 50 Гц, Ом	Сопротивление основной обмотки постоянному току, Ом	Индуктивность основной обмотки, мГн
ДТ-0,2 (1000 А)	0,2+10 %	0,0008±10 %	0,637+10 %
ДТ-0,2 (500 А)	0,2+10 %	0,0007±10 %	0,637+10 %
ДТ-0,6 (1000 А)	0,58—0,62	0,0013±10 %	1,92±3,3 %
ДТ-0,6 (500 А)	0,6+10 %	0,0018±10 %	1,92+10 %
ДТ-1-250	0,7	0,0016±10 %	2,23

Последовательно-параллельное включение основных обмоток дроссель-трансформаторов в РЛ позволяет оценить индуктивность одного дроссель-трансформатора однопутной РЛ как $L_0/2$, где L_0 — индуктивность основной обмотки дроссель-трансформатора.

Из свойств реактивного сопротивления и соотношения (5.7) можно выразить внутреннюю индуктивность рельса и принять на единицу длины 1 км:

$$L_{2вн}' = \frac{0,42}{\pi i} \sqrt{\mu\rho} \sqrt{\omega} \cdot \frac{1}{\omega} = \frac{0,42}{\pi i} \sqrt{\frac{\mu\rho}{\omega}}$$

Заменяв угловую частоту через период синусоидального процесса $\omega = 2\pi/t$ и приняв допущение о том, что за весь переходный процесс изменение направления вектора напряжения (тока) происходит не более одного раза за период до $t = 0,1$ с, можно с достаточной степенью точности принять:

$$L_{2вн}' = \frac{0,297}{\pi i} \sqrt{\frac{\mu t}{\pi\gamma}}, \text{ Гн/км.} \quad (5.9)$$

С учетом соотношения для коэффициента взаимной индуктивности М контуров «контактная сеть—земля» и «рельсы—земля» Р. Рюденберга при экспоненциально изменяющемся токе к.з. полную индуктивность 1 км рельсовой сети при скорости электрических про-

цессов, близких к скорости при частоте 50 Гц, и продолжительностью до 0,1 с можно выразить формулой

$$L_2 = \frac{0,297}{\pi i} \sqrt{\frac{\mu t}{\pi \gamma}} + 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1417}{h} \sqrt{\rho_{\text{гр}} \tau}, \text{ Гн/км}, \quad (5.10)$$

где γ — удельная электрическая проводимость рельсовой стали, 1/Ом·м; $\rho_{\text{гр}}$ — удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м; τ — постоянная времени процесса изменения тока короткого замыкания, с; $\tau = L_{\text{к}}/R_{\text{к}}$, $L_{\text{к}}$ — полная индуктивность контура цепи короткого замыкания, Гн; $R_{\text{к}}$ — полное сопротивление постоянному току электрической цепи короткого замыкания, Ом.

Одним из важнейших параметров РЛ является электрическое *переходное сопротивление* «рельс—земля» $r_{\text{п}}$. Несовершенство изоляции РЛ от земли создает условия, когда электрическое сопротивление собственно «изолирующей» части конструкции верхнего строения пути в виде шпал (в настоящее время, как правило, железобетонных) и балластной призмы из щебня *соизмеримо* с электрическим сопротивлением растеканию тока в ближних слоях земли в виде насыпи с большим удельным электрическим сопротивлением.

Наиболее известной моделью аналитического расчета переходного сопротивления является многослойная модель, разработанная д-ром техн. наук Б.И. Косаревым, в которой рельсовый путь заменяется эквивалентной пластиной, а переходное сопротивление может быть определено с помощью многочлена:

$$r_{\text{п}} = b_0 + b_1 \rho_6 + b_2 R_{\text{ш}} + b_3 \rho_{\text{эл}}^0 + b_4 Z_2 + b_5 h_{\text{н}} + b_6 \rho_{\text{н}},$$

где $\rho_{\text{ш}}$, ρ_6 , $\rho_{\text{н}}$ — удельные электрические сопротивления материалов шпал, балласта и насыпи соответственно, кОм·м; $\rho_{\text{эл}}^0$ — эквивалентное удельное электрическое сопротивление грунта, кОм·м; $R_{\text{ш}}$ — электрическое сопротивление шпалы, кОм; $h_{\text{н}}$ — высота насыпи; b_0 — b_6 — экспериментальные коэффициенты.

Такая модель учитывает шунтирующее влияние рельсовой линии как заземлителя с утечкой не аналитически, а при помощи дискретной электрической схемы замещения и определяется с помощью экспериментальных измерений с последующим расчетом с помощью численных методов.

5.3. Электромагнитное и магнитное поля тяговой сети в окружающем пространстве

Электрическое питание контактной сети от тяговых подстанций осуществляется на однопутных и двухпутных участках желез-

ных дорог с помощью схем двустороннего питания, при этом каждый путь может питаться раздельно.

Двухпутную схему применяют в двух видах. Узловая схема с установленными на участке электроснабжения постами секционирования (ПС) улучшает качество напряжения в контактной сети и позволяет отключать защитой от токов к.з. при повреждениях минимально возможный участок контактной сети. Параллельная схема с установленными пунктами параллельного соединения (ППС) контактной сети позволяет снижать потери энергии в тяговой сети.

На рис. 5.5 приведены принципиальные схемы электропитания межподстанционных зон тяговой сети при узловой и параллельной схемах электроснабжения однопутного и двухпутного участков.

Системы электроснабжения тяговой сети железнодорожных линий представляют собой регулярную схему расстановки тяговых подстанций вдоль линии, включающие достаточно сложные электрические схемы первичного (от энергосистем) и вторичного (от ТП) электроснабжения ЭПС и нетяговых потребителей электроэнергии.

При рассмотрении распространения ЭМП тяговой сети в окружающем пространстве целесообразно рассматривать одну ячейку регулярно повторяющихся электрических схем вторичного электроснабжения, представляющую собой электрическую схему одной межподстанционной зоны тяговой сети.

В первом приближении для понимания принципов распределения ЭМП тяговой сети постоянного тока в окружающем пространстве достаточно воспользоваться рассмотрением электрической схемы питания межподстанционной зоны однопутного участка при наличии одной тяговой нагрузки.

На рис. 5.6 изображена принципиальная схема межподстанционной зоны тяговой сети с одной тяговой нагрузкой, расположенной в центре зоны.

Из рисунка видно, что справа и слева от тяговой нагрузки образуются контуры с токами тяговой сети, обозначенные соответственно индексами 1 и 2. Токи в контактной сети I_{k1} и I_{k2} , токи в рельсовой линии I_{p1} и I_{p2} , токи заземляющих (отсасывающих) проводов $I_{зф1}$ и $I_{зф2}$, ток тяговой нагрузки $I_{тн}$, протекающие по этим контурам, создают в окружающем пространстве магнитную составляющую ЭМП.

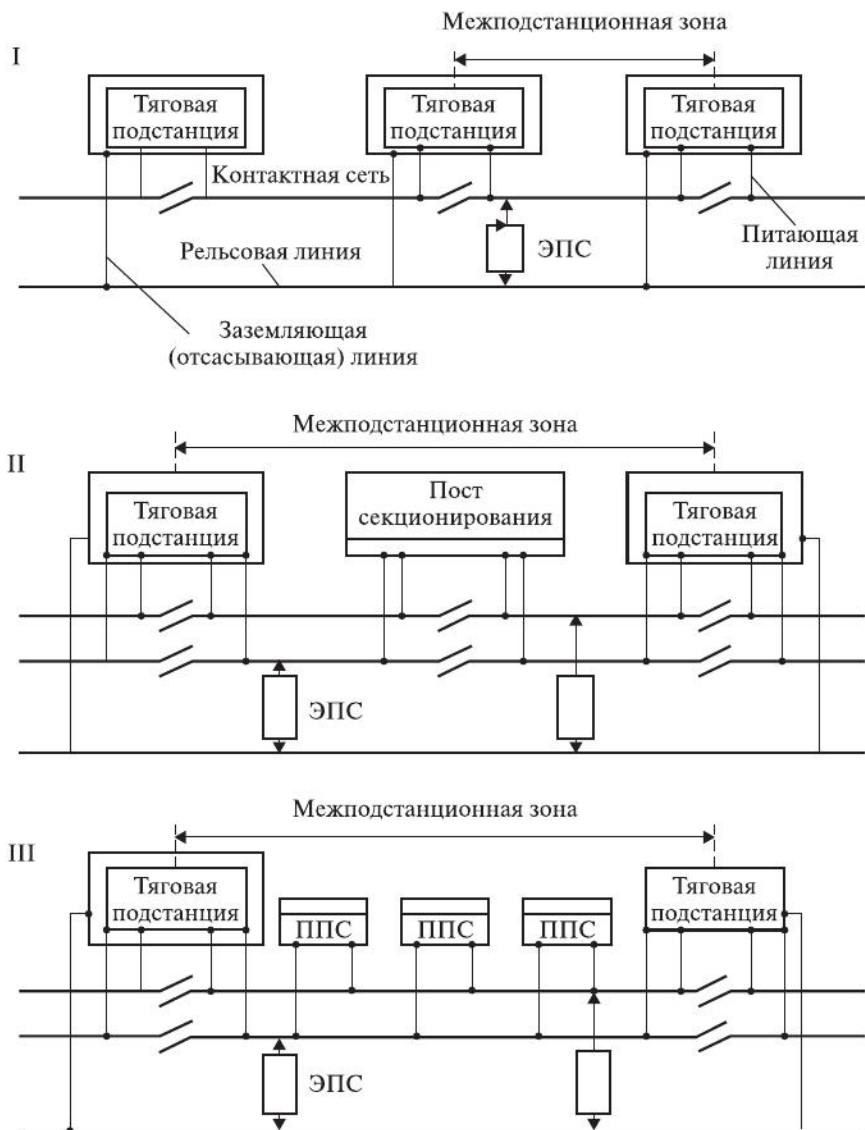


Рис. 5.5. Принципиальные схемы питания электрического подвижного состава: I — схема питания однопутного участка; II — узловая схема питания двухпутного участка; III — параллельная схема питания двухпутного участка с пунктами параллельного соединения (ППС)

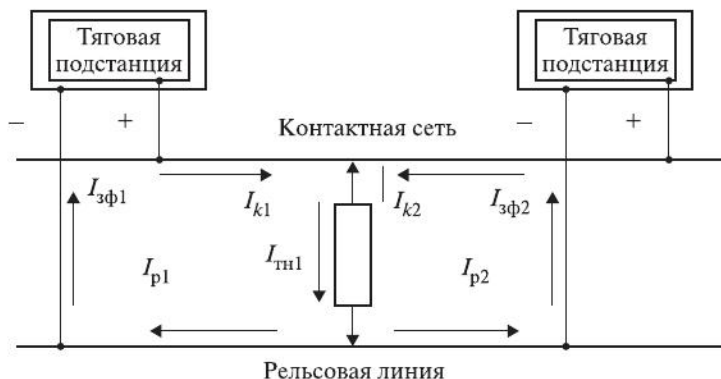


Рис. 5.6. Принципиальная схема межподстанционной зоны тяговой сети постоянного тока с одной тяговой нагрузкой

С точки зрения распространения магнитного поля тяговой сети структуру каждого из контуров наиболее точно можно представить как поле двух параллельных бесконечно длинных проводов с противоположно направленными токами I_k и I_p . Это обстоятельство определяется и геометрическими размерами образованных контуров, так как расстояние между проводами (высота контактного провода над головкой токоведущего рельса) составляет несколько метров (от 5,25 м для магистрального транспорта), а длина контура (в пределе длина межподстанционной зоны) составляет несколько километров. Для таких геометрических размеров, без большой погрешности, можно рассматривать *модель структуры ЭМП* от двух параллельных бесконечно длинных проводов с противоположно направленными в них токами.

Такой модели поля не будет соответствовать его структура распространения около потребляющего ток ЭПС или в месте расположения тяговой подстанции; рассмотрение распространения ЭМП тяговой сети в окружающем пространстве в этих случаях может служить темой специального исследования.

Для бесконечно длинных проводов с противоположно направленными токами величина напряженности магнитного поля может быть определена из выражения для векторного потенциала A этого поля в соответствии с рис. 5.7.

Все элементы проводов в представленной модели источника ЭМП направлены вдоль оси Y , поэтому вектор A имеет изменяю-

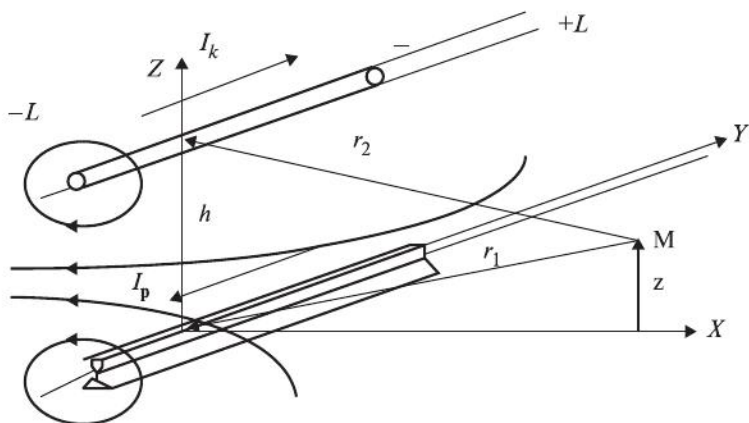


Рис. 5.7. Схема ЭМП от источника из двух параллельных проводов с противоположно направленными токами ($L \rightarrow \infty$)

щуюся составляющую только по оси Y . Векторный потенциал магнитного поля в этом случае можно определить из соотношения

$$A_y = \mu_0 \frac{I_k}{4\pi} \int_{-L}^{+L} \frac{dy}{\sqrt{y^2 + r_2^2}} - \mu_0 \frac{I_p}{4\pi} \int_{-L}^{+L} \frac{dy}{\sqrt{y^2 + r_1^2}}. \quad (5.11)$$

Приняв допущение о равенстве токов в контактной сети и рельсах: $I_k = I_p = I$ и о бесконечной длине проводов контактной сети $L \rightarrow \infty$, получим

$$A_y = \mu_0 \frac{I}{2\pi} \ln \frac{r_1}{r_2}. \quad (5.12)$$

Посредством дифференцирования выражения (5.12) могут быть получены слагаемые напряженности магнитного поля по осям Z и X :

$$H_z = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_y}{\partial x}, \quad H_x = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_y}{\partial z} \quad (5.13)$$

и суммарная напряженность магнитного поля в точке M в виде векторной суммы напряженностей по осям Z и X :

$$H_M = H_z + H_x.$$

Подставляя в (5.13) выражение из (5.12), найдем

$$H_x = \frac{I}{2\pi} \left[\frac{-z}{x^2 + z^2} + \frac{z-h}{x^2 + (h-z)^2} \right]. \quad (5.14)$$

$$\text{При } z = 0 \quad H_x = \frac{Ih}{2\pi(x^2 + h^2)}.$$

$$\text{При } z = h \quad H_x = \frac{-Ih}{2\pi(x^2 + h^2)}.$$

Равенство по абсолютной величине векторов H_x в полученных соотношениях при подстановке граничных условий говорит о симметричности величины вектора напряженности магнитного поля, направленного по оси x , в окружающем пространстве относительно источника поля из двух параллельных проводов бесконечной длины.

Аналогично найдем:

$$H_z = \frac{Ix}{2\pi} \left[\frac{1}{x^2 + z^2} - \frac{1}{x^2 + (h-z)^2} \right]. \quad (5.15)$$

$$\text{При } z = 0 \quad H_z = \frac{I}{2\pi x} \left(1 - \frac{x^2}{x^2 + h^2} \right).$$

$$\text{При } z = h \quad H_z = \frac{-I}{2\pi x} \left(1 - \frac{x^2}{x^2 + h^2} \right).$$

$$\text{При } z = h/2 \quad H_z = 0.$$

Модуль абсолютной величины вектора напряженности магнитного поля в точке М может быть найден из векторной суммы модулей H_z и H_x из выражения

$$H_M = \sqrt{H_z^2 + H_x^2}. \quad (5.16)$$

На рис. 5.8 представлена зависимость величины модуля напряженности магнитного поля на расстоянии 5 и 10 м от тяговой сети при следующих показателях тяговой сети: ток в контактной сети равен току в рельсах и потребляемому току ЭПС и составляет величину 314 А, высота подвески контактного провода 5,25 м с учетом принятых ранее допущений, а в табл. 5.4 приведены расчетные значения напряженностей магнитного поля и индукции вблизи контактной сети на уровне головки рельса.

Из анализа графиков (знак показывает только изменение направления или неизменность направления вектора для данного параметра) видно, что абсолютная величина напряженности магнитного поля H существенно снижается с увеличением расстояния от контура тяговой сети. Так, при удалении от контура на 5 (H_5) и 10 м (H_{10}) напряженность магнитного поля снижается почти в пять раз.

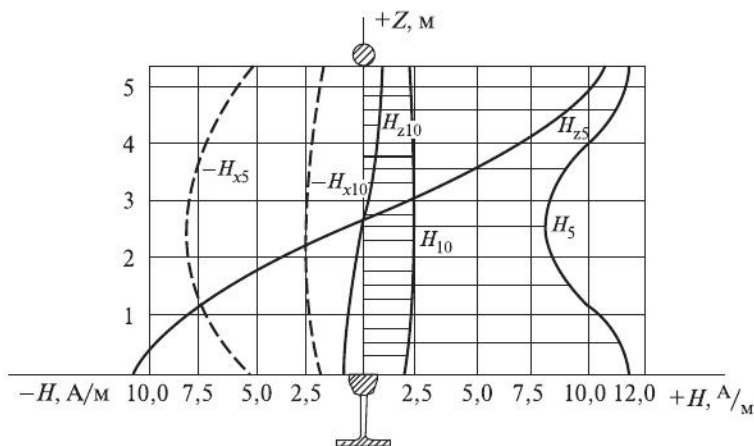


Рис. 5.8. Величина модуля напряженности магнитного поля вблизи контактной сети

Таблица 5.4

Расчетные значения напряженности магнитного поля (А/м) и индукции (мкТл) вблизи контактной сети на уровне головки рельса

Ток I_k , А	H , А/м при X , м		B , мкТл при X , м	
	5	10	5	10
100	2,31	1,30	2,90	1,63
200	4,63	2,59	5,82	3,26
300	6,94	3,89	8,72	4,89
400	9,26	5,18	11,6	6,52
500	11,6	6,49	14,5	8,16
600	13,9	7,79	17,5	9,79
700	18,5	9,09	23,2	11,4
800	20,8	10,4	26,1	13,1
900	23,1	11,7	29,0	14,7
1000	25,4	13,0	31,9	16,3

Необходимость расчета напряженности и индукции магнитного поля для широкого диапазона значений токов (см. табл. 5.4) вызвана тем, что ток ЭПС никогда не бывает неизменным даже в случае движения ЭПС с поездом одного и того же веса с равномерной скоростью при неизменном напряжении в контактной сети. Дело в том, что потребляемый ток в значительной мере зависит от характеристик профиля пути: крутизны, кривизны, протя-

женности и сочетания сложных элементов профиля, оказывающих сопротивление движению.

При движении по уклону и при необходимости остановки поезда потребление тока может отсутствовать или при рекуперативном торможении иметь обратную направленность из-за генерирования тока в тяговую сеть. Сопротивлениями движению являются также сопротивления, препятствующие движению ЭПС; временно и при определенных условиях также влияющими на изменение тягового тока являются: сопротивление от действия ветра, дополнительное сопротивление при низких температурах воздуха, а у пассажирского ЭПС сопротивление при вращении внутренних генераторов, приборов отопления вагонов и т.п.

Таким образом, величина потребляемого тока ЭПС, являющегося источником магнитного поля контура тяговой сети, зависит от режима движения поезда (тяги, торможения, холостого хода), основных и дополнительных сил сопротивления движению подвижного состава. Эта величина изменяется в широких пределах, поэтому в табл. 5.4 приведены значения для величин токов электрической тяги с интервалом 100 А.

5.4. Электрическое поле контактной сети

В данном разделе рассматривается дистанционное воздействие на человека стационарного электрического поля высоковольтной линии тяговой (контактной) сети.

Пусть линия электрической передачи (постоянного или переменного тока промышленной частоты) проходит на высоте h , а рост человека равен K (рис. 5.9).

Эта линия с зарядом $+Q$ относительно земли создает в воздушном пространстве электрическое поле, силовые линии которого, показанные тонкими штриховыми линиями, оказывают воздействие и на человеческий организм.

Можно рассматривать два граничных случая распространения электрической составляющей ЭМП при различных случаях протекания по петле «линия—земля» тягового тока:

- ток свободно распространяется в проводящем пространстве земли (без учета эквивалентного рельса);
- ток полностью протекает по эквивалентному рельсу.

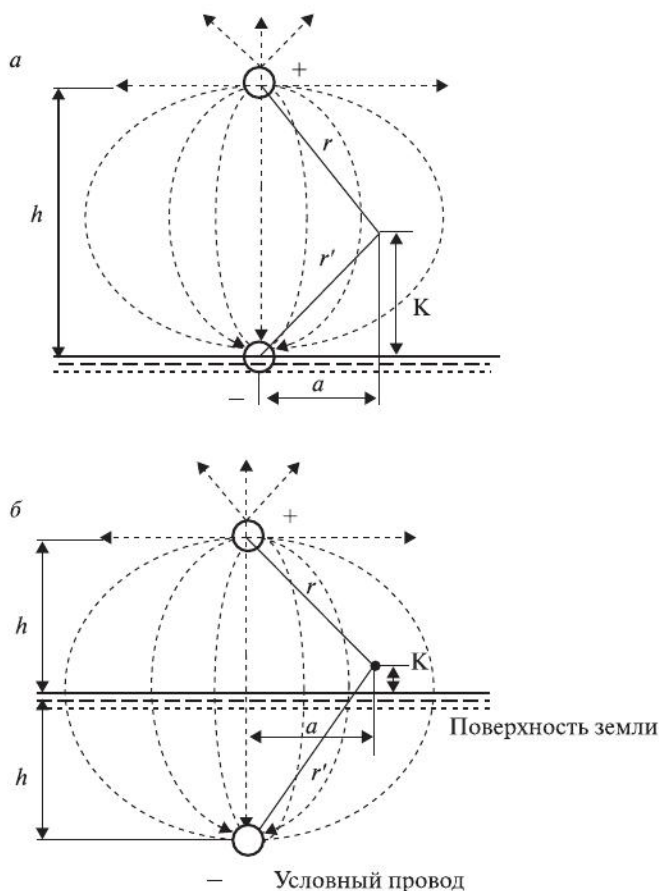


Рис. 5.9. Принципиальные схемы линий тока электрической составляющей ЭМП при протекании тягового тока по эквивалентному рельсу (а) и в проводящем пространстве земли (б)

В реальных условиях электрическая составляющая ЭМП изменяется во времени и пространстве и имеет некоторые срединные характеристики по сравнению с рассмотренными граничными случаями, так как всегда одна часть тягового тока протекает по рельсам, а другая часть — в проводящем пространстве земли.

Потенциал электрического поля относительно нулевого потенциала земли, появляющийся в свободном пространстве, окружающем высоковольтную линию, определяется потенциалами, созда-

ваемыми линией и ее зеркальным отображением относительно поверхности земли:

$$u = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r'}{r}, \quad (5.17)$$

где Q — заряд высоковольтной линии; $\epsilon_0 = 0,8854 \cdot 10^{-11}$ — абсолютная диэлектрическая проницаемость (электрическая постоянная), Ф/м; r, r' — расстояния до рассматриваемой точки пространства от линии и ее зеркального отображения, м.

Напряжение контактной сети относительно земли по этой модели расчета может быть определено из соотношения:

$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{2h}{d/r} \right), \quad (5.18)$$

где d — эквивалентный диаметр контактного провода, м; h — высота подвески контактного провода, м.

Выражая Q из (5.18) и подставляя в (5.17), получим:

$$u = U \frac{\ln(r'/r)}{\ln(4h/d)}. \quad (5.19)$$

Значения величин r' и r можно выразить через расстояние до контактной сети a , высоту подвески контактной сети h и рост человека K согласно рис. 5.9:

$$r'^2 = a^2 + (h + K)^2 = a^2 + h^2 + K^2 + 2hK,$$

$$r^2 = a^2 + (h - K)^2 = a^2 + h^2 + K^2 - 2hK,$$

откуда
$$r'^2 = r^2 + 4hK. \quad (5.20)$$

Подставляя в (5.19), получим

$$u = U \frac{\ln \left(1 + \frac{4hK}{a^2 + h^2 + K^2 - 2hK} \right)}{2 \ln(4h/d)}. \quad (5.21)$$

Выражение (5.21) наиболее точно определяет значение разности потенциалов между расчетной точкой и нулевым потенциалом земли.

В практике нормирования воздействий ЭМП на человека в качестве параметра используется напряженность электрического поля, поэтому с достаточной степенью точности величина напряженности может быть определена из соотношения

$$E = U \frac{\ln \left(1 + \frac{4hK}{a^2 + h^2 + K^2 - 2hK} \right)}{2K \ln(4h/d)}. \quad (5.22)$$

При анализе полученного общего решения представляют интерес частные случаи:

– напряженность электрического поля контактной сети в пространстве под линией при нахождении человека на поверхности земли (E_1),

– напряженность электрического поля контактной сети в пространстве под линией при нахождении человека на уровне контактного провода при непосредственном прикосновении к контактной сети или при работе электромонтеров под напряжением с изолированной съёмной вышки (E_2).

В первом случае выражение (5.22) при подстановке $a = 0$ примет вид

$$E_1 = U \frac{\ln \left[1 + \frac{4hK}{(h-K)^2} \right]}{2K \ln(4h/d)}. \quad (5.23)$$

Во втором случае

$$E_2 = (u_1 - u_2)/K,$$

где с учетом (5.19)

$$u_1 = U, \quad u_2 = U \frac{\ln \left[\frac{(2h-K)}{K} \right]}{\ln(4h/d)}.$$

Окончательно

$$E_2 = \frac{U}{K} \left[1 - \frac{\ln \left[\frac{(2h-K)}{K} \right]}{\ln(4h/d)} \right]. \quad (5.24)$$

Для анализа напряженностей электрического поля вблизи контактной сети постоянного или однофазного переменного тока, воздействующих на человека, проведем их расчет для следующих условий: $h = 4$ м (для трамвая и рудничного транспорта при на-

пряжениях постоянного тока 0,6 и 1,5 кВ и переменного тока 6 и 10 кВ), $h = 5,25$ м (для магистрального транспорта), $d = 0,0128$ м, $K = 1,75$ м. Расчетные данные приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

**Расчетные значения напряженностей электрического поля
вблизи контактной сети**

Род тока	U , кВ	E_1 , кВ/м	E_2 , кВ/м	$a = 5$ м	$a = 10$ м	$a = 20$ м
Постоянный	0,6	0,0706	0,282	0,0158	0,00568	0,0016
Постоянный	1,5	0,176	0,704	0,0395	0,0142	0,00401
Постоянный	3,0	0,261	1,34	0,0809	0,0330	0,00948
Переменный	6,0	0,706	2,82	0,158	0,0568	0,0160
Переменный	10,0	1,18	4,69	0,263	0,0947	0,0267
Переменный	25,0	1,34	11,2	0,674	0,275	0,079

5.5. Электрическое поле рельсовой сети

При использовании рельсов в качестве естественного заземляющего устройства для конструкций контактной сети и других сооружений железнодорожного транспорта основным фактором, определяющим электробезопасность обслуживания этих устройств, являются параметры электрического поля рельсовой сети (рельсовой линии). При определении опасности электротравмы и выборе средств защиты в первую очередь целесообразно изучить характер распределения электрического поля.

Характер распределения потенциалов рельсовой сети в катодных, анодных и знакопеременных зонах определяет потенциальное состояние поверхности земли в зоне стекания тока с рельсов. Проблема оценки опасности электротравмы сводится к проблеме изучения вопросов, связанных с распределением потенциалов и токов в системе «рельс—земля—заземленная конструкция». Постоянный электрический ток, протекающий в проводящем пространстве земли, имеет и другой аспект безопасности, связанный с электрической коррозией подземных сооружений. В этом случае опасность электролитического растворения металла подземных сооружений обычно оценивается плотностью тока утечки. Проблема электролитического растворения металла в земле может иметь различные последствия с точки зрения безопасности:

— возможностью разрушения подземных металлических сооружений, оборудования (фундаментов опор контактной сети, мостов и т.п.) и коммуникаций;

— возможностью заражения подземных вод и системы питьевого водоснабжения ионами растворенных металлов.

Распределение напряжений и токов в рельсовой линии получают на основе дифференциальных уравнений (5.1) модели непрерывного линейного проводника, расположенного в однородном проводящем пространстве. Эти же допущения принимаются при определении характеристик ЭМП в проводящем пространстве земли от линейного проводника с током. В одной из первых работ в области определения характеристик электрического поля в земле от проводника с током, моделирующим рельсовую линию, повышенное переходное электрическое сопротивление балластной призмы моделировалось бесконечно тонким слоем с соответствующей проводимостью. Полученная формула (иногда ее называют формулой Коле или Зунде) для определения потенциалов земли от РЛ считается наиболее употребительной.

Потенциал точек земли от РЛ бесконечной длины с одной сосредоточенной нагрузкой I_H в начале координат можно получить из соотношения

$$\varphi_{зр} = \frac{\rho I_H \gamma}{2\pi} \Omega_{[\gamma x, \gamma y]}, \quad (5.25)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м; γ — коэффициент распространения РЛ, 1/км; $1/\text{м}$; $\gamma = \frac{m}{r_H}$; Ω — специальная функция, табулированная в справочниках; x , y — продольная и поперечная рельсам координаты поверхности земли от края РЛ, м.

Потенциал земли на расстоянии шага (1 м) от РЛ можно выразить с помощью соотношения (5.25), которое примет вид

$$\varphi_{зр1} = \frac{\rho I_H \gamma}{2\pi} \Omega_{[0, \gamma]}. \quad (5.26)$$

Максимальное напряжение шага (прикосновения) у рельсовой линии с учетом (5.3) при $x = 0$ можно выразить соотношением

$$U_{пр} = \varphi_p - \varphi_{зр1} = \frac{Im}{2} \left\{ 1 - \frac{\rho}{\pi r_{п1}} \Omega_{[0, \gamma]} \right\}. \quad (5.27)$$

Коэффициент прикосновения к рельсовой линии можно выразить соотношением

$$\alpha_{\text{прр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{\Phi_{\text{р}}} = \frac{\Phi_{\text{р}} - \Phi_{\text{зр1}}}{\Phi_{\text{р}}} = 1 - \frac{\rho}{\pi r_{\text{п1}}} \Omega [0, \gamma], \quad (5.28)$$

где I — ток рельсовой линии, А; m — волновое сопротивление рельсовой линии, Ом; $r_{\text{п1}}$ — часть полного переходного сопротивления «рельсы—земля», включающая электрическое сопротивление ограниченного пространства верхнего строения пути (шпалы, балластная призма) с большим удельным электрическим сопротивлением, Ом·м.

Таким образом, при изменении напряжения в рельсовой линии от тока ЭПС по закономерности (5.3) электрическое поле в проводящем пространстве земли характеризуется закономерностью изменения потенциальной функции (5.25).

В табл. 5.6 и 5.7 приведены зависимости параметров РЛ от переходного сопротивления «рельсы—земля» и величины максимального коэффициента прикосновения к рельсу от удельного электрического сопротивления грунта и переходного сопротивления.

Таблица 5.6

Изменение параметров рельсовой линии в зависимости от переходного сопротивления

Один рельс (P65) $r_{\text{р}} = 0,0254$ Ом/км			Один путь (P65) $r_{\text{р1}} = 0,0155$ Ом/км			Два пути (P65) $r_{\text{р2}} = 0,0077$ Ом/км		
$r_{\text{п}},$ Ом·км	$\gamma,$ 1/км	$m,$ Ом	$r_{\text{п}},$ Ом·км	$\gamma,$ 1/км	$m,$ Ом	$r_{\text{п}},$ Ом·км	$\gamma,$ 1/км	$m,$ Ом
0,1	0,504	0,0504	0,1	0,394	0,0394	0,1	0,277	0,0277
0,5	0,225	0,117	0,5	0,176	0,088	0,5	0,124	0,062
1,0	0,159	0,159	1,0	0,125	0,125	1,0	0,0877	0,0877
5,0	0,0713	0,356	5,0	0,0557	0,278	5,0	0,0392	0,196
10,0	0,0504	0,504	10,0	0,0394	0,394	10,0	0,0277	0,277

При произвольной подстановке значений в соотношение (5.28) отрицательный результат для коэффициента прикосновения означает, что при соответствующих результатам значениях удельного сопротивления грунта не может быть реализовано переходное сопротивление (табл. 5.7).

Анализ табл. 5.7 показывает, что при увеличении удельного сопротивления грунтов коэффициент прикосновения к РЛ уменьшается, а при увеличении переходного сопротивления — увеличивается.

**Изменение коэффициента прикосновения в зависимости от параметров
рельсовой линии и удельного электрического сопротивления грунта**

$r_{п},$ Ом·км	Один путь при ρ , Ом·м				Два пути при ρ , Ом·м			
	10	100	1000	10 000	10	100	1000	10 000
0,1	0,956	0,56	0	0	0,948	0,481	0	0
0,5	0,987	0,869	0	0	0,985	0,85	0	0
1,0	0,992	0,925	0,248	0	0,992	0,917	0,172	0
5,0	0,998	0,979	0,79	0	0,998	0,978	0,785	0
10,0	0,999	0,989	0,893	0	0,999	0,988	0,879	0

Характер и основные закономерности изменения от различных факторов и условий потенциальной функции на поверхности проводящего пространства земли вокруг РЛ легче всего анализировать с помощью аналогового моделирования РЛ на специальном моделирующем устройстве — модели-аналоге.

Установление закономерностей изменения напряжений прикосновения в системах заземления ЭУ ж.-д. транспорта в стационарных и аварийных режимах работы тяговой сети с помощью физического моделирования позволяет не ставить сложный и дорогостоящий эксперимент в реальных условиях.

Моделирование электрического поля. В модели-аналоге при моделировании производится расчленение частей, образующих модель, не по отдельным математическим операциям, а по физическим элементам. Модели-аналоги, в отличие от структурных аналоговых вычислительных машин, имеющих универсальный характер, являются специализированными. Их конструкция определяется специфическими особенностями физических систем, подлежащих исследованию.

Разработанная в УрГУПС г. Екатеринбург физическая модель рельсовой сети и ЗУ может быть отнесена ко второму типу АВМ — модели-аналогу.

Согласно теории подобия, представляющей теоретические основы аналогового моделирования, явления будут подобны друг другу, если существует полное соответствие геометрических размеров рассматриваемых систем и всех изменяющихся во времени и пространстве величин.

При решении конкретной задачи исследования электрического поля рельсовой сети и ЗУ на модели необходимо обеспечить по-

добие каждой из физических систем, являющихся компонентом исследуемой их совокупности, и всей этой совокупности в целом.

Каждая из исследуемых систем имеет свои физические особенности и описывается определенными математическими соотношениями. Подобие обеспечивается, если существуют критерии подобия, составленные из параметров, общих для реальной и моделируемой систем.

Одним из способов определения критериев подобия является метод интегральных аналогов, основанный на анализе дифференциальных уравнений, описывающих состояние исследуемой системы.

Критерии подобия РЛ были определены методом интегральных аналогов и представляют собой соотношения, аналогичные критериям подобия для цепей с распределенными параметрами:

$$\pi_1 = \frac{\varphi_p}{l r_p I_p} = idem,$$

$$\pi_2 = \frac{I_p r_{II}}{l \varphi_p} = idem.$$

На основании полученных критериев подобия были определены масштабы моделирования электрического поля рельсовой сети и ЗУ и соотношения между ними. Путем анализа матрицы размерностей показано, что из пяти исследуемых параметров, входящих в дифференциальные уравнения, три любых могут считаться независимыми, а масштабы могут определяться из соотношений

$$M_I = \frac{M_\varphi}{M_l M_r}, \quad M_I = \frac{M_u}{M_R},$$

$$M_{r_{II}} = M_l^2 M_{r_p}.$$

Для обеспечения подобия реального и моделируемого процесса согласно третьей теореме о подобии необходимо и достаточно обеспечить:

- равенство критериев подобия;
- пропорциональность сходственных параметров во всем моделируемом пространстве, в том числе на его границах.

Для моделирования неограниченного проводящего пространства земли использована электролитическая ванна (ЭВ), в которой

электролит представляет собой моделируемую область, ограниченную стенками ванны. Конструкция ЭВ выбрана в виде усеченной пирамиды, приближенно заменяющей собой форму полусферы, со стенками из проводящего материала.

Соединение схемы замещения рельсовой сети с проводящим пространством — электролитом, заполняющим ЭВ, производится с помощью контактов, форма которых выбрана в соответствии с формой эквипотенциальных поверхностей электрического поля рельсов.

При моделировании электрического поля рельсовой сети и ЗУ методом физического моделирования выбраны принципы построения схемы модели на основе параметров моделирующей системы, основными из которых являются следующие:

- правильный выбор соотношений размеров реальной и моделируемой систем;
- целесообразность моделирования одной межподстанционной зоны, длиной в реальном пространстве 15—20 км, а также прилегающие участки бесконечной длины для решения задач, связанных с токораспределением в рельсовой сети и ЗУ, определением потенциалов электрического поля в проводящем пространстве земли, в том числе при различных режимах и характере тока нагрузки;
- необходимость рассмотрения ограниченного пространства вокруг ЗУ размером до десятков метров для решения задачи по исследованию распределения потенциалов вокруг этих сосредоточенных ЗУ.

Созданная в УрГУПС модель-аналог электрического поля РЛ и заземляющих устройств позволила моделировать стационарные электрические процессы при протекании токов в рельсовых сетях и ЗУ, а также в окружающем проводящем пространстве земли для исследования условий электробезопасности их эксплуатации.

Показано, что результаты измерения потенциалов электрического поля на модели дают хорошее совпадение с результатами расчета принятыми точными методами. В зоне модели-аналога, составляющей до 80 % моделируемой зоны от места приложения тока, измеренные значения не имеют погрешностей моделирования. Погрешность измерения исследуемых величин в этой зоне полностью определяется точностью установки значений электрических сопротивлений цепной схемы, точностью измерения электричес-

ких величин и точностью измерительных приборов, т.е. находится в пределах точности инженерных расчетов и измерений 2,5—10 %.

Проведено исследование потенциалов РЛ и окружающего пространства на поверхности с помощью модели-аналога.

На рис. 5.10 приведены кривые относительных потенциалов земли φ^* (полный потенциал φ^* электрического поля РЛ равен единице) в ближней зоне в плоскости перпендикулярной РЛ в зависимости от параметра

$$K = \frac{\rho}{r_{\Pi}},$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление проводящего пространства земли, Ом·м; r_{Π} — переходное сопротивление «рельсы—грунт», Ом·м (1000 Ом·км).

Исследования потенциальной функции электрического поля на поверхности земли вблизи РЛ позволило оценить напряжение прикосновения к РЛ и максимальное напряжение шага. В качестве напряжения прикосновения принята максимальная разность потенциалов между РЛ и точкой поверхности земли, которых одновременно может касаться человек, что для условий рабочей зоны вблизи РЛ означает разность потенциалов между опорой контактной сети, присоединенной к рельсу, и поверхностью земли (рис. 5.11).

В качестве напряжения шага принимается максимальное напряжение между точками поверхности земли на расстоянии шага, что для условий рабочей зоны вблизи РЛ означает разность потенциалов между РЛ и точкой поверхности земли на расстоянии 1 м (край балластной призмы) в перпендикулярном к оси пути направлении.

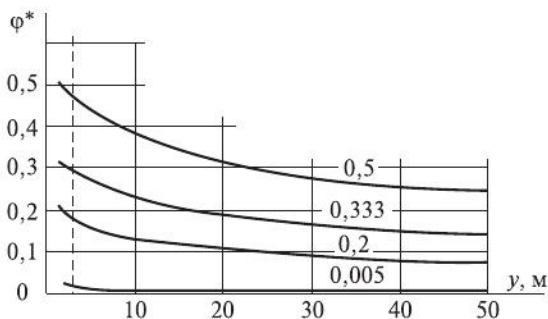


Рис. 5.10. Относительные потенциалы поверхности земли вблизи РЛ в зависимости от отношения K при приложении нагрузки в точке 0

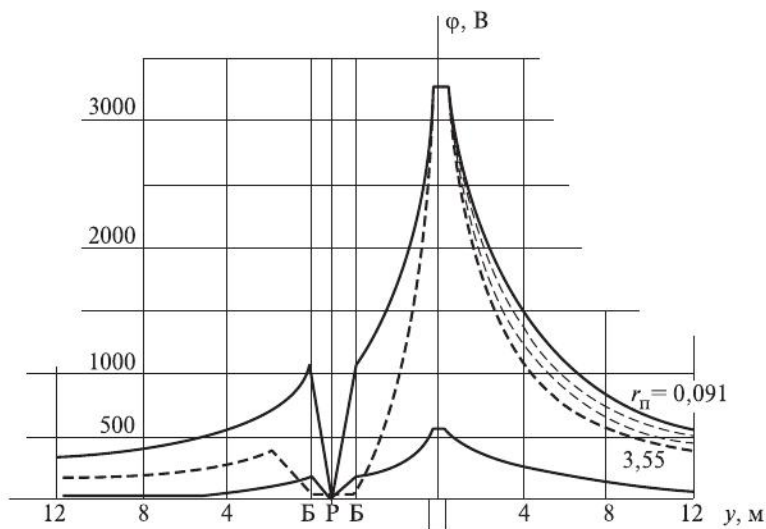


Рис. 5.11. Потенциальная диаграмма поверхности земли (Р — ось РЛ, Б — край балластной призмы на расстоянии шага) при замыкании контактной сети на опору и обрыве заземляющего присоединения к РЛ

В качестве примера на рис. 5.12 и 5.13 показаны полученные на модели кривые изменения потенциала РЛ (I), поверхности земли у края балластной призмы (2) и поверхности земли в створе опор контактной сети (3) относительно удаленной земли вдоль и в плоскости перпендикулярной оси пути для следующих условий: тип рельса Р-65, опоры металлические, $r_{\pi} = 10 \text{ Ом}\cdot\text{км}$, $\rho = 184 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; ток, протекающий по РЛ, $I_{\text{р}} = 1000 \text{ А}$, сопротивление растеканию фундаментов опор $R = 9,8 \text{ Ом}$.

При рассмотрении потенциальной функции электрического поля на поверхности земли при переходном процессе замыкания контактной сети постоянного тока на РЛ и присоединенные к ней заземляющие присоединения опор контактной сети известно, что при переменном характере (экспоненциальном изменении) тока короткого замыкания в РЛ на напряженность электрического поля в земле существенное влияние оказывают проявляющиеся в этом случае индуктивность рельсов и взаимная индуктивность контуров «контактная сеть—земля» и «рельсы—земля».

Потенциал «рельс—земля» в месте замыкания контактной сети существенно возрастает по сравнению с установившимся режимом,

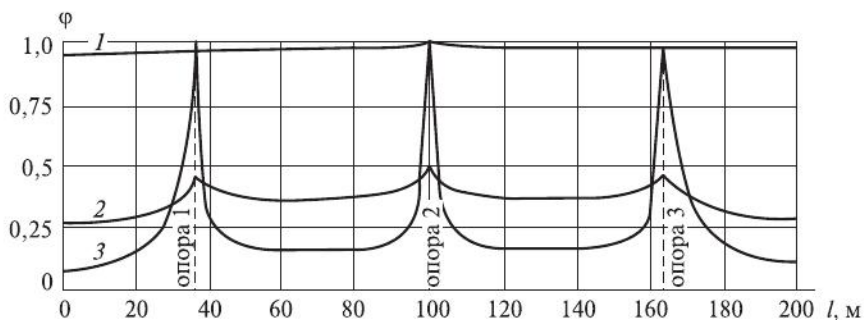


Рис. 5.12. Распределение потенциалов поверхности земли в створе опор контактной сети

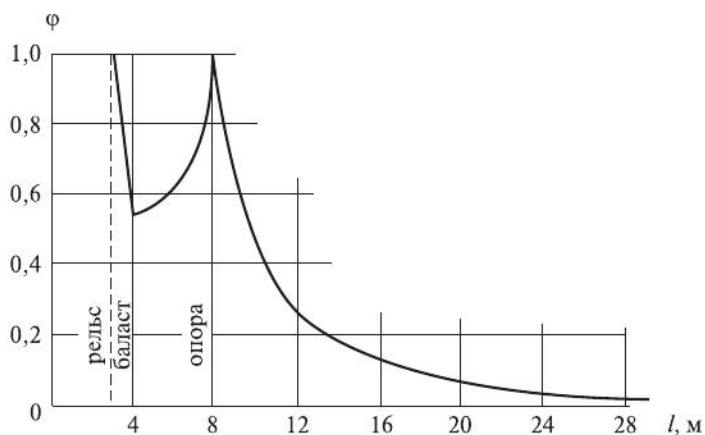


Рис. 5.13. Распределение потенциалов поверхности земли в пространстве, перпендикулярном оси пути

а область проникновения электрических линий тока в земле сужается. Скорость изменения потенциалов электрического поля РЛ в пространстве как вдоль РЛ, так и в плоскости перпендикулярной оси пути увеличивается. Это различие в скорости изменения потенциалов в пространстве по сравнению со стационарным режимом существенно начинает проявляться на сравнительно больших от места к.з. расстояниях (до 1 км).

Следовательно, зная величины и характер изменения напряжения «рельс—земля» в переходном режиме короткого замыкания, можно использовать рассматриваемую модель электрического поля РЛ и поверхности земли в области, ограниченной десятками

метров от места к.з., что бывает обычно достаточным для полного представления о характере изменения потенциальной функции в пространстве при определении величин напряжений прикосновения и шага в месте к.з.

В табл. 5.8 приведены полученные на модели данные о прогнозируемых токах через тело человека ($R_h = 1000 \text{ Ом}$) с учетом сопротивления растеканию ступней человека при замыкании контактной сети на опоры (железобетонные и металлические) при отсоединенном заземляющем присоединении группового заземления и рельс.

Таблица 5.8

Максимальные токи через тело человека (мА) при различных условиях замыкания контактной сети на РЛ и заземленные конструкции

Тип опор	Ом·м	При напряжении шага			При напряжении прикосновения			При напряжении прикосновения к рельсу		
		при r_{Π} Ом·км			при r_{Π} Ом·км			при r_{Π} Ом·км		
		0,1	1,0	3,5	0,1	1,0	3,5	0,1	1,0	3,5
Металлические	10	1490	1340	1090	1560	1400	1140	33	878	1006
	100	990	887	722	1380	1235	1005	28,7	775	933
	1000	226	203	165	634	568	462	13,2	357	429
Железобетонные	10	193,5	172	142	184	166	136	5,85	156	175
	100	128	116	102	164	148	120	4,87	131	156
	1000	29,3	26,2	21,3	78,9	71	57	2,53	62	75

Максимальные токи прикосновения к РЛ практически равны (в пределах точности измерений) максимальным токам прикосновения к опорам.

Для обеспечения условий электробезопасности в месте нахождения человека должно выполняться известное условие:

$$U_{\text{прхх}} = I_h(R_h + 1,5\rho); U_{\text{пр}} = I_h R_h \leq [U_{\text{пр}}] - [I_h] \cdot 1,5\rho;$$

$$U_{\text{шхх}} = I_h (R_h + 6\rho); U_{\text{ш}} = I_h R_h \leq [U_{\text{пр}}] - [I_h] \cdot 6\rho,$$

где $U_{\text{прхх}}$ и $U_{\text{пр}}$ — соответственно напряжение прикосновения холостого хода и напряжение прикосновения; $U_{\text{шхх}}$ и $U_{\text{ш}}$ — соответственно напряжение шага холостого хода и напряжение шага; ρ — удельное сопротивление грунта в месте расположения человека, Ом·м; $1,5\rho$ — сопротивление растеканию ступней ног при параллельном соединении; 6ρ — сопротивление растеканию ступней ног при последовательном соединении.

Наличие электрического сопротивления растеканию ступней ног человека обуславливает снижение напряжения прикосновения, приложенного к телу человека, с увеличением удельного сопротивления грунта. Напряжения прикосновения у металлической опоры и железобетонной стойки отличаются, прежде всего, из-за включения в цепь замыкания контактной сети высокого электрического сопротивления бетона при замыкании контактной сети на железобетонную стойку.

В качестве электрических сопротивлений железобетонных опор и фундаментов металлических опор контактной сети приняты их средние значения на основе обработки статистических данных этих сопротивлений, измеренных при участии автора на участках контактной сети Южно-Уральской ж.д. и приведенных на рис. 5.14 и 5.15.

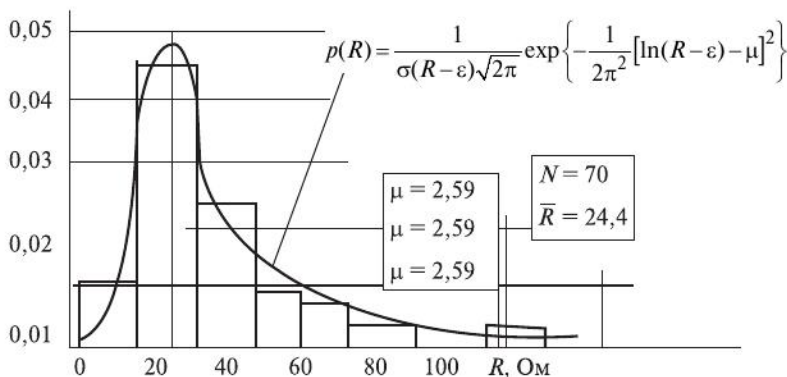


Рис. 5.14. Статистический анализ величин сопротивлений растеканию фундаментов металлических опор контактной сети

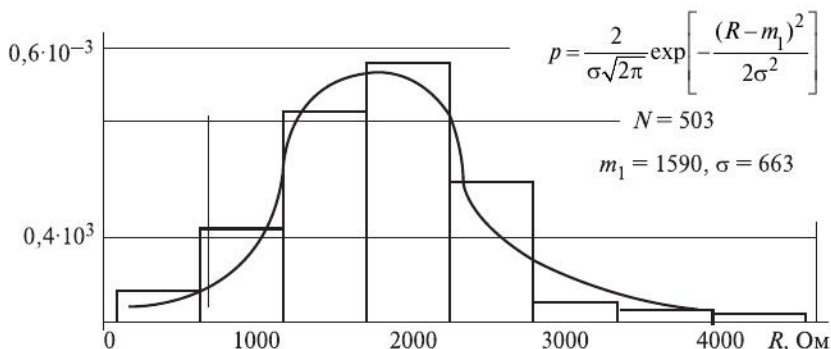


Рис. 5.15. Статистический анализ электрических сопротивлений железобетонных опор контактной сети

Распределение плотности вероятности для выборок из 70 (см. рис. 5.14) и 707 величин электрических сопротивлений фундаментов опор подчиняются логарифмически нормальному закону, что подтверждается критерием χ^2 . Логарифмы величин составляют соответственно 2,59 и 2,76, а средние значения 24,4 и 28,2 Ом.

Распределение плотности вероятности для выборки из 503 величин электрических сопротивлений железобетонных опор контактной сети (см. рис. 5.15) подчиняется нормальному закону, математическое ожидание величины составляет 1590 Ом.

Таким образом, с помощью модели аналога выявлено, что распределение потенциалов на поверхности земли имеет своеобразный характер. Опасными факторами являются напряжение прикосновения к рельсу, напряжение прикосновения к заземленной на рельс конструкции и напряжение шага.

Анализ закономерностей измерения напряжений прикосновения при коротких замыканиях показывает, что токи через тело человека в большинстве случаев замыкания контактной сети на металлическую опору оказываются бóльшими допустимых токов по ГОСТ12.1.038-82 (96) «Уровни предельно допустимых напряжений и токов прикосновения». Исключение составляют условия при высоких удельных сопротивлениях грунта (выше 1000 Ом·м) при малых продолжительностях отключения режима короткого замыкания (менее 0,1 с). Менее опасные условия возникают в том же режиме у железобетонных опор контактной сети при продолжительностях отключения до 1 с.

Токи через тело человека превышают нормируемые в случаях прикосновения к рельсу (металлической опоре, заземленной на рельс) в режиме замыкания контактной сети постоянного тока на рельс при сочетании высокого переходного сопротивления «рельсы—земля» и низкого удельного сопротивления грунта при продолжительностях отключения режима к.з. быстродействующим выключателем (менее 0,1 с). Для железобетонных стоек (опор) напряжение прикосновения в этих условиях не выходит за рамки нормируемого.

Определение напряжения «рельс—земля» в процессе переходного режима короткого замыкания и отключения тока быстродействующим выключателем — довольно сложная задача.

Знание электрических процессов в рельсовой линии, сопровождающих режим к.з. в контактной сети при пробое электрической

изоляции и других повреждениях, позволяет определять напряжения прикосновения и шага при эксплуатации устройств контактной сети. Электрические процессы определяют уровень электромагнитного влияния на напольные устройства автоматической сигнализации железнодорожного транспорта и рельсовые цепи. Умение определять уровень напряжений в РЛ позволяет обосновать защитные мероприятия для силовых полупроводниковых приборов, применяемых для целей заземления, других электрических приборов, присоединяемых к РЛ. Характеристики электрических процессов позволяют вести поиск новых, более совершенных технических защитных средств при эксплуатации электрических железных дорог.

Необходимость решения перечисленных задач вызвала обостренный интерес ряда исследователей к вопросам исследования электрических процессов при к.з. в тяговых сетях. С начала 70-х гг. прошлого века было опубликовано большое число работ, посвященных этой проблеме, Косаревым Б.И., Карякиным Р.Н., Котельниковым А.В., Пупыниным В.Н. и их учениками. Авторы перечисленных работ создали модели описываемых явлений, в той или иной степени соответствующих реальным.

Например, строгое решение задачи влияния поверхностного эффекта в рельсах на его активное сопротивление и внутреннюю индуктивность и реализация ее в виде схемы замещения даны в работах Косарева Б.И., однако применение этой схемы для расчета переходного процесса в тяговой сети дается при существенных допущениях. В частности, удельный коэффициент взаимоиנדукции контуров «контактный провод—земля» и «рельс—земля» на длине в один километр M (мГн/км) принимается по приближенной формуле Р. Рюденберга, которая в системе СИ имеет вид:

$$M = 4,6 \lg \left(1417 \frac{\sqrt{\rho\tau}}{h} \right) \cdot 10^{-4}, \quad (5.29)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление земли, Ом·м; h — высота расположения провода над поверхностью земли, расстояние между контурами, м; τ — постоянная времени экспоненциально изменяющегося тока в контуре короткого замыкания, с.

Общепризнанной и достаточно точной формулой коэффициента взаимоиנדукции между контурами для синусоидальных токов является полученная с определенными допущениями так называемая формула Ф. Поллячека:

$$M = \left(1 + 4,6 \lg \frac{400}{h} \sqrt{\frac{\rho}{f}} - j \frac{\pi}{2} \right) \cdot 10^{-4}, \text{ Гн/км,}$$

где ρ — удельное сопротивление земли, Ом·м; f — частота синусоидального переменного тока, Гц; h — расстояние между контурами, м.

Применение формулы Р. Рюденберга для расчета переходного процесса в тяговой сети постоянного тока несет в себе определенное противоречие, так как приближенная формула справедлива для экспоненциально изменяющегося тока, а схема замещения стального рельса получена для синусоидального переменного тока. Применение указанной методики равнозначно допущению о независимости собственных и взаимных электрических индуктивных сопротивлений проводников, образующих тяговую сеть, от частоты синусоидального переменного тока.

В работах проф. В.Н. Пупынина была предложена методика определения потенциалов «рельс—земля» в переходном электрическом процессе замыкания тяговой сети постоянного тока на рельс (рис. 5.16), сущность которой заключается в искусственном сведении

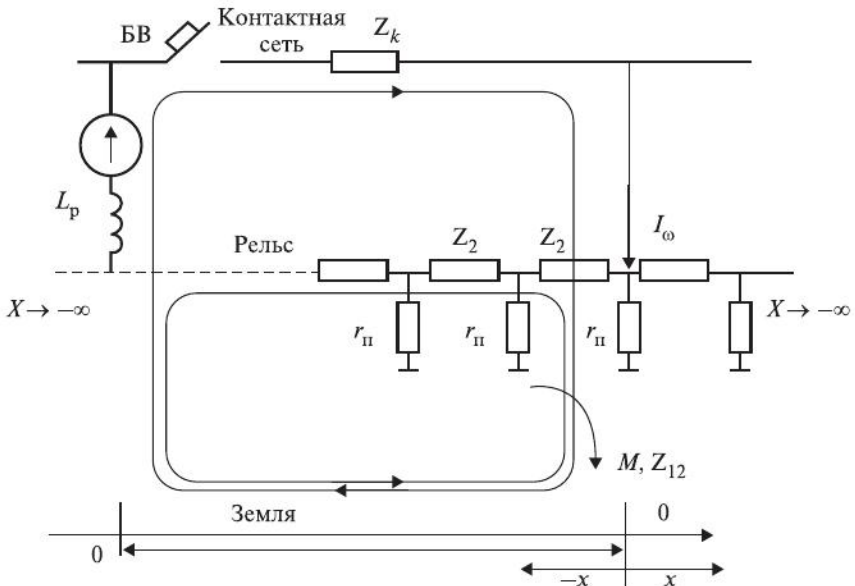


Рис. 5.16. Принципиальная схема протекания тока электрического процесса замыкания контактной сети на рельс

переходного процесса установления тока заданной формы в рассматриваемой цепи к некоторому стационарному периодическому процессу, каждый период которого характеризует переходный процесс.

Аналогичные методы использовались для изучения переходных процессов в проводных линиях связи.

Применительно к условиям тяговой сети указанная методика включает следующие этапы:

- кривая переходного процесса изменения электрического тока цепи, в которой исследуются напряжения «рельс—земля», заменяется периодической кривой таким образом, что к моменту начала перехода через нуль (через T , с) заканчиваются все переходные процессы предыдущего периода;

- периодическая кривая аналитически или графически разлагается в ряд Фурье синусоидальных составляющих;

- электрическая цепь заменяется искусственной цепью, состоящей из n последовательно включенных генераторов напряжения, создающих в сети гармонические и постоянную составляющие тока, в соответствии с членами ряда разложения периодической кривой;

- определяются активные и индуктивные составляющие собственных и взаимных электрических сопротивлений исследуемой электрической цепи, которые зависят от частоты переменного тока и удельного электрического сопротивления земли;

- определяется напряжение «рельс—земля» в любой точке сети для k -й гармонической составляющей электрического тока;

- по полученным значениям определяется искомое напряжение «рельс—земля» в данной точке сети для любых заданных моментов времени путем суммирования k составляющих напряжения.

Таким образом, применение расчета на основе предложенной методики сводится к замещению кривой тока переходного процесса интегрируемой функцией $f(t)$, продолжительность периода T которой определяет частоту первой гармоники ω_1 .

Расчет напряжения «рельс—земля» при переходном процессе изменения электрического тока в тяговой сети с помощью разложения кривой тока переходного процесса в ряд синусоидальных токов вносит определенные трудности, связанные не только с большим объемом вычислений, но и необходимостью специального вычисления напряжения каждый раз для каждой формы тока. Эти обстоятельства вызвали необходимость совершенствования методики расчета.

Ниже приведен метод расчета напряжения «рельс—земля» по заданной форме экспоненциально изменяющегося тока операторным методом. Этот метод позволяет выявить основные закономерности изменения напряжения в переходном электрическом процессе, зависимость величины максимальных значений от параметров тяговой сети, однако не позволяет дать расчет напряжения «рельс—земля» в процессе отключения тока электромагнитным быстродействующим выключателем (БВ).

Рассматривается также методика исследования напряжения «рельс—земля» в переходном электрическом процессе замыкания контактной сети на рельс спектральным методом.

Основные принципы этой методики сводятся к исследованию электрической цепи спектральным (частотным) методом с последующим синтезом исследуемой электрической цепи по ее частотной характеристике.

Спектральный метод, или применение двойного интеграла Фурье, широко применяется в приложении для исследования электрических переходных процессов в различных областях физики. Выбор метода для исследования напряжения «рельс—земля» при электрическом переходном процессе короткого замыкания контактной сети на рельс обоснован тем, что позволяет оценить приближения, вносимые в расчеты, на основе конкретных физических представлений о процессе, так как аппарат операционного исчисления вносит существенное абстрагирование от физических явлений, особенно при асимптотических приближениях при преобразованиях в пространстве изображений, так как учет вносимой погрешности в этом случае весьма сложен или невозможен вообще.

Расчет напряжения «рельс—земля» ведется в такой последовательности:

- определение переходной частотной функции действительной части входной проводимости (рельсы—удаленная земля) рельсовой сети в месте к.з. $\operatorname{Re} [Y_p(\omega)]$;
- синтез электрической схемы входной проводимости рельсовой сети путем аппроксимации частотной функции $\operatorname{Re} [Y_p(\omega)]$ частотными функциями проводимостей элементарных цепей R, L, C ;
- решение операторным методом задачи определения напряжения «рельс—земля» при протекании по схеме замещения тока заданной формы.

Разложение Фурье может быть применено к непериодической функции следующим образом. Продолжительность процесса принимается бесконечно большой, выражения для определения составляющих функций разложения получаются при помощи предельного перехода $T \rightarrow \infty$, последовательность дискретных частот $k\omega$ заменяется непрерывно меняющейся частотой ω .

Амплитуды отдельных бесконечно малых и бесконечно близких по частоте слагаемых обозначаются $S[f(t)] d\omega$, где $S[f(t)]$ — комплексная величина, называемая *спектральной плотностью* или комплексным спектром непериодической функции $f(t)$, которая вычисляется по формуле

$$S[f(t)] = \int_{t=-\infty}^{t=\infty} f(t) \exp(-j\omega t) dt = S(j\omega) = S(\omega) \exp[j\theta(\omega)]. \quad (5.30)$$

Символ S служит для обозначения перехода от функции времени $f(t)$ к ее спектру от аргумента ω , т.е. $S(\omega)$ или $S[f(t)]$, и называется спектральной плотностью. Если функция $f(t)$ существует только в течение времени от τ_1 до τ_2 , то пределы интегрирования соответственно заменяются этими значениями времени.

Для возможности применения (5.30) необходимо, чтобы функция $f(t)$ удовлетворяла, кроме условий Дирихле, еще условию аб-

солютной интегрируемости, т.е. интеграл $\int_{t=-\infty}^{t=\infty} f(t) dt$ должен иметь определенное конечное значение.

Обратное преобразование, т.е. переход от спектра функции к самой функции, осуществляется по формуле

$$f(t) = \int_{\omega=-\infty}^{\omega=\infty} S[f(t)] d\omega. \quad (5.31)$$

Если в эту формулу подставить выражение для амплитуды спектральной плотности (5.30), то получим формулу, называемую двойным интегралом Фурье:

$$f(t) = \int_{\omega=-\infty}^{\omega=\infty} \exp(j\omega t) d\omega \int_{\omega=-\infty}^{\omega=\infty} f(t) \exp(-j\omega t) dt. \quad (5.32)$$

Формулы (5.31) и (5.32) представляют непериодическую функцию $f(t)$ в виде суммы синусоидальных колебаний с бесконечно малыми амплитудами бесконечно близких между собой частот, ко-

торые могут принимать все значения от $-\infty$ до $+\infty$, а синусоидальные колебания продолжаются во времени от $-\infty$ до $+\infty$.

Исследование процесса изменения напряжения «рельс—земля» при переходном процессе в тяговой сети при замыкании контактной сети на рельсы проводится следующим образом:

- процесс изменения тока на входном электрическом сопротивлении рельсовой сети представляется как процесс включения на это сопротивление единичного напряжения $[1(0) - 1(t)]$;

- принимается, что длительность единичного импульса t существенно превышает длительность переходного процесса в тяговой сети и, в частности, может быть принята $t = \infty$;

- определяется спектральная плотность приложенного напряжения $S[1(0) - 1(t)]$ в соответствии с (5.30);

- определяется спектральная характеристика входной проводимости рельсовой сети $Y_p(\omega)$;

- находится спектр искомой функции тока умножением спектра приложенного (входного) напряжения на частотную характеристику входной проводимости так, как поступают в установившемся режиме:

$$S(i_p) = S[1(0) - 1(t)] \cdot Y(\omega); \quad (5.33)$$

- находится искомая функция тока (численно равная функции входной проводимости рельсовой сети) по (5.31), т.е. применяется принцип наложения к отдельным элементарным гармоническим колебаниям:

$$i_p(t) = Y_p(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(i_p) \exp(j\omega t) d\omega \quad (5.34)$$

или, используя (5.30), (5.31), (5.32), отделяя вещественную и мнимую части, и используя известное преобразование для единичной функции в вещественной форме, полученного в результате предельного перехода,

$$1(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega, \quad (5.35)$$

находится

$$i_p(t) = Y_p(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \operatorname{Re}[Y_p(\omega)] \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega; \quad (5.36)$$

– аппроксимируется функция $\operatorname{Re}[Y_p(\omega)]$ суммой функций, представляющих собой действительные части проводимостей последовательных элементарных цепей R, L, C, чем осуществляется синтез входной электрической проводимости рельсовой сети;

– с помощью, например, операционного исчисления находится напряжение переходного режима на схеме замещения входной проводимости при любой заданной форме.

Ниже показано определение частотной функции для входной проводимости (сопротивления) рельсовой сети.

Входное сопротивление рельсовой сети (см. рис. 5.16) можно определить из известного соотношения для напряжения «рельс—земля» при протекании по входному сопротивлению рельсовой сети синусоидального переменного тока, вывод которого получен в работах проф. К.Г. Марквардта (МИИТ) и будет рассмотрен в следующей главе:

$$U_p(\omega) = -\frac{I(\omega)}{2} \sqrt{Z_2(\omega) r_n} \left[1 - \frac{Z_{12}(\omega)}{Z_2(\omega)} \right] [\exp\{-\gamma(\omega)x\} - \exp\{-\gamma(\omega)(l-x)\}], \quad (5.37)$$

где $Z_2(\omega)$ — полное продольное сопротивление эквивалентного рельса переменному току, Ом/км; $Z_{12}(\omega)$ — сопротивление взаимной индукции контуров «контактная сеть—земля» и «рельс—земля», Ом/км; r_n — переходное сопротивление «рельсы—грунт», Ом·км; $\gamma(\omega)$ — коэффициент распространения рельсовой сети, 1/км;

$$\gamma(\omega) = \sqrt{\frac{Z_2(\omega)}{r_n}}.$$

Для наглядности составляющие формулы, зависящие от частоты переменного тока (скорости переходного процесса), помечены знаком ω .

Принимая во внимание выражение (5.37) и закон Ома для участка цепи, получим зависимое от частоты входное сопротивление рельсовой сети на участке от источника тока ($x = 0$) до места короткого замыкания ($x = l$):

$$Z_p(\omega) = -\frac{1}{2} \sqrt{Z_2(\omega) r_n} \left[1 - \frac{Z_{12}(\omega)}{Z_2(\omega)} \right] [\exp\{-\gamma(\omega)x\} - \exp\{-\gamma(\omega)(l-x)\}]. \quad (5.38)$$

Далее рассматривается расчет напряжения «рельс—земля» при экспоненциально изменяющемся токе замыкания контактной сети на рельс операторным методом.

Преобразуем выражение (5.38) с учетом вышеизложенного таким образом, чтобы представить значения модулей электрических сопротивлений в их комплексной форме:

$$U_p(x, \omega) = -\frac{I(\omega)}{2} \sqrt{\frac{r_2 + j\omega L_2}{g}} \left(1 - \frac{r_{12} + j\omega M}{r_2 + j\omega L_2} \right) \{ \exp[-\sqrt{(r_2 + j\omega L_2)g}x - \exp[-\sqrt{(r_2 + j\omega L_2)g} \cdot (x-l)]] \}, \quad (5.39)$$

где g — переходная проводимость единицы длины рельсового пути, $g = 1/r_{\Pi}$, См/км.

Полученное выражение (5.39) для напряжения $U_p(x, \omega)$ справедливо для любой частоты синусоидального переменного тока с круговой частотой ω .

Представляется интересным для исследования аperiodических переходных процессов получить такое выражение для искомого напряжения U_p , в которое входили бы величины I , r_2 , L_2 , M , g и т.д., от которых это напряжение зависит, но не входила бы угловая частота ω , связывающая определение U_p с синусоидальными величинами токов. Этого можно достигнуть, как мы увидим в дальнейшем, применением к выражению (5.39) преобразований Лапласа.

Как известно, изменение тока при замыкании контактной сети на рельс на электрифицированных железных дорогах постоянного тока происходит по характерному экспоненциальному закону

$$i = I_m [1 - \exp(-t / \tau_k)],$$

где I_m — максимальное значение установившегося тока к.з., определяемое напряжением на шинах ТП в момент замыкания и электрическим сопротивлением цепи; t — текущее время от момента начала к.з., с; τ_k — постоянная времени цепи к.з. в с, определяемое из соотношения $\tau_k = L_k/r_k$; L_k — суммарная индуктивность короткозамкнутой цепи, Гн; r_k — электрическое сопротивление цепи, Ом.

Переменный характер тока переходного процесса короткого замыкания в тяговой сети постоянного тока позволяет применить к расчету интересующих нас величин переходного режима (в частности, напряжения «рельс—земля») методов расчета установившихся режимов тяговой сети переменного тока.

Применяя операторный метод к экспоненциальной функции процесса изменения тока в переходном режиме короткого замыкания, можно первоначально получить изображение напряжения «рельс—

земля» в операторной форме. Осуществив затем обратный переход от изображения к оригиналу получить выражение для реального напряжения «рельс—земля» в переходном режиме короткого замыкания.

Модели для определения параметров рельсовой сети. Установившийся ток к.з. в тяговой сети постоянного тока I_m в общем случае определяется напряжением холостого хода на шинах тяговой подстанции и омическим сопротивлением элементов, последовательно включенных в электрическую цепь короткого замыкания. Влияние токов нагрузки от поездов, находящихся на неповрежденных участках, состоит в некотором снижении напряжения на шинах ТП, определяемое ее внешней характеристикой (внутренним сопротивлением источника напряжения).

Схему электрической цепи для определения установившегося тока к.з. можно представить в виде рис. 5.17.

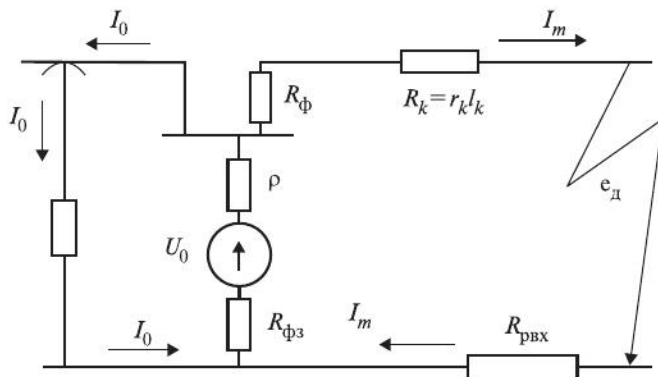


Рис. 5.17. Принципиальная схема короткого замыкания в контактной сети постоянного тока для определения I_m

В общем случае формула для определения I_m имеет вид

$$I_m = \frac{U_0 \left(1 - \frac{p}{100}\right) - I_0 (R_u + R_{\text{ф3}}) - e_d}{R_u + R_{\text{ф1}} + R_{\text{ф3}} + r_k l_k + R_{\text{рвх}}},$$

где U_0 — напряжение холостого хода на шинах тяговой подстанции ($U_{0\text{ном}} = 3300$ В); I_0 — ток, потребляемый электрическими локомотивами на неповрежденных участках, А; R_u — внутреннее электрическое сопротивление источника напряжения, Ом; $R_{\text{ф1}}$ — электрическое сопротивление питающего фидера контактной сети, Ом; $R_{\text{ф3}}$ — электрическое сопротивление рельсового фидера рельсовой сети, Ом; r_k — погонное электрическое сопротивление

контактной сети постоянному току, Ом/км; l_k — длина линии контактной сети до места к.з., км; $R_{\text{вхр}}$ — сопротивление рельсовой сети в месте к.з. и в месте подключения заземляющего фидера с учетом шунтирующего влияния земли и рельсов, определяемого входным сопротивлением рельсовой сети, Ом:

$$R_{\text{вхр}} = \frac{mr_p L}{r_{\text{вх1}} + r_{\text{вх2}} + r_p L};$$

e_d — падение напряжения в электрической дуге, В; p — коэффициент, зависящий от количества и схем соединения тяговых агрегатов подстанции, характеризующий внешнюю характеристику источника напряжения.

Анализ соотношения для определения электрического сопротивления рельсовой сети $R_{\text{вхр}}$ показывает, что при $r_{\text{п}} \rightarrow \infty$, $R_{\text{вхр}} \rightarrow R_p = r_p l_p$, а при $r_{\text{п}} \rightarrow 0$, $R_{\text{вхр}} \rightarrow 0$.

С учетом определенных допущений о том, что $I_0 = I_{\text{ном}} n_0$, $U_0(1 - p/100) - I_{\text{ном}} n_0 r \approx U_{\text{ном}}(1 - p/100)$, формула для I_m примет вид

$$I_m = \frac{U_{\text{ном}} \left(1 - \frac{p}{100}\right) - I_{\text{ном}} n_0 R_{\text{фз}} - e_d}{R_u + R_{\text{ф1}} + R_{\text{фз}} + r_k l_k + R_{\text{вхр}}},$$

где n_0 — число тяговых агрегатов подстанции.

Электрическое сопротивление рельсов постоянному току r_2 может быть определено с учетом соотношения (5.54):

$$r_2 = \frac{r_p}{2n},$$

где r_p — электрическое сопротивление стального рельса постоянному току (см. табл. 5.2), Ом/км; n — количество путей.

Известно, что электрическое сопротивление рельсов постоянному току может снижаться при температурах ниже -20 °С более чем на 20 %.

При определении последующих параметров переходного режима изменения напряжения РЛ относительно удаленной земли необходимо построить схему замещения (см. рис. 5.4) электрической цепи короткого замыкания контактной сети на рельс.

Индуктивность РЛ L_p включает внутреннюю индуктивность и внешнюю индуктивность, определяемую соотношением (5.29) для экспоненциально изменяющегося тока с постоянной времени $1/\tau = r_k/L_k$.

Индуктивность тяговой сети L_k определяется индуктивностью контура «контактная сеть—земля» и включает индуктивности реактора в цепи рельсового фидера тяговой подстанции и последо-

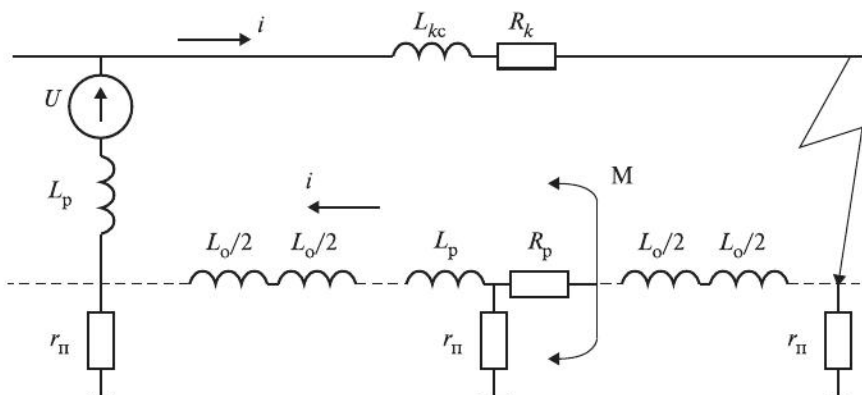


Рис. 5.18. Принципиальная схема замещения электрической цепи тока к.з. контактной сети на рельс с учетом индуктивностей дроссель-трансформаторов

вательно включенных дроссель-трансформаторов рельсовой цепи автоблокировки.

Величины индуктивности основной обмотки дроссель-трансформаторов, включаемой последовательно в цепь РЛ, как правило, через каждые 2 км (длина блок-участка рельсовой цепи), приведены в табл. 5.3.

Последовательно-параллельное включение основных обмоток дроссель-трансформатора в РЛ позволяет оценить индуктивность одного дроссель-трансформатора однопутной РЛ как $L_0/2$, где L_0 — индуктивность основной обмотки дроссель-трансформатора (рис. 5.18).

Из свойств реактивного сопротивления и соотношения (5.9)

можно принять на единицу длины 1 км $L_{\text{РВН}} = \frac{1}{u} \sqrt{\frac{\mu}{2\gamma}} \omega \cdot \frac{1}{\omega} = \frac{1}{u} \sqrt{\frac{\mu}{2\gamma\omega}}$.

Заменив угловую частоту через период синусоидального процесса $\omega = 2\pi/T$ и приняв допущение о том, что за весь переходный процесс изменение направления вектора напряжения (тока) происходит не более одного раза за период до 0,1 с, можно с достаточной степенью точности принять

$$L_{\text{РВН}} = \frac{1}{2u} \sqrt{\frac{\mu t}{\pi\gamma}}, \text{ Гн/км.}$$

С учетом соотношения (5.10) полную индуктивность 1 км рельсовой линии без учета индуктивностей дроссель-трансформаторов можно выразить

$$L_p = \frac{0,297}{nu} \sqrt{\frac{\mu l}{\pi \gamma}} + 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1417}{h} \sqrt{\rho \tau}, \text{ Гн/км.}$$

Фактическое индуктивное сопротивление рельсовой сети будет складываться из индуктивного сопротивления рельсовой линии L_p и индуктивного сопротивления L_o основной обмотки дроссель-трансформаторов рельсовой цепи (рис. 5.18):

$$L_2 = L_p l_k + L_o n_{рц},$$

где l_k — длина короткозамкнутого участка тяговой сети, км; $n_{рц}$ — число рельсовых цепей на длине короткозамкнутого участка.

Одним из важнейших параметров РЛ является электрическое *переходное сопротивление рельсов* относительно земли $r_{п}$. Несовершенство изоляции РЛ от земли создает условия, когда часть тока протекает по земле минуя рельсы.

Часть тока, протекающая через переходное сопротивление в земле, образует электрическую цепь, в которую не входят собственные индуктивности рельсов и обмоток дроссель-трансформаторов. Определение полной индуктивности электрической цепи к.з. в тяговой сети с учетом индуктивности контактной сети $L_{кк}$, индуктивности рельсовой сети $L_{рс}$ и реактора тяговой подстанции L_p имеет поэтому приближенный характер:

$$L_k \approx L_{кк} + L_2 + L_p.$$

Электрическое сопротивление проводов контактной сети постоянному току можно определить по табл. 5.9.

Таблица 5.9

Проводимость и сопротивление 1 км проводов контактной сети

Провода	Проводимость, См/км	Сопротивление, Ом/км
С-70	0,520	1,92
ПБСМ1-70	1,37	0,730
ПБСМ1-95	1,77	0,575
ПБСМ2-70	1,08	0,925
ПБСМ2-95	1,42	0,705
М-95	5,00	0,200
М-120	6,32	0,158
МФ-85	4,75	0,210
МФ-100	5,65	0,177
МФ-150	8,50	0,118

Провода	Проводимость, См/км	Сопротивление, Ом/км
БрФ-100	5,07	0,197
А-150	4,75	0,210
А-185	5,90	0,170

Индуктивность единицы длины контактной подвески при применении медного контактного провода зависит от марки несущего троса (табл. 5.10) и числа путей.

Таблица 5.10

Индуктивность единицы длины (1 км) контактной сети L_k

Марка троса	L_{k1} , мГн	L_{k2} , мГн	Марка троса	L_{k1} , мГн	L_{k2} , мГн
С-70	1,24	1,14	ПБСМ2-95	1,08	1,02
ПБСМ1-70	1,03	1,02	М-95	0,904	0,971
ПБСМ2-70	0,978	1,01	М-120	0,904	0,971

Напряжение «рельс—земля» в зависимости от магнитной связи контуров может существенно изменять свое максимальное значение. Существенное влияние на форму и величину исследуемого напряжения оказывает постоянная времени (скорость) процесса экспоненциального нарастания тока. Анализ показывает, что напряжение «рельс—земля» может достигать и превышать напряжение 1000 В, что вызывает необходимость совершенствования методов его расчета для осуществления мер защиты оборудования и персонала от опасного воздействия этого напряжения.

На рис. 5.19 представлены кривые процесса изменения тока к.з. ($I_m = 3000$ А) при $\tau_1 = 0,00833$ и $\tau_2 = 0,0167$ и процесса изменения напряжений «рельс—земля» для переходных сопротивлений 1, 3, 6 и 10 Ом/км.

На рис. 5.20 приведены зависимости максимальных напряжений «рельс—земля» от величины переходного сопротивления и коэффициента взаимоиנדукции контуров «контактная сеть—земля» и «рельс—земля» (8, 6, 4, 2, 1 мГн).

На рис. 5.21 приведены зависимости максимального напряжения от переходного сопротивления и постоянной времени τ (0,00833; 0,01; 0,0125; 0,0167) процесса короткого замыкания (при коэффициенте взаимоиנדукции контуров $M = 10$ мГн/км). Уменьшение или увеличение напряжения происходит практически пропорционально величине постоянной времени процесса короткого замыкания.

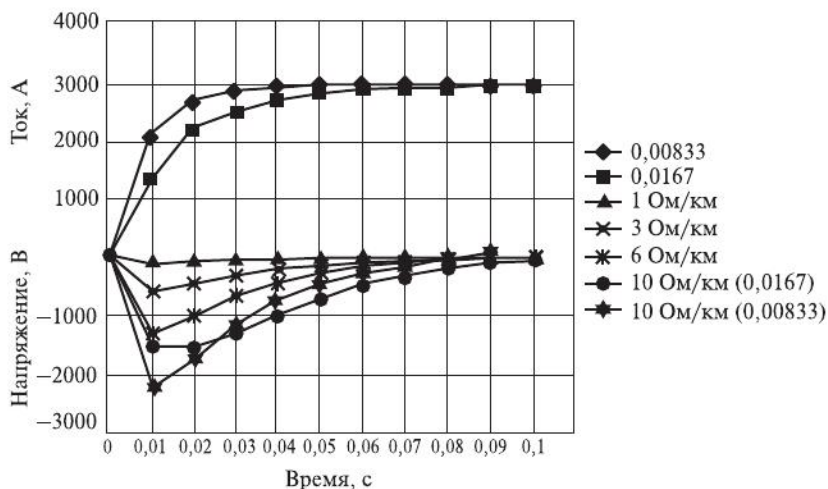


Рис. 5.19. Процесс изменения тока к.з. и напряжения «рельс—земля»

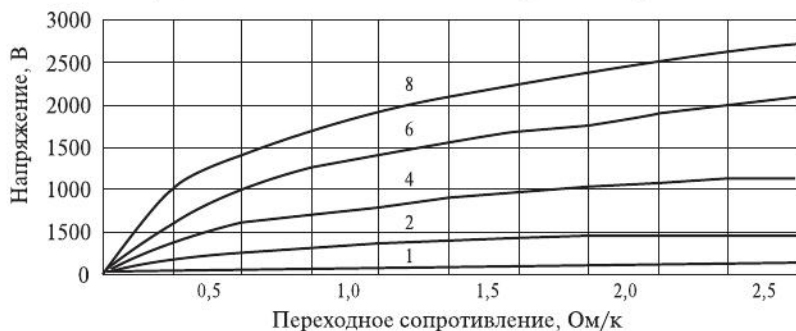


Рис. 5.20. Максимальные напряжения «рельс—земля»

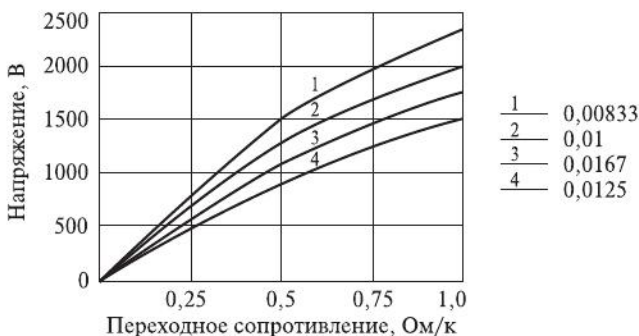


Рис. 5.21. Зависимость напряжения «рельс—земля» от постоянной времени (скорости) процесса короткого замыкания и переходного сопротивления

На рис. 5.22 показан характер процесса изменения напряжения «рельс—земля» в РЛ в зависимости от места к.з. ($x = 0$ и $x = 5$ км). Максимум напряжения в РЛ на расстоянии 5 км от источника напряжения сдвинут на 10 мс от максимума напряжения при к.з. в месте расположения источника напряжения (одностороннее питание), а напряжение «рельс—земля» снижается более чем в 2 раза.

Установлено, что в любом режиме при коротком замыкании в тяговой сети ток короткого замыкания может быть представлен в виде

$$i(t) = I_0 - cI_0 \left(1 - e^{-t/\tau}\right),$$

где c — коэффициент фиктивного источника напряжения.

Разработанная методика позволяет решать задачу определения напряжения «рельс—земля» операторным методом, так как в указанном выражении I_0 и cI_0 независимые от времени величины.

Значительно более сложная задача — определение напряжения «рельс—земля» в режиме отключения тока к.з. быстродействующим выключателем. Отключение в этом случае может сопровождаться более быстрым изменением тока, что может вызывать появление значений напряжения выше, чем в период нарастания тока к.з.

Такая задача может быть решена с помощью процесса синтеза схемы замещения входной проводимости рельсовой сети с последующим определением напряжения «рельс—земля» при протекании по схеме замещения тока замыкания известной формы.

Ниже приведены основные принципы процесса синтеза схемы замещения путем аппроксимации частотной функции действительной части входной проводимости рельсовой сети.

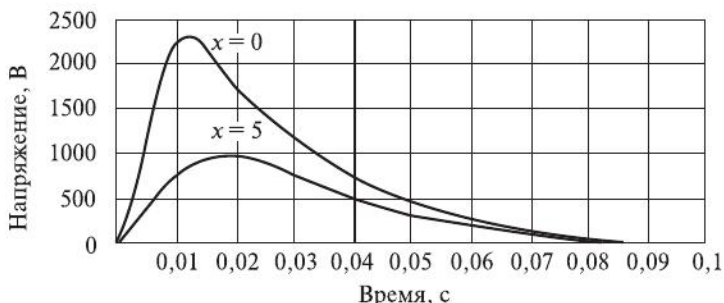


Рис. 5.22. Процесс изменения напряжения «рельс—земля» при изменении расстояния до источника питания

Для осуществления процесса синтеза схемы замещения входной проводимости рельсовой сети необходимо решить задачу аппроксимации известной частотной зависимости реальной части входной проводимости с помощью дробно-нелинейных функций специального вида. Эти функции выражают собой частотную зависимость реальной части проводимости элементарных последовательных цепей, в общем случае состоящие из последовательно соединения емкостного, индуктивного и омического сопротивлений. Вид этих функций определяется составляющими последовательной цепи.

Так, для последовательного соединения индуктивного и омического электрических сопротивлений функция проводимости будет иметь вид

$$\operatorname{Re}[y_{R,L}] = \frac{G_0}{1 + G_0^2 \omega^2 L^2},$$

а для последовательного соединения емкостного, индуктивного и омического электрических сопротивлений

$$\operatorname{Re}[y_{R,L,C}] = \frac{G_0}{1 + G_0 \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L \right)^2},$$

где G_0 — омическая проводимость элементарной цепи; $1/\omega C$ и ωL — емкостное и индуктивное сопротивления элементарной цепи.

Аппроксимация заданной частотной характеристики электрической цепи при помощи суммы частотных характеристик элементарных цепей эквивалентна решению задачи синтеза исследуемой цепи.

Результаты расчетов позволяют синтезировать схему замещения в виде двух параллельных цепей (рис. 5.23), каждая из которых представляет собой последовательное соединение соответственно (G_0, L_1) и (G_x, C, L) .

Последующая задача состоит в определении напряжения «рельс—земля» как напряжение на схеме замещения при протекании по ней тока замыкания контактной сети.

Наиболее просто решить эту задачу, используя операторный метод.

Ниже приводится расчет напряжения «рельс—земля» при протекании по схеме замещения тока заданной формы.

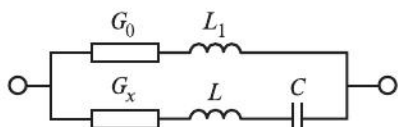


Рис. 5.23. Схема замещения входной проводимости рельсовой сети

Задача состоит в определении напряжения на схеме замещения входной проводимости рельсовой сети (см. рис. 5.23) при известных ее параметрах и параметрах протекающего по схеме замещения тока $i(t)$.

Наиболее часто встречающаяся форма тока при коротком замыкании в тяговой сети постоянного тока и при отключении его быстродействующим выключателем представлена на рис. 5.24.

Процесс отключения тока характеризуется рядом показателей:

- значением тока уставки выключателя $I_1 = I_y$;
- величиной тока в выключателе в момент начала расхождения контактов I_2 ;
- максимальным значением тока в отключаемой цепи $I_3 = I_{\max}$, который определяется величиной возможного установившегося тока к.з. $I_4 = I_{\infty}$, постоянной времени нарастания тока к. з. τ и свойствами выключателя;
- продолжительностью времени от начала короткого замыкания до достижения им величины тока уставки t_1 ;
- продолжительностью времени от начала короткого замыкания до момента расхождения контактов выключателя t_2 ;
- продолжительностью времени от начала к.з. до достижения максимальной величины тока в отключаемой цепи t_3 ;
- продолжительностью процесса отключения тока короткого замыкания или *временем отключения* t_4 .

Процесс отключения тока к.з. в тяговой сети постоянного тока условно можно разделить на три этапа:

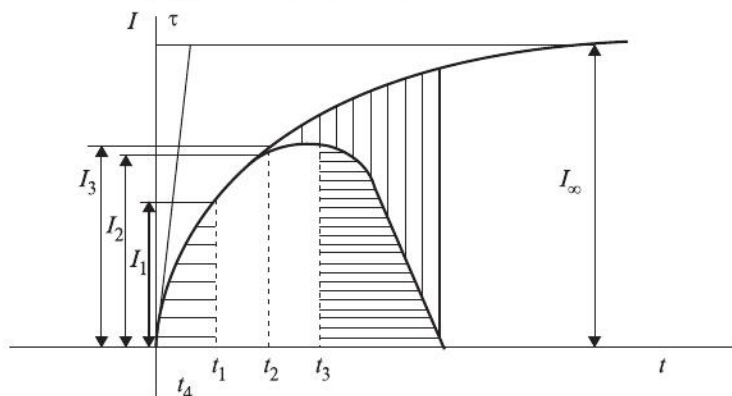


Рис. 5.24. Форма тока при отключении короткого замыкания в тяговой сети постоянного тока

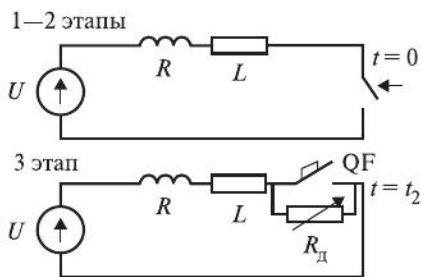


Рис. 5.25. Принципиальные схемы этапов процесса отключения электрической цепи постоянного тока быстродействующим выключателем (разъединителем и стрелкой обозначена точка короткого замыкания)

1 этап — возрастание тока до величины тока уставки быстродействующего выключателя;

2 этап — увеличение тока за собственное время работы быстродействующего выключателя;

3 этап — возникновение дуги быстродействующего выключателя и включение ее последовательно в цепь замыкания.

Первый и второй этапы (рис. 5.25) характеризуются увеличением тока по известному экспоненциальному закону:

$$i = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-t/\tau} \right), \quad \tau = \frac{R}{L},$$

где U — напряжение источника, В; R — полное электрическое сопротивление постоянному току цепи короткого замыкания, Ом; L — полная индуктивность электрической цепи короткого замыкания, Гн.

На третьем этапе при начале расхождения контактов выключателя QF образуется электрическая дуга, которая растягивается и интенсивно охлаждается, что равнозначно последовательному включению в электрическую цепь регулируемого активного электрического сопротивления $R_d(t)$. Процесс изменения тока в этом случае также изменится.

Каждый этап процесса характеризуется дифференциальными уравнениями:

$$\text{Этап } 0-t_2 \quad U = Ri + L \frac{di}{dt}.$$

$$\text{Этап } t_2-t_3 \quad U = Ri + L \frac{di}{dt} + iR_d(t).$$

$$\text{Этап } t_3-t_4 \quad U = Ri - L \frac{di}{dt} + iR_d(t).$$

Решением второго уравнения является:

$$i = \frac{U}{R + R_d(t)} \left(1 - e^{-t/\tau_1} \right), \quad \tau_1 = \frac{L}{R + R_d(t)}, \quad t_2 \leq t \leq t_3.$$

Решение третьего уравнения с учетом знака перед вторым слагаемым в правой части:

$$i = \frac{U}{R + R_{\text{д}}(t)} \left(1 - e^{-t/\tau_1}\right), \quad \tau_1 = \frac{L}{R + R_{\text{д}}(t)}, \quad t_3 \leq t \leq t_4.$$

Таким образом, процесс отключения постоянного тока в тяговой сети быстроедействующим выключателем можно представить в виде трех последовательных процессов, приняв продолжительность каждого из них в зависимости от величины тока уставки выключателя, постоянной времени τ и технических качеств выключателя.

Процесс отключения тока после момента времени t_2 можно представить как процесс включения в электрическую цепь источника напряжения ($IR_{\text{д}} = U_{\text{д}}$), которое создает в электрической цепи встречный ток; выражение для него можно получить из решения дифференциального уравнения

$$U_{\text{д}} = L \frac{di'}{dt} + i'R,$$

из которого получим:

$$i' = \frac{U_{\text{д}}}{R} \left(1 - e^{-t-t_2/\tau}\right), \quad \tau = \frac{L}{R}.$$

Разность токов i и i' определяет результирующий ток, проходящий в цепи во время отключения при $t > t_2$:

$$i = I_{\infty} \left(1 - e^{-t/\tau}\right) - I_{\infty} \frac{R_{\text{д}}}{R} \left(1 - e^{-t-t_2/\tau}\right). \quad (5.40)$$

Операторное сопротивление полученного входного сопротивления рельсовой сети, представленного на рис. 5.24 схемой замещения в виде двухполюсника, имеет вид:

$$Z(p) = \frac{b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}, \quad (5.41)$$

где $a_0 = 1$, $b_0 = R_0$, $a_1 = -(R_x + R_0)$, $b_1 = L_1 - CR_0 R_x$, $a_2 = C(L + L_1)$, $b_2 = -(R_0 LC + R_x L_1 C)$, $b_3 = -LL_1 C$.

Операторное выражение для тока при применении к уравнению (5.41) преобразований Лапласа будет иметь вид:

$$i(p) = I_{\infty} \frac{1}{p(1 + \tau p)} - I_{\infty} \frac{R_{\text{д}}}{R} \frac{e^{-t_2 p}}{p(1 + \tau p)}. \quad (5.42)$$

Из свойств преобразований Лапласа известно, что изображение суммы функций равно сумме изображений этих функций, поэтому слагаемые формулы (5.43) можно рассматривать по отдельности при определении операторного выражения для напряжения при протекании тока по схеме замещения:

$$U(p) = U_1(p) + U_2(p),$$

$$U(t) = U_1(t) + U_2(t).$$

Слагаемые операторного выражения для падения напряжения на двухполюснике будут иметь вид:

$$U_1(p) = I_{\infty} \frac{b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{(p + \tau p^2)(a_2 p^2 + a_1 p + a_0)},$$

$$U_2(p) = -I_{\infty} e^{-t_2 p} \frac{b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{(p + \tau p^2)(a_2 p^2 + a_1 p + a_0)}.$$
(5.43)

Для определения оригинала функции напряжения необходимо взять от изображения функции комплексный интеграл Лапласа:

$$U_i(t) = \lim_{y \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi j} \int_{\alpha - jy}^{\alpha + jy} U_i(p) e^{pt} dp,$$

который берется с помощью теоремы о вычетах, если подынтегральная функция имеет вид рациональной дроби (5.43).

С применением теоремы о вычетах решение в общем виде будет следующим:

$$U_i(t) = \sum_{v=1}^n \frac{r_1(p_v)}{r_2'(p_v)} e^{p_v t},$$
(5.44)

где $r_1(p_v)$ — числитель выражений (5.43); $r_2'(p_v)$ — производная знаменателя этих выражений; p_v — корни уравнения $r_2(p_v) = 0$.

Окончательно с учетом (5.44) получим

$$U_1(t) = I_{\infty} \sum_{v=1}^n \frac{(b_3 p_v^3 + b_2 p_v^2 + b_1 p_v + b_0) e^{p_v t}}{(1 + 2\tau p_v)(a_2 p_v^2 + a_1 p_v + a_0) + (p_v + \tau p_v^2)(2a_2 p_v + a_1)},$$

$$U_2(t) = -I_{\infty} \sum_{v=1}^n \frac{(b_3 p_v^3 + b_2 p_v^2 + b_1 p_v + b_0) e^{p_v(t-t_2)}}{(1 + 2\tau p_v)(a_2 p_v^2 + a_1 p_v + a_0) + (p_v + \tau p_v^2)(2a_2 p_v + a_1)}.$$
(5.45)

В выражениях (5.45) корни уравнения p_v находятся из соотношения

$$p_v(1 + \tau p_v)(a_2 p_v^2 + a_1 p_v + a_0) = 0.$$

Их значения легко определяются:

$$p_1 = 0, p_2 = -1/\tau, p_{3,4} = \frac{R_x + R_0}{2(L + L_1)} \pm \sqrt{\left[\frac{R_x + R_0}{2(L + L_1)} \right]^2 - \frac{1}{C(L + L_1)}}.$$

Каждое из соотношений (5.45) состоит из четырех слагаемых, так как решение имеет четыре значения.

В качестве примера на рис. 5.26 приведены вычисленные кривые изменения напряжения «рельс—земля» для слагаемых $U_1(t)$ и $U_2(t)$ в относительных единицах (на 1 кА установившегося значения тока I_∞).

Для построения полного переходного процесса изменения напряжения необходимо осуществить операцию сложения кривых рис. 5.26, умножить значения ординат на масштабный коэффициент, равный значению установившегося тока к.з. в килоамперах, и получить суммарное напряжение «рельс—земля» в переходном процессе к.з. (рис. 5.27). Анализ этих зависимостей, проведенный в специальных исследованиях, показал их удовлетворительную сходимость с результатами экспериментальных данных.

Анализ значений напряжений «рельс—земля» в переходном режиме короткого замыкания контактной сети на рельс показывает, что при высоких постоянных времени процесса, установившемся значении тока к.з. и переходном сопротивлении «рельсы—земля» величина напряжения «рельс—земля» может достигать значений выше 1000 В, что позволило рекомендовать повысить пробивное напряжение искровых промежутков и класса групповых полупроводниковых вентилях, применяемых в заземляющих устройствах контактной сети на ж.-д. транспорте.

Характер кривой переходного процесса изменения напряжения «рельс—земля» показывает, что максимальное напряжение может возникать не только в момент начала короткого замыкания, но и в процессе его отключения (см. нижнюю часть рис. 5.27). Рассмотренная методика расчета напряжения «рельс—земля» позволяет произвести расчет напряжений для любых реальных условий эксплуатации рельсовых сетей.

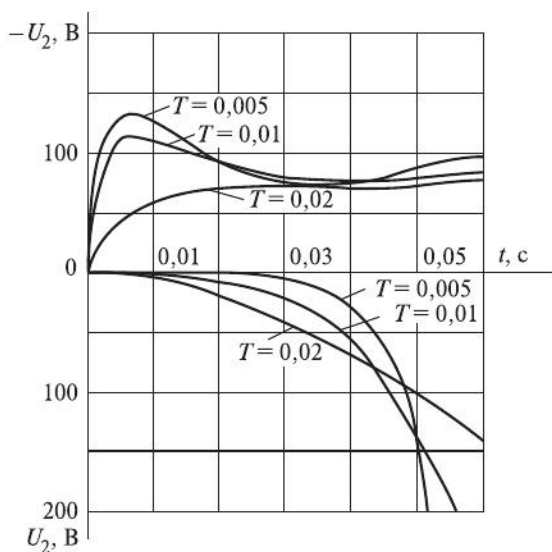


Рис. 5.26. Слагаемые напряжения «рельс—земля» в процессе короткого замыкания контактной сети на рельс

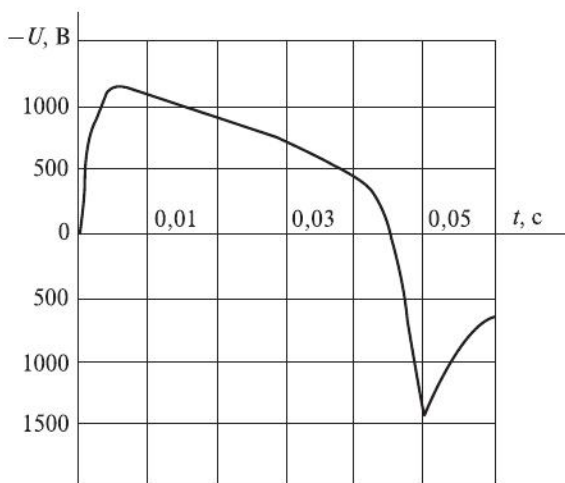


Рис. 5.27. Суммарное напряжение «рельс—земля» в переходном процессе короткого замыкания

5.6. Воздействие ЭМП электрифицированного рельсового транспорта постоянного тока на окружающую среду и технические меры защиты

Негативное влияние ЭМП электрифицированного рельсового транспорта постоянного тока на окружающую среду можно условно разделить на три вида:

- опасное воздействие на подземные конструкции и вредное воздействие на подземные воды из-за электрического коррозионного растворения металлов подземных сооружений токами электрической тяги в земле (блуждающими токами);

- опасное воздействие электрических потенциалов и токов рельсовой сети на человека при случайных прикосновениях к рельсам и электрически связанным с ними конструкциям;

- вредное воздействие ЭМП контактной сети на человека при обслуживании контактной сети, включая работы под напряжением.

Электрическая коррозия подземных сооружений. На электрифицированном железнодорожном транспорте постоянного тока особенно остро стоит проблема электрических коррозионных повреждений фундаментов опор контактной сети. В начале электрификации железных дорог опасность электрической коррозии подземных сооружений от токов электрической тяги в земле недооценивалась, поэтому при установке металлических и железобетонных опор контактной сети их металлические части заземлялись на рельс. Эксплуатация заземленных на рельс опор приводила к массовым коррозионным повреждениям и потере несущей способности опорных конструкций. Впоследствии для борьбы с коррозионными повреждениями опор в заземляющие присоединение к рельсу стали включать защитные устройства, призванные соединять заземленную конструкцию с рельсовой сетью в аварийных режимах и обеспечивать ее изоляцию от рельсов в нормальных режимах работы. В качестве защитного устройства в начале 60-х гг. прошлого века стали применять искровой промежуток ИПМ-62М. В 1963 г. проф. Марквардт Г.Г. (ВЗИИТ) предложил применять в качестве защитного устройства силовой полупроводниковый вентиль, однако слабое развитие полупроводниковой техники и высокая цена каждого вентиля не позволила осуществить в то время эту идею. В 1968 г. УЭМИИТ предложил ЦЭ МПС в развитии этой идеи применять в качестве защитного устройства диодный заземлитель на основе

группового вентиляющего устройства из трех полупроводниковых вентилях В-200 10-го класса, включенных параллельно. Устройство предназначалось для групповых заземлений опор контактной сети, и в 1972 г. ПКБ ЦЭ разработало конструкцию диодного заземлителя ЗД-1, которая широко применяется на сети железных дорог. В конце 70-х годов ВНИИЖТом предложен тиристорный заземлитель, а в 80-х — разработан искровой промежуток с вращающейся дугой типа ИПВ-ЦНИИ.

Процесс совершенствования защитных устройств на протяжении последних 30 лет привел к существенному снижению коррозионных повреждений опор контактной сети, однако проблема полностью не разрешена до настоящего времени. Так, опыт Московской ж.д. показывает, что ежегодно в результате обследований выявляются сотни опор, требующих ремонта или замены, высоким остается число внезапных изломов, угрожающих падением конструкции и нарушением безопасности движения поездов.

Эксплуатационные показатели свидетельствуют, что среднее число выходов из строя диодных заземлителей ЗД-1 в год составляет 1,4—1,6 % от числа установленных. Анализ отказов показал, что в подавляющем большинстве случаев причиной отказа является электрический пробой полупроводниковых вентилях, наиболее вероятные места установки поврежденных устройств оказываются там, где наблюдаются импульсные перенапряжения в рельсовых сетях (вблизи роговых разрядников, в местах трогания и разгона поездов).

На рис. 5.28 показан искровой промежуток ИПМ-62М и искровой промежуток ИПВ-ЦНИИ, а на рис. 5.29 — диодный заземлитель ЗД-1 и его вольт-амперная характеристика.

Типовой диодный заземлитель типа ЗД-1 в случае необходимости пропускает положительный импульс обратного приложенного напряжения, переходя в лавинный режим. Такой режим наступает при превышении напряжения значения 920—950 В (8-й класс). В лавинном режиме вентиль рассеивает незначительную мощность, зависящую от длительности процесса перенапряжения. При превышении предельной мощности (энергии) наступает необратимый пробой вентиля. Испытания, проведенные на Московской ж.д., показали, что в переходном режиме воздействия обратного напряжения почти во всех случаях в лавинный режим переходит только один вентиль из трех, у которого напряжение лавинообразования ниже.

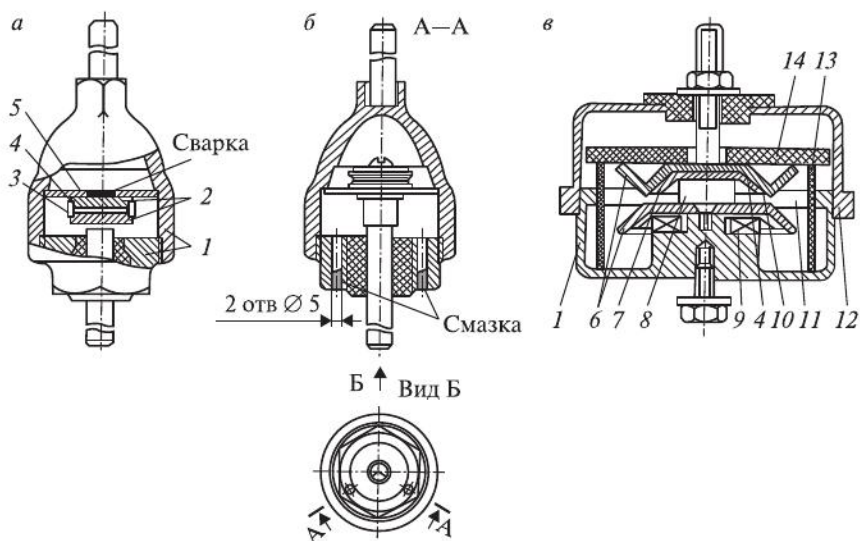


Рис. 5.28. Искровые промежутки с модернизированным вкладышем (а), выхлопными отверстиями (б) и с вращающейся дугой ИПВ ЦНИИ (в): 1 — корпус; 2 — стальные электроды; 3 — сборочное кольцо; 4 — слюда; 5 — упорная шайба; 6 — основные медные электроды; 7 — вспомогательный электрод; 8 — варистор; 9 — кольцевой магнит; 10 — искровой промежуток; 11 — воздушный промежуток; 12 — крышка; 13 — асбестовое кольцо; 14 — прижимная текстолитовая планка

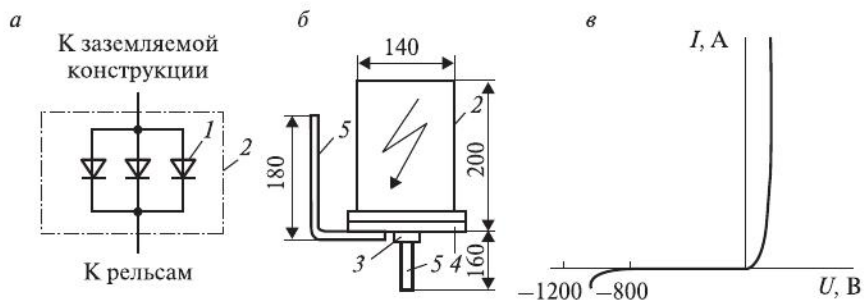


Рис. 5.29. Принципиальная схема (а), общий вид (б) и вольт-амперная характеристика диодного заземлителя ЗД-1 (в): 1 — полупроводниковый вентиль; 2 — корпус устройства; 3 — изолирующая втулка; 4 — крышка корпуса; 5 — контакты диодного заземлителя

Мощность, которая могла быть рассеяна тремя вентилями при их одновременном переходе в лавинный режим, на практике рассеивается одним из них, что повышает вероятность электрического пробоя диодного заземлителя.

На Московской ж.д. для повышения надежности диодных заземлителей были заменены вентили на более высокий 10-й класс, а иногда — на 12-й класс, эксплуатируются разработанные ПКБ ЦЭ диодные заземлители, состоящие из одного вентиля типа В2-320 16-го класса.

До 1972 г. перенапряжения со стороны рельсов приводили к массовому выходу из строя ИП с уставкой по напряжению 200—800 В. Повышение уставки до 800—1200 В оказалось недостаточно эффективным, так как нижний предел был ниже перенапряжений в рельсовой сети. На Московской ж.д. с 1979 г. пробивное напряжение искровых промежутков было повышено до 1200 В, после чего количество пробоев ИП снизилось с 20 до 1 % в год. На дороге используется ряд схемных решений включения диодных заземлителей и ИП (рис. 5.30), повышающих их эксплуатационную надежность.

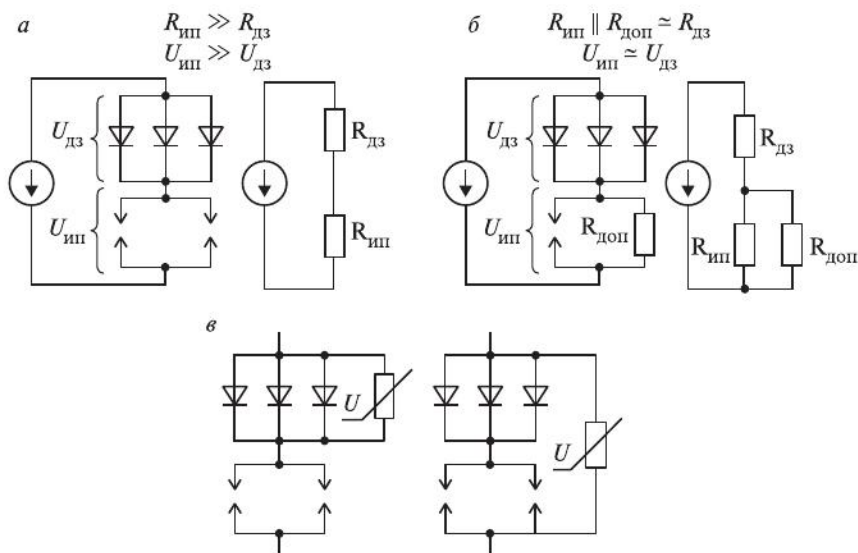


Рис. 5.30. Повышение устойчивости стандартного диодно-искрового заземлителя (а) с помощью резистора (б) и варисторов (в), включенных параллельно ИП, по предложению Московской ж.д.

В УрГУПС совместно с Южно-Уральской ж.д. в 1985 г. разработана система защитного ЗУ опор контактной сети от коррозии (рис. 5.31). Эта система эксплуатируется с начала 80-х гг. XX в. только на одном из участков Южно-Уральской ж.д. Практика показывает, что подобная система повсеместно применяется на электрифицированных участках железных дорог в развитых странах Европы (Германия).

Принципиальная схема системы включает следующие основные элементы: тяговые подстанции 1, контактную сеть межподстанционной зоны 3, изоляцию контактной сети 2, электрический локомотив 4, заземляющий (отсасывающий) фидер 5, дроссель-трансформатор рельсовой цепи 6, полярирующие (дренирующие) диодные блоки 7, протяженный заземлитель 8, опоры контактной сети 9, заземляющие присоединения 10, защитное ЗУ тяговой подстанции 11, заземляющую магистраль внутреннего ЗУ ТП 12, диодный короткозамыкатель 13, изоляцию РУ ТП 14.

При применении устройства обеспечивается электробезопасность персонала, осуществляется защита опор контактной сети и других подземных сооружений от электрической коррозии, повышается надежность отключения тяговой сети при повреждении

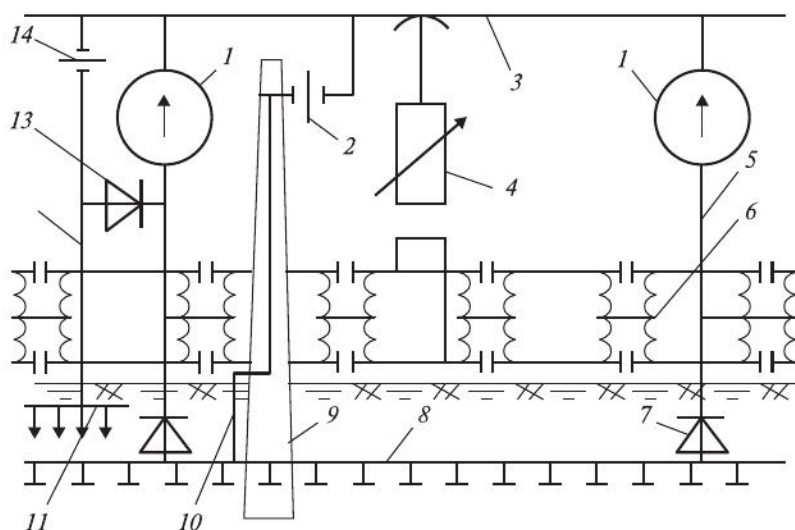


Рис. 5.31. Принципиальная схема защитного ЗУ опор контактной сети от электрической коррозии

изоляции за счет уменьшения сопротивления короткозамкнутой цепи, уменьшается вероятность отказа максимальной токовой защиты при ремонтах железнодорожных путей за счет устранения заземляющих присоединений к рельсовому пути, увеличивается надежность рельсовых цепей автоблокировки. Токораспределение в системе «рельс—протяженный заземлитель» при тяговой нагрузке, приложенной в различных точках межподстанционной зоны РЛ, исследовалось на модели-аналоге.

В табл. 5.11 и на рис. 5.32 показаны зависимости токов в РЛ и земле от переходного сопротивления, полученные с помощью модели-аналога.

Таблица 5.11

Токораспределение в системе «рельс—протяженное ЗУ»

Относительное значение тока	Переходное сопротивление $r_{п}$, Ом·км (1 путь /2 пути)					
	0,012	0,12	0,24	0,715	2,42	11,4
I_p^*	0,230	0,290	0,670	0,820	0,930	0,985
I_3^*	0,770	0,710	0,330	0,180	0,070	0,015
$I_{3у}^*$	0,095	0,098	0,187	0,445	0,565	0,570

Распределение токов в РЛ, земле и протяженном ЗУ существенно зависит от места приложения тяговой нагрузки по отношению к точке наблюдения.

Исследованием распределения токов в РЛ, земле и протяженном ЗУ установлено:

— ток в земле может составлять от 1,5 % тягового тока при высоких переходных сопротивлениях (более 10 Ом·км) до 75 % тягового тока при низких переходных сопротивлениях (ниже 0,1 Ом·км);

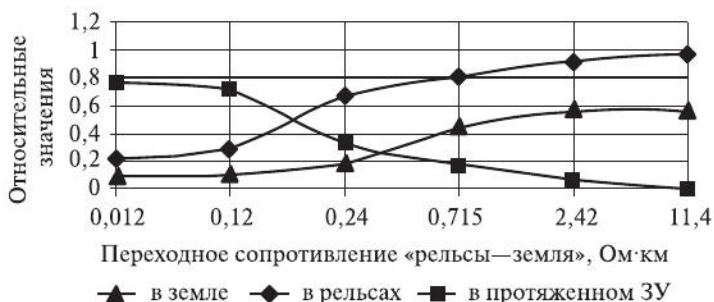


Рис. 5.32. Токораспределение тока в системе «рельс-протяженное ЗУ»

– ток протяженного ЗУ (см. рис. 5.32) может составлять величину от 10 % величины тока в земле при малых переходных сопротивлениях (ниже 0,1 Ом·км) и свыше 55 % при высоких переходных сопротивлениях (более 1 Ом·км);

– величина тока в земле по мере удаления тяговой нагрузки от места измерения (середина межподстанционной зоны) снижается в два раза по отношению к величине тока в РЛ (при нахождении тяговой нагрузки в конце межподстанционной зоны у тяговой подстанции), в то же время величина доли тока протяженного ЗУ увеличивается в 1,5 раза;

– подключение защитного ЗУ тяговой подстанции к протяженному ЗУ через специальный диодный короткозамыкатель увеличивает долю тока в протяженном ЗУ по отношению к току в земле в 2,5–3 раза.

Исследование переходного сопротивления и потенциалов ЭП, РЛ, земли и протяженного ЗУ на опытном участке ст. Полетаево—ст. Биргильда. Измерение удельного электрического сопротивления вдоль железнодорожной трассы опытного участка проводилось методом вертикального электрического зондирования грунта (ВЭЗ). В результате измерений были получены палетки (измеренные значения удельного электрического сопротивления грунта по глубине), привязанные с помощью железнодорожных пикетов к месту измерения. Анализ палеток показывает, что удельное электрическое сопротивление вдоль исследуемой трассы имеет двухслойную структуру с некоторым увеличением удельного сопротивления на глубине более 20 м. В двух точках опытного участка проводилось ежемесячное измерение удельного электрического сопротивления грунта в двух точках трассы с целью выявления его сезонного изменения (рис. 5.33).

Анализ удельного электрического сопротивления верхнего слоя земли вдоль трассы с интервалом менее 1,5 км показывает существенные колебания его величины: от 12 Ом·м до 144 Ом·м, т.е. оно изменяется более чем в 10 раз. Отсюда возникла гипотеза о том, что переходное сопротивление «рельсы—земля» может также иметь существенные различия по величине вдоль трассы РЛ, так как удельное электрическое сопротивление грунта является одной из основных составляющих величины переходного сопротивления.

В экспериментальных исследованиях на Южно-Уральской ж.д. значительное место было уделено анализу и разработке методов

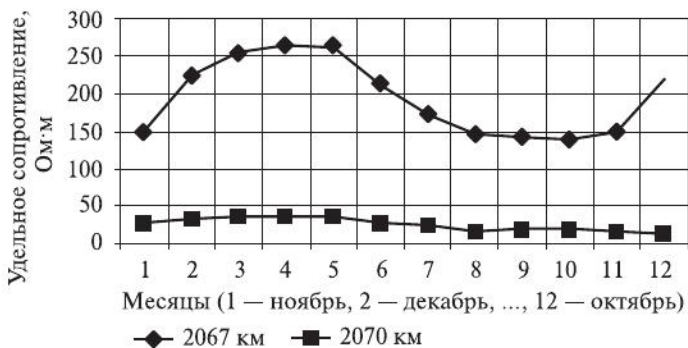


Рис. 5.33. Характер сезонного изменения удельного электрического сопротивления грунтов

измерения переходного сопротивления «рельсы—земля», оказывающего решающее влияние на токораспределение в РЛ и земле, а также на потенциальную функцию в РЛ и земле, что позволило подтвердить указанную гипотезу. В частности использовался метод, основанный на анализе сопротивления РС в месте подключения тяговой нагрузки.

При протекании тока подстанции в точке О (см. рис. 5.1), т.е. при $x = 0$, или тока локомотива в любой точке РЛ соотношение для определения переходного сопротивления «рельсы—земля» имеет вид

$$r_{\Pi} = 0,318\rho \frac{\Omega_{[0, \alpha Y_1]} - K\Omega_{[0, \alpha Y_2]}}{1 - K},$$

где r_{Π} — искомое переходное электрическое сопротивление «рельсы—земля», Ом·м; ρ — удельное электрическое сопротивление проводящей среды (грунта), Ом·м; Ω — специальная безразмерная функция; K — отношение измеренных значений напряжений РЛ поперек пути с координатами Y_2 и Y_1 .

Выражение представляет собой неявную зависимость переходного сопротивления от входящих в нее измеренных и рассчитанных величин, так как функция Ω , в свою очередь, зависит от аргумента α , который определяется величиной переходного сопротивления. Однако следует иметь в виду, что функция Ω является медленно изменяющейся в зависимости от аргумента r_{Π} , поэтому определение r_{Π} сводится к двум-трем итерациям метода последовательных приближений.

При исследовании опасного воздействия электрических потенциалов и токов рельсовой сети на человека при случайных при-

косновениях к рельсам и электрически связанным с ними конструкциям были сняты потенциальные диаграммы мгновенных значений напряжений «рельс—земля» и средних значений за период прохождения тяговой нагрузки по межподстанционной зоне моделируемого участка.

В табл. 5.12 приведены средние и максимальные значения напряжений шага и прикосновения РЛ опытного участка при заземлении конструкций на рельс и на протяженное защитное ЗУ. Полученные в результате статистической обработки потенциальных диаграмм напряжения РЛ при пропуске поездов по моделируемому опытному участку с токами, определяемыми тяговыми расчетами для данного участка и реальной неоднородностью электрических характеристик, хорошо согласуются с максимальными значениями напряжений РЛ, полученными экспериментально и на модели-аналоге.

Таблица 5.12

Прогнозируемые напряжения прикосновения (шага) при нормальной работе тяговой сети

Значение величины	Потенциал РЛ		Потенциал земли (в створе опор)		Прогноз напряжения прикосновения (шага), В при заземлении на	
	модель, В	действ., В	модель, В	действ., В	РЛ	протяженное ЗУ
Математическое ожидание	0—2,2	0—3,79	0—1,2	0—2,1	3,79	2,1
Максимальное значение	13,6	23,5	5,7	9,8	23,5	2,1

При нормальной работе тяговой сети максимальное прогнозируемое напряжение прикосновения (шага) при использовании РЛ в качестве защитного ЗУ составляет 23,5 В, что превышает критериальные значения напряжений прикосновения по ГОСТ 12.1.038-82 (2001). Максимальное прогнозируемое напряжение прикосновения (шага) при использовании протяженного ЗУ составляет 2,1 В, что ниже критериальных уровней напряжения прикосновения.

Определение напряжений шага и прикосновения при применении протяженного ЗУ в режиме короткого замыкания можно осу-

ществить через модули значений тока к.з. и входного сопротивления РС, так как протяженное ЗУ не обладает заметной внутренней и внешней индуктивностью.

Принимая во внимание величину входного сопротивления протяженного ЗУ, получено напряжение на протяженном ЗУ относительно нулевого потенциала при к.з. на него контактной сети продолжительностью 0,05–0,06 с (рис. 5.34).

Расчет коэффициента прикосновения и шага с использованием потенциальной функции протяженного ЗУ показывает, что при существующих соотношениях удельных проводимостей стали (материала протяженного ЗУ) и грунта в направлении, перпендикулярном оси пути, он практически равен единице, т.е. расчетные значения напряжений при к.з. (см. рис. 5.34) соответствуют напряжению прикосновения вдоль трассы протяженного ЗУ.

Экспериментальные исследования на опытном участке по определению напряжений шага и прикосновения показали удовлетворительную сходимость результатов расчетов и экспериментов.

Исследованиями установлено, что протяженное защитное заземляющее устройство, функционально не связанное с рельсовой линией, комплексно решает проблему защиты персонала от опасного воздействия электрического тока. Одновременно решается задача значительного снижения эксплуатационных расходов за счет повышения срока службы фундаментов опор контактной сети из-за



Рис. 5.34. Расчетные значения напряжений относительно нулевого потенциала при коротком замыкании на протяженное защитное ЗУ

отсутствия электрической коррозии, уменьшения расходов на диагностику защитных устройств, повышения надежности рельсовых цепей и снижения объемов работ при ремонте пути.

Воздействие ЭМП постоянного тока на человека показано в табл. 5.13, где приведены значения напряженностей электрического поля на уровне земли по оси пути (E_1), на расстоянии 5, 10 и 20 м (a) от оси пути, а также по оси пути на уровне контактной сети при работе под напряжением (E_2). На расстоянии от контактной сети более 5 м напряженность электрического поля постоянного тока не превышает естественную напряженность естественно постоянного электрического поля земли 0,13 кВ/м, а при работе под напряжением в непосредственной близости от проводов контактной сети — превышает его в 10 раз. Эта величина значительно ниже нормируемого предельного уровня напряженности электрического поля постоянного тока, действующего на человека (22,1 кВ при 8-часовом рабочем дне).

Таблица 5.13

Зависимость напряженностей электрического поля вблизи контактной сети постоянного тока от ее напряжения

Род тока	U , кВ	E_1 , кВ/м	E_2 , кВ/м	$a = 5$ м	$a = 10$ м	$a = 20$ м
Постоянный	0,6	0,0706	0,282	0,0158	0,00568	0,0016
	1,5	0,176	0,704	0,0395	0,0142	0,00401
	3,0	0,261	1,34	0,0809	0,0330	0,00948

Проведенный анализ позволяет утверждать, что уровень напряженности электрического поля, создаваемый в тяговой сети постоянной составляющей постоянного тока, не представляет опасности для обслуживающего персонала и населения прилегающих территорий.

5.7. Оценка электромагнитного поля на рабочих местах персонала тягового электроснабжения¹

До недавнего времени существовало представление, что магнитное поле постоянного тока тягового электроснабжения 3300 В создает напряженности магнитного поля существенно ниже нормируемых значений: СанПиН 2.2.4.1191–03 «Электромагнитные поля в производственных условиях» (табл. 5.14).

¹ Раздел написан совместно с канд. техн. наук А.Р. Закировой.

ПДУ постоянного магнитного поля

Время воздействия за рабочий день, мин	Условия воздействия			
	Общее		Локальное	
	ПДУ напряженности, H , кА/м	ПДУ магнитной индукции, B , мТл	ПДУ напряженности, H , кА/м	ПДУ магнитной индукции, B , мТл
0—10	24	30	40	50
11—60	16	20	24	30
61—480	8	10	12	15

Напряженность постоянного магнитного поля в тяговых сетях постоянного тока не превышает нескольких сотен А/м при самых больших тяговых токах, что существенно ниже нормируемых значений.

Необходимо иметь в виду, что в тяговой сети используется не постоянный ток, а выпрямленный, который содержит постоянную составляющую и так называемые гармонические составляющие переменного тока. В этом случае на организм человека действует одновременно постоянная составляющая и гармонический спектр переменных синусоидальных составляющих выпрямленного тока низкочастотного диапазона до 1000 Гц. В отечественной практике отсутствует нормирование параметров электромагнитного поля этого диапазона частот. Методика оценки одновременного воздействия на организм человека электромагнитных полей различного рода тока, частоты и длительности отсутствует в России и в мировой практике.

Проведенные отечественными и зарубежными специалистами физиологические исследования свидетельствуют о вредном воздействии ЭМП низкой частоты (НЧ) на организм человека; в результате такого воздействия возникают заболевания сердечно-сосудистой, нервной, эндокринной и иммунной систем, а также лейкемия, опухоли головного мозга.

Исследование заболеваний на Западно-Сибирской ж.д. показало, что за 25 лет количество обращений железнодорожников в больничные учреждения по некоторым заболеваниям существенно возросло. По сравнению с контрольными группами городских жителей: по заболеваниям злокачественных опухолей — более чем в два раза, по заболеваниям эндокринной системы — в четыре, за-

болеваниям системы кровообращения — в четыре. Можно предполагать, что рост обращений с заболеваниями связан с множеством причин, однако здесь нельзя исключать вредное воздействие ЭМП.

Результаты статистического исследования данных о заболеваниях электротехнического персонала на полигоне Свердловской ж.д. свидетельствует, что электротехнический персонал обращается в медицинские учреждения с заболеваниями нервной и эндокринной систем, системы кровообращения и крови, новообразованиями от 5,8 до 10,7 раз чаще, чем персонал неэлектротехнический. С большой степенью вероятности это связано и с вредным воздействием ЭМП спектра частот выпрямленного тока и напряжения.

Считается, что в идеальной электроэнергетической системе энергия должна передаваться при номинальных значениях частоты и напряжения, не изменяющихся во времени, однако в реальных энергосистемах эти условия не выполняются. Отклонение форм кривых тока и напряжения от правильной синусоиды обычно представляют с помощью гармонических составляющих.

Выпрямительные преобразователи тяговых подстанций служат генераторами высших гармоник тока и напряжения. Помимо ЭМП постоянного и переменного тока промышленной частоты, на рабочих местах персонала присутствует ЭМП высших гармонических составляющих выпрямленного тока и напряжения с частотой до 10 кГц.

Вредное воздействие ЭМП на персонал связано с длительным нахождением персонала в ЭУ разного уровня напряжений, в том числе выпрямленного напряжения и тока, включающего спектр высших гармонических составляющих повышенной частоты.

В общем случае частота f_k при несимметричном питающем напряжении определяется следующим образом:

$$f_k = 2nf_c = 100n,$$

где n — натуральный ряд целых чисел от 1 до ∞ ; f_c — частота тока питающей сети, Гц.

Частоту возникающего ЭМП можно представить в виде следующего ряда частот: 100, 200, 300, 400, 500 Гц и т.д. через каждые 100 Гц и теоретически до бесконечности.

Гармоники высших гармонических составляющих выпрямленного тока выпрямительных преобразователей (ВП) тяговых подстанций снижаются применением сглаживающих фильтрующих

устройств (ФУ), состоящих из реактора и включенных параллельно друг другу ряда индуктивно-емкостных контуров.

Практика показывает появление на тяговой подстанции, в том числе на рабочих местах, ряда гармоник: 50 Гц, 100 Гц, 300 Гц — от несимметричного питающего напряжения, в частности из-за низкой эффективности сглаживающего фильтра. Уровень отдельных высокочастотных составляющих спектра гармоник во многом зависит от правильной и надежной работы сглаживающего фильтра, однако в последнее время наблюдается низкое качество их обслуживания и ремонта, что сказывается на величинах спектральных составляющих ЭМП. Наличие пульсаций выпрямленного напряжения и тока ухудшает как работу потребителей, так и оказывает вредное влияние на обслуживающий электротехнический персонал.

Возникает проблема оценки эффективности работающих сглаживающих устройств ТП.

С помощью виртуальной модели выпрямителя можно теоретически оценить уровни напряженности ЭП и МП высших гармонических составляющих выпрямленного тока и напряжения на рабочих местах персонала тягового электроснабжения. Предложенная модель позволяет получить спектр высших гармонических составляющих выпрямленного тока и напряжения при идеальной работе сглаживающего фильтра.

Для оценки ЭМП на рабочих местах персонала тяговой подстанции с учетом высших гармонических составляющих были проведены экспериментальные исследования уровней напряженности ЭП и МП в машинном зале РУ-3,3 кВ одной из ТП Свердловской ж.д. (рис. 5.35).

Проведены измерения напряженности ЭП и МП от «+» и «-» шины на высоте 1,8 м от поверхности пола и на расстоянии 0,5 м от него. Эскиз помещения с расположением точек измерения приведен на рис. 5.36 и 5.37.

Исследования проведены при температуре +18 °С, относительной влажности воздуха 40 %; температуре наружной среды: -25 °С, ветер 3—5 м/с; рабочее напряжение $U_{\text{раб}} = 3,3$ кВ, рабочий выпрямленный ток $I_{\text{раб}}$ до 1000 А; коэффициент загрузки сети 0—1.

В табл. 5.15 приведен анализ напряженности магнитного поля в точках № 1—9 под шинным мостом в РУ-3,3 кВ (рис. 5.36). Из данных табл. 5.15 видно, что определенной величине тока и час-



Рис. 5.35. Машинный зал РУ-3,3 кВ

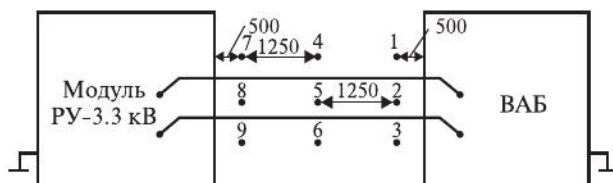


Рис. 5.36. Эскиз расположения шин от модуля РУ-3,3 кВ до автоматического быстродействующего выпрямителя ВАО — вид сверху

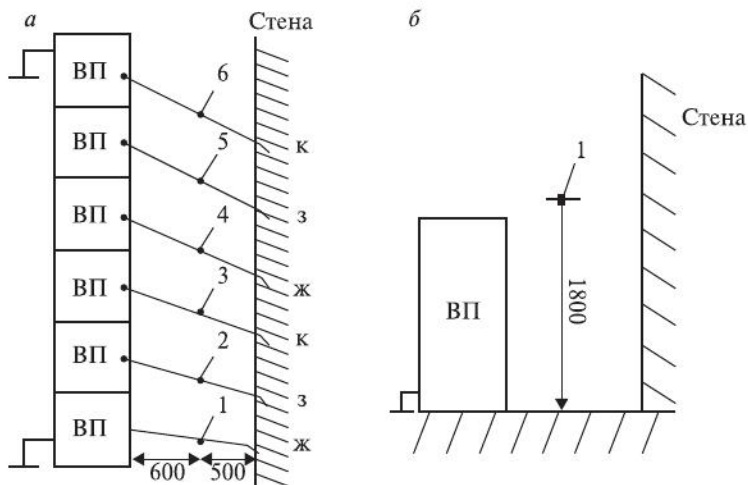


Рис. 5.37. Эскиз расположения шин от выпрямительного преобразователя (ВТ), вид сверху (а), и сбоку (б)

тоте соответствует свое значение напряженности МП. Для точек № 4–6 уровни напряженности МП составляют 125 А/м, что превышает значения ПДУ МП по нормам в 1,5 раза и представляют опасность для здоровья электротехнического персонала. Возникает необходимость в разработке средств защиты для ограничения времени влияния на персонал МП.

Таблица 5.15

Анализ напряженности магнитного поля H (А/м) под шинным мостом в РУ-3,3 кВ

f_k , Гц \ № точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$H_{\text{норм}}$, А/м
50	8	6	12	125	125	125	15	8,5	6,5	80
100	6	5	5	8	10	9	6	5	4	Не норм.
200	2	1	1	5	7	7	3	2	2	Не норм.
250	5	4	0	18	18	18	15	4	4	Не норм.
350	3	2	2	10	10	5	11	3	3	Не норм.
400	0,5	0,5	0,7	2	2	2	1	0,5	0,8	Не норм.
500	0,5	0,5	0,7	0,2	0,1	0,2	0,5	0,5	0,8	Не норм.
550	0,5	0,5	0,7	7	6	8	7	0,5	0,8	Не норм.
I_{dk} , А	400	300	600	1000	1000	1000	750	420	350	

Таблица 5.16

Анализ напряженности электрического поля E (В/м) под шинным мостом в РУ-3,3 кВ

$U_{\text{раб}} = 3,3 \text{ кВ}$										
f_k , Гц \ № точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$E_{\text{норм}}$, В/м
25	12	8	12	28	12	12	17	53	12	Не норм.
50	9	9,8	10	17	10	42	42	14	10	5000
100	2	2	2	4	2	3	3	4	2	Не норм.
150	5	7,5	5	8	7	7	8	8	7	Не норм.
200	1	0,7	0,6	1	0,8	0,9	1	1	1	Не норм.
300	2	3	2	4	3	4	3	3	3	Не норм.
400	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	Не норм.
500	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	Не норм.
600	1	2,1	1	3	2	0,3	3	3	2	Не норм.

В табл. 5.16 приведен анализ напряженности электрического поля E в точках № 1—9 под шинным мостом в РУ-3,3 кВ (см. рис 5.36). Из данных таблицы видно, что определенной величине тока и частоте соответствует свое значение напряженности E . Уровни напряженности E под шинным мостом (от ВП до ячеек РУ-3,3 кВ) показали невысокие значения, что обусловлено для ряда измеряемых точек наличием токоведущих частей над металлическими ячейками, где силовые линии напряженности электрического поля E от шин, проходящих над ячейками, замыкаются на них, т.е. осуществляется экранирование электрической составляющей ЭМП. Для уровня напряженности E характерны неизменные значения величины напряженности с течением времени, так как напряжение ЭУ практически остается неизменным. Уровни напряженности электрического поля E не представляют опасности для здоровья электротехнического персонала и интереса для исследований отдельно этого параметра.

Проведена оценка напряженности H магнитного поля (МП) под отходящими шинами выпрямительного преобразователя (ВП) на расстояниях 1,8 м от поверхности пола и 0,5 м от него. Эскиз помещения и расположение точек измерения приведен на рис. 5.37.

В табл. 5.17 приведен анализ напряженностей H магнитной составляющей ЭМП в точках № 1—6 под отходящими шинами ВП.

Таблица 5.17

Анализ напряженности H (А/м) под отходящими шинами ВП

f_k , Гц \ № точки	1	2	3	4	5	6	$H_{\text{норм}}$, А/м
50	125	125	125	125	125	125*	80
100	6	10	5	8	10	9	Не норм.
200	3	2	2	3	4	2	Не норм.
250	18	18	17	18	18	18	Не норм.
350	15	2	2	10	16	10	Не норм.
400	0,5	0,2	0,2	0,1	0,5	0,5	Не норм.
500	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	Не норм.
550	0,5	8	7	7	8	8	Не норм.
$I_{\text{дк}}$, А	1000	1000	1000	1000	1000	1000	

* Выделенные значения превышают нормируемые по СанПиН 2.2.4.1191—03.

Из данных табл. 5.17 видно, что в каждой точке определенной величине тока и частоте соответствует свое значение напряженности магнитного поля H . Для точек № 1—6 напряженность МП составляет 125 А/м, что превышает значения нормируемых ПДУ напряженностей H в 1,5 раза. Возникает необходимость в разработке средств защиты персонала для снижения продолжительности воздействия напряженности магнитного поля.

Результаты измерений напряженности электрического поля E в точках № 1, 3, 6 при $U_{\text{раб}} = 3,1$ кВ приведены в табл. 5.18.

Таблица 5.18

Анализ напряженности E (В/м) под отходящими шинами ВП

f_k , Гц \ № точки	1	3	6	$E_{\text{норм}}$, В/м
25	60	50	50	Не норм.
50	72	73	55	5000
100	68	69	69	Не норм.
150	44	45	44	Не норм.
200	32	31	31	Не норм.
300	20	20	20	Не норм.
400	17	18	18	Не норм.
500	12	13	12	Не норм.
600	10	10	10	Не норм.

Значения табл. 5.18 показывают, что наибольшее значение напряженности E отмечено при частоте 50 Гц и составляет 73 В/м, что не превышает уровень ПДУ (0,5 кВ/м). Уровень напряженности E для частоты 50 Гц в рассмотренных точках не представляет опасности для здоровья электротехнического персонала.

Представленные данные при определенных условиях свидетельствуют о вредных условиях труда на рабочих местах электротехнического персонала тягового электроснабжения. Поэтому необходима разработка технических предложений по защите персонала от МП, например ограничением времени выполнения работ.

Для сохранения жизни и защиты здоровья персонала от МП предлагается также использовать способ контроля уровня напряженности МП и реализующее этот способ устройство (рис. 5.38), представляющее собой сигнализирующее устройство о превышении уровня нормируемой напряженности МП.

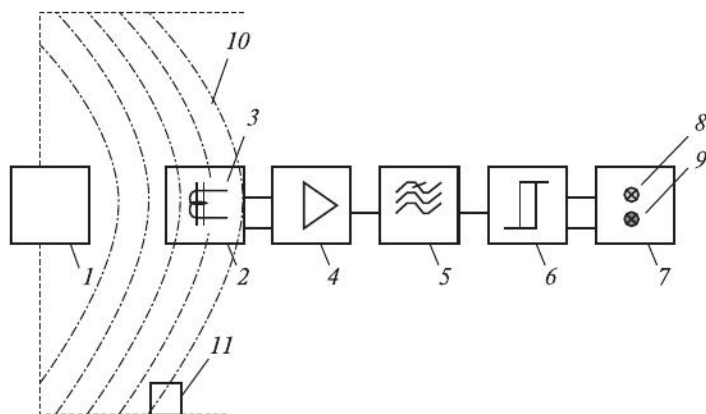


Рис. 5.38. Схема устройства контроля уровня напряженности магнитного поля в электроустановках переменного тока

Устройство работает следующим образом: после включения блока питания прибора выключателем *11* переменное магнитное поле *10* электроустановки переменного тока *1* воздействует на спиралевидную рамку *3* антенного датчика *2*, подключенного к блоку питания (на схеме не представлен), создает в нем переменный ток, пропорциональный величине напряженности воздействующего магнитного поля *10*. Полученный сигнал переменного тока поступает на вход усилителя *4*, имеющего входное полное сопротивление, близкое к нулю. На выходе усилителя *4* формируется сигнал переменного напряжения, кратный величине входящего переменного тока. Переменное напряжение с выхода усилителя *4* поступает на звено частотной коррекции *5*, учитывающий особенности частотных свойств антенного датчика *2* и усилителя *4*, откуда на вход порогового элемента *6* подается сигнал переменного напряжения с заданной величиной, соответствующей напряженности магнитного поля в 100 мкТл , при этом, если величина сигнала переменного напряжения будет ниже соответствующего ему максимального предельно-допустимого уровня напряженности магнитного поля в 100 мкТл ; то на сигнальном устройстве *7* будет гореть зеленая лампа *8*, при превышении максимального предельно-допустимого уровня напряженности магнитного поля сигнал с порогового элемента *6* поступает на красную лампу *9* сигнального устройства.

Применение предлагаемого способа контроля напряженности магнитного поля и устройства для его осуществления обеспечивает непрерывный контроль напряженности магнитного поля и позволяет предупредить персонал о превышении его предельно допустимого уровня.

При оценке напряженности ЭМП по существующим в настоящее время нормативным документам не учитывается спектр частот диапазона от 50 до 10 кГц (кроме 50 Гц и 10 кГц).

При дальнейших исследованиях возникает необходимость:

- оценки эффективности применяемых сглаживающих устройств на тяговых подстанциях с помощью виртуального выпрямителя;
- разработки методики нормирования предельно допустимых уровней напряженности ЭМП при совместном воздействии на организм человека постоянного магнитного поля и высших гармонических составляющих выпрямленного тока в частотном диапазоне до 10 кГц;
- разработки сигнализатора предельно допустимого уровня магнитного поля от суммарного действия ЭМП высших гармонических составляющих выпрямленного тока.

Глава 6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

6.1. Основные характеристики электрического рельсового транспорта переменного тока

Работа электрифицированного на однофазном переменном токе железнодорожного транспорта связана с *распространением ЭМП тяговой сети в окружающем пространстве*, которое может оказывать вредное и опасное электромагнитное влияние на окружающую среду, человека и сооружения.

Вредное электромагнитное влияние проявляется в распространении ЭМП в воздушном пространстве вблизи контактной сети, а *опасное* — связано с распространением ЭМП в виде электрических токов и напряжений в рельсовых сетях, конструкциях, заземленных на защитные ЗУ и РЛ, что создает возможность случайного прикосновения к доступным частям, находящимся под напряжением.

Теоретические основы выбора и построения объективных средств защиты от электрического поражения в тяговых сетях переменного тока, количественная оценка опасности электромагнитных процессов и новые методы расчета параметров ЭМП в зонах нахождения персонала при нестационарных режимах в сложных и неоднородных тяговых сетях, включая систему электроснабжения 2×25 кВ, изложены в работах Б.И. Косарева.

Отличие процессов протекания токов в тяговых сетях переменного тока, использующих рельсы в качестве фазного провода (фаза С) заключается в том, что ток, протекающий по контактной сети, наводит в контуре «рельсы—земля» ЭДС за счет взаимной индуктивной связи контуров «контактная сеть—земля» и «рельсы—земля». Обозначив коэффициент взаимоиндукции между контурами M , ЭДС взаимной индукции можно определить выражением

$$E_p = -I_0 j\omega M = -I_0 z_{kp},$$

где E_p — ЭДС взаимной индукции рельса на единицу длины участка, В/км; I_0 — ток контактной сети, А; $z_{kp} = j\omega M$ — величина сопротивления взаимной индукции (комплексное число) между контурами «контактный провод—земля» и «рельс—земля», Ом/км.

С учетом отличий цепи переменного тока система (5.1), характеризующая изменение напряжения и тока в РЛ (рис. 6.1), примет вид

$$\left. \begin{aligned} dI_{px} &= -\frac{\varphi_x}{Z_{II}} dx, \\ d\varphi_x &= -(I_{px} z_p + I_0 z_{kp}) dx. \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

Решение в общем виде имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_x &= Ae^{kx} + Be^{-kx}, \\ I_{px} &= -\frac{1}{m}(Ae^{kx} - Be^{-kx}) - nI_0, \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

где $k = \sqrt{\frac{z_p}{z_{II}}}$, $m = \sqrt{z_p z_{II}}$, $n = \frac{z_{kp}}{z_p}$.

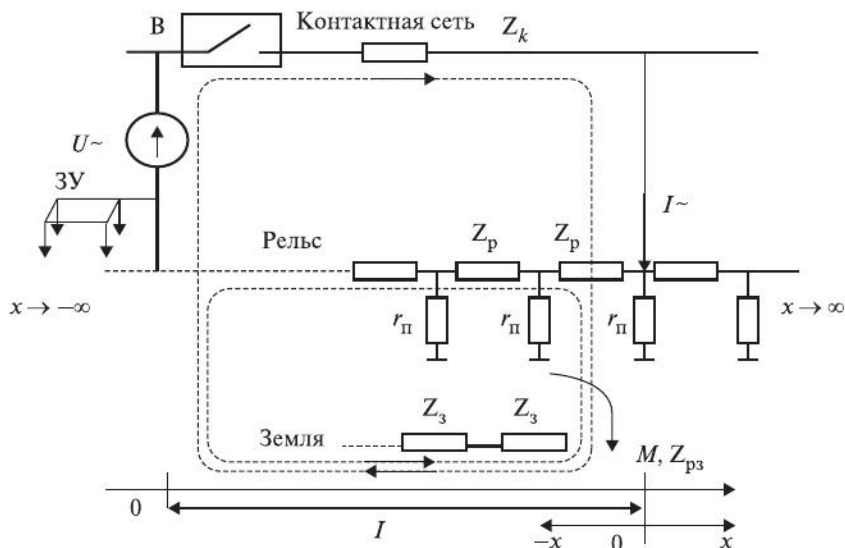


Рис. 6.1. Схема электромагнитных цепей в тяговой сети однофазного переменного тока

Частное решение системы дифференциальных уравнений находится из граничных условий, которые зависят от условий задачи. Найдем согласно уравнениям для потенциала относительно удаленной земли и тока в рельсах максимальные значения напряжения в РЛ относительно удаленной земли и ток в РЛ при условии $x = l$ и рельсы слева от подстанции и справа от нагрузки (см. рис. 6.1) распространяются в бесконечность

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{x \max} &= \frac{I_0 m}{2} \left(1 - \frac{z_{kp}}{z_p} \right) (1 - e^{-kl}), \\ I_{px \max} &= -\frac{I_0 m}{2} \left(1 - \frac{z_{kp}}{z_p} \right) (1 + e^{-kl}) - \frac{z_{kp}}{z_p} I_0. \end{aligned} \right\} \quad (6.3)$$

Анализ системы (6.3) показывает, что величина максимального напряжения РЛ относительно нулевого потенциала зависит от величин тока нагрузки РЛ, волнового сопротивления m , соотношения сопротивлений взаимной индукции z_{kp} и продольного электрического сопротивления рельсов z_p , а также величины коэффициента распространения k рельсовой линии.

Наиболее полно и всесторонне анализ напряжений РЛ на участках переменного тока приведен в монографии д.т.н. Б.И. Косарева. В частности, на основе экспериментально-расчетных методов показано, что при к.з. в тяговой сети величина математического ожидания напряжения «рельс—земля» составляет $m U_p = 1300$ В (дисперсия $D_{U_p} = 330$ В) при продолжительностях отключения режима короткого замыкания 0,1—0,4 с. В работе акцент исследований сделан на аварийные режимы и поэтому не приводятся данные о напряжениях «рельс—земля» в стационарных режимах протекания по цепи тока тяговой нагрузки.

Электромагнитное влияние в работе проф. Бадера Н.П. (МИИТ 2002 г.) рассматривается только на смежные линии и металлические коммуникации, большое место уделяется опасному влиянию на сооружения, дается подробный анализ электрической составляющей напряженности ЭМП и опасных напряжений в смежных сооружениях. Вредное и опасное воздействие ЭМП и его магнитной составляющей непосредственно на человека практически не упоминается.

Протекание в земле переменных токов качественно отличается от протекания постоянных токов из-за проявления собственной ин-

дуктивности проводящего пространства земли. Известно (Р. Рюденберг), что индуктивность проводящего пространства земли L для переменных токов, протекающих в системе «провод—земля», может определяться в системе СИ из соотношения

$$L = \left(2x \ln \frac{563}{h} \sqrt{\frac{\rho}{f}} \right) \cdot 10^{-4}, \text{ мГн/км}, \quad (6.4)$$

где x — длина линии тока в земле, м; h — высота провода над поверхностью земли, м; ρ — среднее удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м; f — частота переменного тока, Гц.

Индуктивность проводящего пространства земли создает дополнительное индуктивное сопротивление протекающим по земле токам. Определена величина этого сопротивления, которая для частоты 50 Гц и среднего удельного электрического сопротивления грунта $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ составляет $z_3 = 0,05 \text{ Ом/км}$. При увеличении удельного электрического сопротивления грунта индуктивность проводящего пространства земли и его индуктивное сопротивление возрастают, так как увеличивается глубина фиктивной плоскости возврата токов в земле. Магнитное взаимодействие между токами в проводе и земле приводит к тому, что ток в земле подтягивается к проводу и не может удалиться от него на произвольное расстояние, в то же время индуктивность проводящего пространства земли препятствует протеканию тока из рельсов в землю при возврате тока двухпроводной линии по рельсам. Характерной особенностью токов в земле при использовании земли в качестве фазного провода является протекание их непосредственно по трассе питающего провода. Входное сопротивление РЛ при однофазном переменном токе оказывается выше, чем при аналогичных обстоятельствах при постоянном токе. Достаточно малая величина z_3 по сравнению с максимальными значениями переходного сопротивления «рельсы—земля» r_{Π} , при которых возникают максимальные напряжения прикосновения, позволяют не учитывать это сопротивление в практических расчетах.

Индуктивность провода двухпроводной линии с встречно протекающими токами можно определить из соотношения

$$L = L_{\text{собст}} - L_{\text{вн}}, \quad (6.5)$$

где $L_{\text{собст}}$ — собственная внутренняя индуктивность провода, зависящая от его радиуса R ; $L_{\text{вн}}$ — индуктивность провода от внешнего поля другого провода с встречным током, зависящая от расстояния между проводами h .

Индуктивность провода определяется размерами петли и может быть определена из формулы Ф.Поллячека в единицах системы СИ:

$$L_{\text{собст}} = \left(1 + 4,6 \lg \frac{400}{R} \sqrt{\frac{\rho}{f}} - j \frac{\pi}{2}\right) \cdot 10^{-4}, \text{ Гн/км},$$

$$L_{\text{вн}} = \left(1 + 4,6 \lg \frac{400}{h} \sqrt{\frac{\rho}{f}} - j \frac{\pi}{2}\right) \cdot 10^{-4}, \text{ Гн/км},$$
(6.6)

где R — радиус провода, м; h — расстояние между проводами с встречно направленными токами, м; ρ — удельное электрическое сопротивление грунта, Ом/м; f — частота переменного тока, Гц.

Подставляя соотношения для индуктивностей из (6.6) в выражение (6.5), получим соотношение для индуктивности провода двухпроводной линии

$$L = 4,6 \cdot 10^{-4} \lg \frac{h}{R}, \text{ Гн/км}. \quad (6.7)$$

Индуктивность или коэффициент самоиндукции двухпроводной линии с встречно протекающими в проводах токами зависит от расстояния между проводами и радиуса поперечного сечения проводов. При увеличении расстояния между проводами увеличивается магнитный поток, пронизывающий петлю, и растет собственная индуктивность линии. При увеличении диаметра проводов индуктивность падает.

Если ток одного направления распределяется между несколькими параллельно соединенными проводами, что эквивалентно увеличению радиуса сечения проводов, то индуктивность такой линии уменьшается. Этим пользуются, например, при передаче больших мощностей по высоковольтным ЛЭП, «расщепляя» отдельные провода, т.е. заменяя один провод несколькими, соединенными между собой параллельно.

В контактных подвесках электрических железных дорог однофазного переменного тока несущий трос и контактный провод можно рассматривать как расщепленный провод. Аналогичное положение в рельсовой линии при протекании части тока по земле, так как ее можно рассматривать как провод, параллельно присоединенный к рельсам.

В расчетах тяговой сети однофазного переменного тока сложилась практика определять погонное сопротивление всего контура

вместе, а не сопротивления отдельных элементов, составляющих этот контур. Под величиной полного сопротивления тяговой сети понимается сопротивление всей схемы, состоящей из проводов, рельсов и земли, что неприемлемо при расчете параметров электробезопасности, так как требует определения напряжений прикосновения и шага, т.е. разности потенциалов между отдельными элементами тяговой сети.

Электрические сопротивления отдельных составляющих контура тока тяговой сети, зависящие от первичных параметров тяговой сети, существенно влияют на распределение токов и уровень величин напряжений прикосновения и токов через тело человека.

6.2. Параметры тяговой сети переменного тока

В работах К.Г. Марквардта показано, что полное сопротивление контура «контактный провод—земля» может быть определено для 1 км однопутного участка из соотношения

$$z_1 = (r_{кэ} + jx_{кэ}) + \eta_1 (r_{рэ} + x_{рэ}), \quad (6.8)$$

где $r_{кэ}$, $x_{кэ}$ — эквивалентное активное и индуктивное сопротивление контактной сети, Ом/км; $r_{рэ}$, $x_{рэ}$ — эквивалентное активное и индуктивное сопротивление рельсовой сети, Ом/км; η_1 — коэффициент токораспределения между рельсовой и контактной сетью, отношение тока в рельсовой сети к току в контактной сети выражается комплексным числом $\eta_1 = a_1 + jb_1$.

Величины a_1 и b_1 могут быть определены из кривых рис. 6.2, построенных в зависимости от отношения $l/\sqrt{r_{п}}$, где l — длина

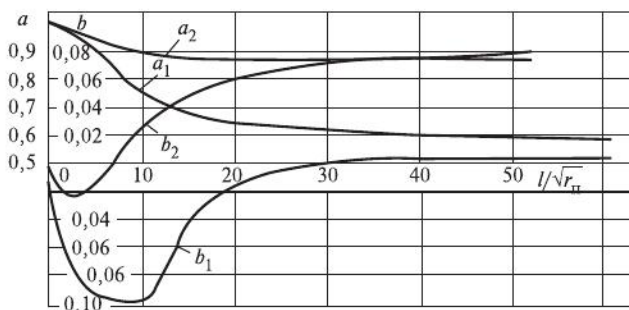


Рис. 6.2. Зависимости действительной и мнимой составляющих отношения среднего тока в рельсовой сети к току контактной сети для однопутного (a_1, b_1) и двухпутного (a_2, b_2) участков

петли контактной сети с током, m — переходное сопротивление «рельсы—земля».

Входящие в формулу (6.8) значения величин определяются из соотношений:

$$r_{кэ} = \frac{r_k r_T + 0,126}{r_k + r_T + \frac{0,504}{(r_k + r_T)}}; \quad (6.9)$$

$$x_{кэ} = \frac{0,355(r_k^2 + r_T^2) + 0,09}{(r_k + r_T)^2 + 0,504} + 0,106; \quad (6.10)$$

$$r_{пэ} = 0,5r_{pa}; \quad (6.11)$$

$$x_{пэ} = 0,375r_{pa} + 0,0628 \ln \frac{a_{кр}}{\sqrt{R_p a_p}}, \quad (6.12)$$

где r_k, r_T — активное сопротивление 1 км контактного провода и несущего троса контактной сети, Ом/км; r_{pa} — активное сопротивление 1 км одного рельса, Ом/км; $a_{кр}$ — высота эквивалентного контактного провода над уровнем головки рельса, м; R_p — эквивалентный радиус рельса (радиус окружности с длиной, равной периметру поперечного сечения рельса), м; a_p — расстояние между осями рельсов, м ($a_p = 1,6$ м).

Результирующее сопротивление 1 км однопутной тяговой сети можно определить из соотношений:

$$\begin{aligned} z &= r_a + jx; \\ r_a &= r_{кэ} + a_1 r_{пэ} - b_1 x_{пэ}; \\ x &= x_{кэ} + a_1 x_{пэ} + b_1 r_{пэ}. \end{aligned} \quad (6.13)$$

Активные и реактивные сопротивления несущих и контактных проводов и рельсов для промышленной частоты переменного тока приводятся в справочной литературе.

При *раздельной схеме питания контактных подвесок двухпутного участка* результирующее сопротивление тяговой сети одного пути необходимо определять с учетом сопротивления взаимной индукции Z_{12} тяговых сетей двух путей.

В этом случае сопротивление 1 км тяговой сети одного пути без учета сопротивления взаимной индукции можно выразить соотношением

$$Z_1 = (r_{кэ} + jx_{кэ}) + \eta_2 (r_{пэ2} + jx_{пэ2}). \quad (6.14)$$

Величины $r_{k\varepsilon}$ и $x_{k\varepsilon}$ могут быть определены из соотношений (6.9)—(6.11) или взяты из справочников. Коэффициент η_2 определяется как комплексное число

$$\eta_2 = a_2 + jb_2,$$

где a_2 и b_2 определяются из рис. 6.2.

Электрическое сопротивление 1 км рельсовой сети двухпутного участка можно определить из соотношений

$$r_{p\varepsilon 2} = 0,5r_{p\varepsilon};$$

$$x_{p\varepsilon 2} = 0,375r_{p\varepsilon} + 0,0628 \ln \left(\frac{a_{kp}}{\sqrt[4]{R_p a_p a_{1,2}^2}} \right), \quad (6.15)$$

где $a_{1,2}$ — расстояние между осями путей двухпутного участка, м.

Комплексное значение величины сопротивления тяговой сети одного пути двухпутного участка без учета сопротивления взаимной индукции можно определить из соотношения

$$z_1 = (r_{k\varepsilon} + a_2 r_{p\varepsilon 2} - b_2 x_{p\varepsilon 2}) + j(x_{k\varepsilon} + a_2 x_{p\varepsilon 2} + b_2 r_{p\varepsilon 2}). \quad (6.16)$$

Сопротивление взаимной индукции между контурами, образованными линиями контактной сети двух путей, с учетом наличия контура «рельс—земля» определяется выражением

$$z_{1,2} = z_{kk\varepsilon} + \eta_2 z_{p\varepsilon 2},$$

где $z_{kk\varepsilon}$ — сопротивление взаимной индукции между контурами, образованными линиями контактной сети двух путей, Ом/км.

Сопротивление взаимной индукции 1 км контуров контактной сети двух путей определяется соотношением

$$z_{kk\varepsilon} = j\omega \cdot 10^{-4} \ln \left(\frac{a_{kp}}{a_{kk}} \right), \quad (6.17)$$

где a_{kk} — расстояние между осями контактных подвесок двух путей, м; для средних условий $z_{kk\varepsilon} \approx j \cdot 0,033$ Ом/км.

Комплексное значение сопротивления взаимной индукции контуров двух путей двухпутного участка можно определить соотношением

$$z_{1,2} = (a_2 r_{p\varepsilon 2} - b_2 x_{p\varepsilon 2}) + j(0,033 + a_2 x_{p\varepsilon 2} + b_2 r_{p\varepsilon 2}). \quad (6.18)$$

Полное эквивалентное сопротивление одного пути двухпутного участка при раздельной работе контактных подвесок составит

$$z_{1,II} = z_1 + z_{1,2} = (r_{кэ} + 2a_2 r_{пэ2} - 2b_2 x_{пэ2}) + j(x_{кэ} + 0,033 + 2a_2 x_{пэ2} + 2b_2 r_{пэ2}). \quad (6.19)$$

Результирующее сопротивление 1 км тяговой сети двухпутного участка при *параллельном соединении* контактных подвесок можно определить из соотношения

$$z_2 = (0,5r_{кэ} + a_2 r_{пэ2} - b_2 x_{пэ2}) + j(0,5x_{кэ} + 0,0165 + a_2 x_{пэ2} + b_2 r_{пэ2}). \quad (6.20)$$

Значения величин, входящих в соотношения (6.14)—(6.20), для различных вариантов выполнения контактных подвесок приведены в справочниках.

Большое значение для определения воздействующих на человека напряжений в тяговых сетях магистральных железных дорог имеет правильное определение величины тока к.з. при нарушении изоляции контактной сети или ЭПС. При этом определении его величины необходимо учитывать не только параметры электрических сопротивлений тяговой сети, но и расчетные сопротивления и проводимости системы внешнего электроснабжения и тяговых подстанций.

Для определения мощности короткого замыкания на шинах ТП определяют в относительных единицах, приведенных к напряжению тяговой сети, полное сопротивление схемы внешнего электроснабжения тяговой подстанции. Так, сопротивление ЛЭП, приведенное к напряжению U_T тяговой сети, определяется выражением

$$z_T = \left(\frac{U_T}{U_L} \right)^2 z_L; \quad (6.21)$$

где U_L — номинальное напряжение линии электрической передачи, кВ; z_L — полное электрическое сопротивление линии, Ом.

Сопротивление X_c одной фазы системы внешнего электроснабжения, приведенное к напряжению тяговой сети U_T , определяют по формуле

$$X_c \approx \frac{U^2}{S_{кз}}, \quad (6.22)$$

где $S_{кз}$ — мощность короткого замыкания на шинах тяговой подстанции.

Реактивное сопротивление ТП переменного тока, отнесенное к напряжению тяговой сети, определяют по формуле

$$X_{\text{ТП}} = \frac{u_{\text{к}}}{100} \frac{U_{\text{T}}^2}{n_{\text{T}} S_{\text{H}}}, \quad (6.23)$$

где $u_{\text{к}}$ — относительная величина напряжения короткого замыкания тягового трансформатора, %; n_{T} — число тяговых трансформаторов; S_{H} — номинальная мощность тягового трансформатора, В · А.

Общее реактивное сопротивление одной фазы внешнего электроснабжения до тяговых шин подстанции, приведенное к напряжению тяговой сети:

$$X_{\text{ВН}} = X_{\text{с}} + X_{\text{ТП}}. \quad (6.24)$$

При расчете тока к.з. в контактной сети однопутных и двухпутных участков для случаев полного параллельного соединения проводов путей или полного их разделения (при отсутствии постов секционирования и пунктов параллельного соединения) сопротивление цепи к.з. можно определить из соотношений:

$$\begin{aligned} R_{\text{кз}} &= R_{\text{ф}} + R_{\text{о}} + r l_{\text{кз}}; \\ X_{\text{кз}} &= 2X_{\text{ВН}} + X_{\text{ф}} + X_{\text{о}} + x l_{\text{кз}}; \\ Z &= R_{\text{кз}} + jX_{\text{кз}}, \end{aligned} \quad (6.25)$$

где $R_{\text{ф}}$ и $X_{\text{ф}}$ — активное и реактивное сопротивление питающего провода, Ом; $R_{\text{о}}$ и $X_{\text{о}}$ — активное и реактивное сопротивление рельсового фидера, Ом; r и x — активное и реактивное сопротивление 1 км тяговой сети, Ом; $R_{\text{кз}}$ и $X_{\text{кз}}$ — активное и реактивное сопротивление цепи короткого замыкания, Ом.

Модуль электрического сопротивления цепи (рис. 6.3) короткого замыкания

$$Z_{\text{кз}} = \sqrt{R_{\text{кз}}^2 + X_{\text{кз}}^2}. \quad (6.26)$$

Комплексная величина тока к.з.

$$I_{\text{кз}} = \frac{U}{Z}. \quad (6.27)$$

Модуль величины тока короткого замыкания

$$I_{\text{кз}} = \frac{U}{Z_{\text{кз}}}. \quad (6.28)$$

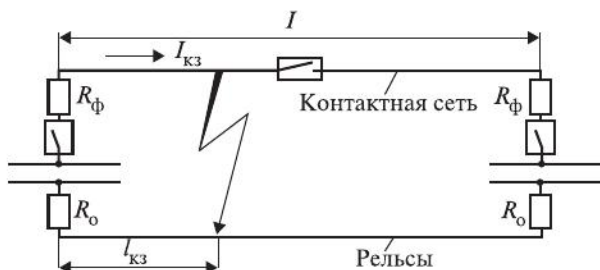


Рис. 6.3. Принципиальная схема цепи короткого замыкания при однопутной или двухпутной линии при параллельном соединении проводов путей (источники электроснабжения, питающие тяговую сеть, не показаны)

Сопровитвления 1 км тяговой сети при различных схемах соединения приведены в зависимости от того, для какого случая ведется расчет тока к.з.: для однопутного участка, для одного пути двухпутного участка с раздельной работой путей или для двухпутного участка с полным параллельным соединением проводов путей. Расстояние $l_{кз}$ отмеряется от той подстанции, для фидера которой рассчитывается ток к.з. Ток в месте короткого замыкания равен сумме токов к.з. от каждой подстанции.

Для расчета тока короткого замыкания при узловой схеме (рис. 6.4) необходимо определить следующие комплексные значения сопротивлений

$$\begin{aligned}
 Z_{A1} &= Z_{\phi A1} + (z_1 - z_{12})l_c; \\
 Z_{Cк2} &= (z_1 - z_{12})(l_c - l_{кз}); \\
 Z_{Ak} &= Z_{\phi A2} + (z_1 - z_{12})l_{кз}; \\
 Z_1 &= Z_{A0} + Z_{\phi A2} + (z_1 + z_{pэ2})l_{кз}; \\
 Z_2 &= 0,5(Z_{\phi B1} + Z_{\phi B2}) + Z_{B0} + z(l - l_c) + (z_1 + z_{pэ2})(l_c - l_{кз}); \\
 Z_3 &= Z_{A0} + (z_{pэ2} + z_{12})l_{кз}; \\
 Z_4 &= 0,5(Z_{\phi B1} + Z_{\phi B2}) + Z_{B0} + z(l - l_c) + (z_{pэ2} + z_{12})(l_c - l_{кз}),
 \end{aligned} \tag{6.29}$$

где $l_{кз}$ и l_c — расстояния от подстанции A до места короткого замыкания и поста секционирования соответственно, км; z_1 — комплексное значение сопротивления 1 км тяговой сети одного пути, Ом/км; z — то же тяговой сети двух путей, Ом/км; $z_{pэ2}$ — результирующее комплексное сопротивление рельсов двух путей, Ом/км; $z_{1,2}$ — сопротивление взаимной индукции 1 км тяговых

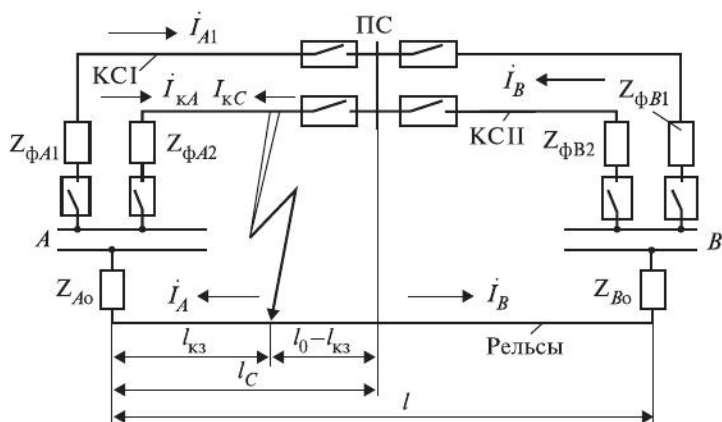


Рис. 6.4. Принципиальная схема замещения цепи тока к.з. в тяговой сети при узловой схеме с постом секционирования (A и B шины тяговых подстанций, КС I и КС II — контактная сеть путей I и II)

сетей первого и второго путей, Ом/км; $Z_{\phi A1}$ и $Z_{\phi A2}$ — комплексное сопротивление фидерных линий подстанции A , питающих контактную сеть первого и второго путей, Ом; $Z_{\phi B1}$ и $Z_{\phi B2}$ — то же подстанции B , Ом; Z_{Ao} и Z_{Bo} — комплексное сопротивление рельсовых фидерных линий подстанций A и B , Ом.

Токи короткого замыкания подстанции A и поста секционирования ПС могут быть определены из соотношений:

$$\begin{aligned} i_{кА} &= \frac{Z_{A1}Z_2 + Z_{CK2}(Z_3 + Z_4)}{Z_{A1}Z_1Z_2 + Z_{AK}Z_2Z_3 + Z_{CK2}Z_1Z_4} U_{к}; \\ i_{кС} &= \frac{Z_{A1}Z_1 + Z_{AK}(Z_3 + Z_4)}{Z_{A1}Z_1Z_2 + Z_{AK}Z_2Z_3 + Z_{CK2}Z_1Z_4} U_{к}. \end{aligned} \quad (6.30)$$

При отключенном выключателе поста секционирования и консольном питании места короткого замыкания от подстанции:

$$i_{кА} = \frac{Z_{A1} + Z_3 + Z_4 + z_{12}l_{кз}}{Z_1(Z_{A1} + Z_3 + Z_4 + z_{1,2}l_{кз}) + Z_3^2} U_{к}. \quad (6.31)$$

При отключенном выключателе подстанции и консольном питании места короткого замыкания от поста секционирования:

$$i_{кС} = \frac{Z_{A1} + Z_3 + Z_4}{Z_{A1}Z_2 + Z_2Z_3 + Z_{CK2}Z_4} U_{к}. \quad (6.32)$$

6.3. Расчет сложных протяженных неоднородных заземляющих устройств методом цепных схем

Особенностью тяговых сетей магистральных железных дорог является наличие разветвленных неоднородных протяженных рельсовых сетей и протяженных заземляющих устройств в виде группового заземления опор контактной сети, экранирующих устройств контактной сети и т.п.

Общие положения. Расчет протяженных ЗУ является решением достаточно сложной задачи, в том числе при допущении об однородности основных электрических элементов, составляющих принятые расчетные схемы замещения. Практика измерений показывает, что основные электрические элементы протяженных ЗУ имеют неоднородную структуру, поэтому представляет большой интерес решение задач, в частности задач электробезопасности, при применении неоднородных протяженных защитных ЗУ.

Применение модели-аналога для исследования протяженных неоднородных ЗУ — достаточно трудоемкий метод и применим для решения специфических задач. При современном уровне вычислительной техники представляет интерес построение математических моделей для решения задачи определения электрических характеристик и характеристик электробезопасности протяженных ЗУ с различного рода неоднородностями электрических характеристик с помощью численных методов.

Поставленная задача является одной из интересных и сложных для тяговых сетей электрифицированного транспорта 25 кВ переменного тока, в которых используются рельсы в качестве фазного провода, защитные и рабочие и другие протяженные ЗУ (системы «трос—опоры контактной сети», «заземлитель—опоры КС», протяженные кабели с металлической оболочкой и другие металлические коммуникации).

Задачей расчета при оценке условий безопасности электрических систем в этом случае является определение следующих величин и характеристик: распределение токов в участках схем, величина тока к.з., величины напряжений между отдельными элементами и элементами электрической цепи и землей. Здесь и далее под напряжением на элементах цепной схемы понимается разность потенциалов между электрическим элементом цепной схемы и нуле-

вым потенциалом удаленной земли, в противном случае дается характеристика разности потенциалов.

Традиционные методы расчета однородных протяженных заземляющих электродов и ЗУ достаточно глубоко разработаны, однако расчету протяженных заземляющих устройств с различного вида неоднородностями посвящено достаточно узкое число работ (Р.Н. Карякин, А.Б. Косарев, Б.И. Косарев, Г.С. Кузнецова, В.Н. Пупынин и др.).

Для исследования электрических процессов при коротком замыкании на заземляющее устройство в тяговых сетях (или на конструкцию электрически соединенную с ЗУ) и для оценки опасности возникающих напряжений прикосновения для персонала, сопровождающих процесс протекания токов по этим элементам, необходимо уметь определять величины токов и напряжений на отдельных участках электрической цепи.

Токи к.з. в тяговых сетях переменного и постоянного тока за счет индуктивного влияния на смежные сооружения и линии могут привести к недопустимым повышением напряжения на элементах этих сооружений.

В работах автора рассмотрена ситуация, когда электрическая схема представляет собой питающую систему прямого электроснабжения в виде электрических линий и систему обратного электроснабжения в виде рельсов, тросовых или протяженных заземляющих устройств, расположенных параллельно на всем протяжении питающего провода (рис. 6.5).

Протяженное ЗУ в общем случае может представлять собой систему «трос—опоры» и собственно протяженный горизонтальный заземляющий электрод, уложенный в земле. В последнем случае существенно снижается взаимоиндуктивное влияние на протяженный заземлитель системы прямого электроснабжения из-за экранирующих свойств проводящего пространства земли. Такая линия может быть заменена системой последовательно включенных симметричных четырехполюсников, которую в теории электрических цепей принято называть цепной схемой или цепной линией.

Задача состоит в определении токов и напряжений в отдельных элементах цепной схемы системы «провод—рельс» или «провод—протяженное заземляющее устройство». При этом нужно учитывать соотношения токов цепной линии, составленной из дискрет-

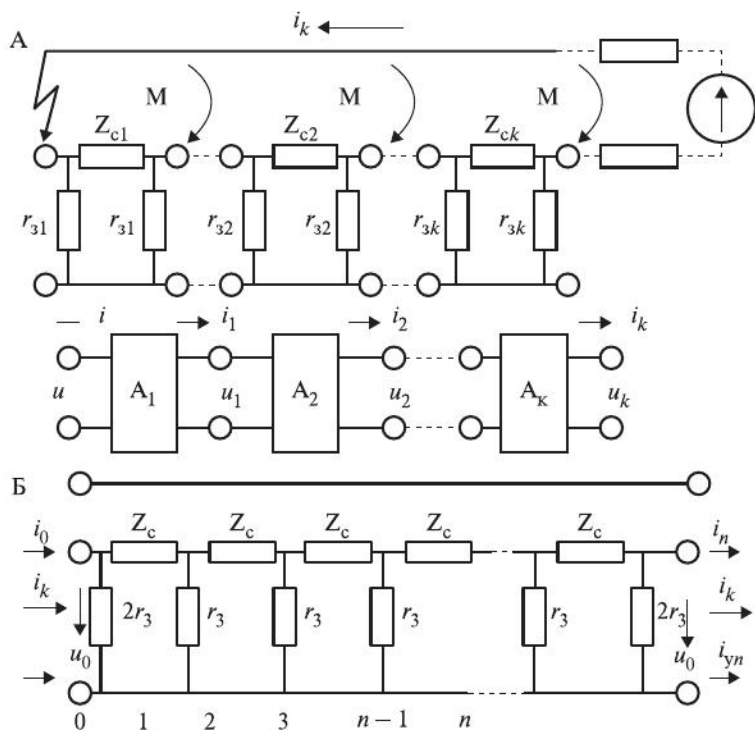


Рис. 6.5. Принципиальные электрические схемы неоднородной (А) и однородной (Б) цепных линий

ных n элементов цепной схемы, на которые разбита линия, в ее начале и конце:

$$i_{y0} = i_k - i_0, \quad i_{yn} = i_k - i_n,$$

которые будут учитываться при дальнейшем рассмотрении задачи.

В рассматриваемой модели расчета принято ряд допущений:

- система тяговой сети представляется с заданным током к.з. Для этой цели ток к.з. может быть определен расчетом (см. далее п. 6.6) без учета соотношений, определяющих распределение тока по отдельным участкам;
- электрические сопротивления локального участка цепной схемы (например, участка, равного длине пролета электрической линии или n пролетов линии) заменяются сосредоточенными сопротивлениями. Электрические сопротивления отдельного расчетно-

го участка принимаются однородными или равными между собой и поэтому четырехполюсники системы «провод—рельс—протяженное заземляющее устройство» можно принимать в качестве неоднородной цепной схемы с однородными элементами. Характеристическая матрица эквивалентного четырехполюсника, состоящего из K четырехполюсников, соединенных в цепную схему, равна произведению характеристических матриц каждого из составляющих четырехполюсников;

– использование теории четырехполюсников для расчета высоковольтных электрических сетей и силовых рельсовых сетей известно при решении других задач, здесь развиваются эти исследования для создания обобщенного метода решения задач электробезопасности в тяговых сетях переменного тока.

На рис. 6.6 приведена схема замещения участка системы «провод—рельс—протяженное заземляющее устройство». Для наглядности питающий провод условно расщеплен на два параллельных провода.

Ток в любой точке цепной схемы (от 1 до n) в земле определяется соотношением

$$i_{yn} = i_k - i_{zn} - i_{pn}. \quad (6.33)$$

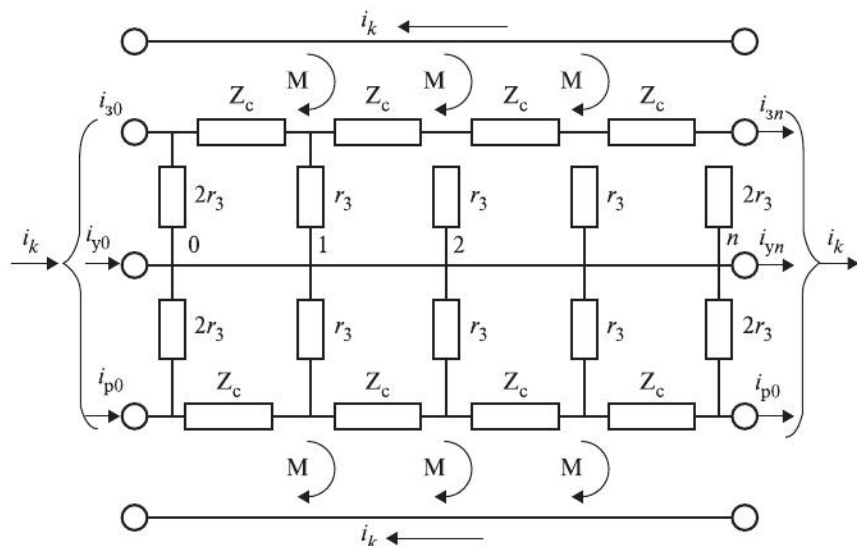


Рис. 6.6. Схема замещения системы «провод—рельс—протяженный заземлитель» на значительном удалении от источника напряжения

На основе теории цепных схем для протяженного заземлителя (система «трос—опоры») и рельсов, проложенных параллельно друг другу, можно написать

$$\begin{aligned}
 u_{nz} &= u_{0z} \operatorname{chng}_3 + Z_3 (i_{y0} - K_1 i_k) \operatorname{shng}_3, \\
 (i_{yn} - K_1 i_k) &= \frac{u_{0z}}{Z_3} \operatorname{shng}_3 + (i_{y0} - K_1 i_k) \operatorname{chng}_3, \\
 u_{np} &= u_{0p} \operatorname{chng}_p + Z_{pc} (i_{y0} - K_2 i_k) \operatorname{shng}_p, \\
 (i_{yn} - K_2 i_k) &= \frac{u_{0p}}{Z_{pc}} \operatorname{shng}_p + (i_{y0} - K_2 i_k) \operatorname{chng}_p,
 \end{aligned} \tag{6.34}$$

где u_{0z} , u_{0p} — напряжение на входе цепных схем заземлителя и рельса, В; u_{nz} , u_{np} — напряжение на выходе n -го четырехполюсника, В; i_{y0} , i_{yn} — ток в земле на входе и выходе цепной схемы, А; i_k — ток в контактной сети, А; Z_3 , Z_{pc} и g_3 , g_p — характеристические сопротивления и постоянные передачи четырехполюсников цепной схемы для протяженного ЗУ и рельсов соответственно, Ом; K_1 , K_2 — коэффициенты связи контактной сети соответственно с протяженным заземляющим устройством и рельсами.

Входящие в уравнения (6.34) величины характеристических сопротивлений Z , характеристических постоянных g и коэффициентов связи K определяются параметрами четырехполюсников, показанными на рис. 6.6, с помощью соотношений:

$$Z_3 = 2r_3 \sqrt{\frac{Z_c}{Z_c + 4r_3}}, \quad Z_{pc} = 2r_{II} \sqrt{\frac{Z_p}{Z_p + 4r_{II}}}, \tag{6.35}$$

$$g_3 = \operatorname{arch} \left(1 + \frac{Z_c}{2r_3} \right), \quad g_p = \operatorname{arch} \left(1 + \frac{Z_p}{2r_3} \right), \tag{6.36}$$

$$K_1 = 1 - \frac{Z_{зк}}{Z_c}, \quad K_2 = 1 - \frac{Z_{рк}}{Z_p}, \tag{6.37}$$

где r_3 , r_{II} — переходные сопротивления единицы длины сооружения «заземляющее устройство—грунт» и «рельс—земля (грунт)» соответственно; Z_c , Z_p — продольные сопротивления единицы длины заземляющего устройства и рельсовой линии соответственно; $Z_{зк}$, $Z_{рк}$ — сопротивления взаимной индукции контуров «контактная сеть—земля» и «заземляющее устройство—грунт», «контактная сеть—земля» и «рельсы—земля (грунт)» соответственно, $Z_{зк} = j\omega M_{зк}$, $Z_{рк} = j\omega M_{рк}$.

Напряжения u_0 и u_n представляют собой разность потенциалов между заземляющим устройством и нулевым потенциалом земли или между рельсом и нулевым потенциалом земли.

Токи i_{zn} и i_{pn} протекают по металлической части заземляющего устройства и рельсам, а токи i_{yn} протекают по земле на n -м участке цепной схемы.

Для каждого такого n -ного участка цепи на основании первого закона Кирхгофа справедливо соотношение (6.33).

Для дальнейшего решения задачи определения величин опасных напряжений и токов в рассматриваемых элементах тяговой сети необходимо пользоваться соотношениями (6.34) с учетом граничных условий на концах четырехполюсников и величин конкретных параметров каждого из них. Для любых возможных случаев короткого замыкания получается система уравнений, из которой устанавливаются искомые величины.

Для упрощения конечных соотношений целесообразно ввести следующие обозначения:

$$\alpha_z = \frac{Z_z}{2r_z}, \quad \alpha_p = \frac{Z_{pc}}{2r_n}; \quad (6.38)$$

$$\beta_z = \frac{1 - \alpha_z}{2}, \quad \beta_p = \frac{1 - \alpha_p}{2}. \quad (6.39)$$

При определении отдельных параметров цепи тока тяговой сети целесообразно различать ряд наиболее общих режимов из-за специфики схемы протекания тока существенно видоизменяющих расчетные схемы и соответствующие им соотношения и искомые величины:

- замыкание тяговой сети на контур тяговой подстанции переменного тока с подключенными к нему в различных сочетаниях рельсами и протяженными заземляющими устройствами;
- замыкание тяговой сети на рельс или протяженное ЗУ на значительном удалении от питающей подстанции;
- замыкание тяговой сети на рельс или протяженное ЗУ вблизи подстанции.

Если к заземляющему устройству ТП присоединены цепные схемы, то по сопротивлению ЗУ ТП R_z протекает только часть тока, а другая часть — по присоединенным цепным линиям. В этом случае суммарное входное сопротивление будет включать сопротивления растеканию ЗУ и сопротивления цепных схем и в общем слу-

чае будет являться комплексной величиной, т.е. будет содержать индуктивную составляющую:

$$u_3 = Z_3 i_k, \quad (6.40)$$

где Z_3 — суммарное входное сопротивление заземляющего устройства с присоединенными цепными схемами.

Для подстанции с сопротивлением растеканию заземляющего устройства R_3 , к которому присоединено N цепных схем с характеристическими сопротивлениями четырехполюсников Z_j и переходными сопротивлениями «линия—земля» r_j , коэффициенты токораспределения между заземляющим устройством и отходящими линиями можно выразить из соотношений их проводимостей:

$$\alpha_{ni} = \frac{\frac{1}{R_3}}{\frac{1}{R_3} + \sum_{j=1}^N \left(\frac{1}{Z_j} - \frac{1}{2r_j} \right)}, \quad \beta_{ni} = \frac{\frac{1}{Z_i} - \frac{1}{2r_j}}{\frac{1}{R_3} + \sum_{j=1}^N \left(\frac{1}{Z_j} - \frac{1}{2r_j} \right)}. \quad (6.41)$$

Рассмотрим далее специфические схемы протекания тока в тяговой сети переменного тока.

Замыкание тяговой сети на контур тяговой подстанции переменного тока. Принципиальная электрическая схема поставленной задачи приведена на рис. 6.7. Частными случаями этой схе-

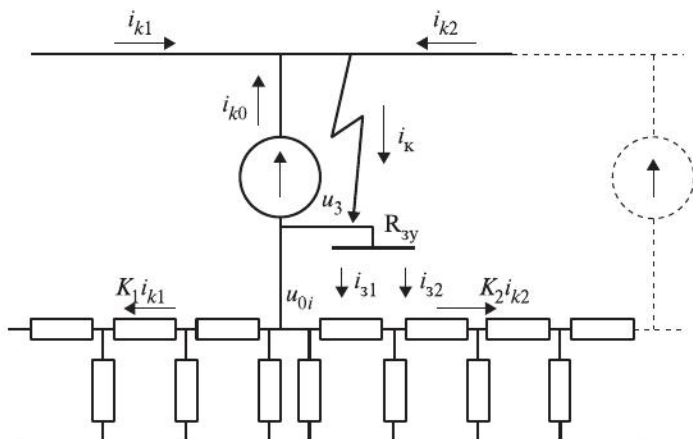


Рис. 6.7. Принципиальная схема электрической цепи тока к.з. на заземляющее устройство подстанции, к которой подключены две цепные схемы

мы будут: схемы при однофазном питании линии справа и слева от соседних подстанций для однопутного участка (пунктир на рисунке), при однофазном питании справа от соседней подстанции для двухпутного участка и при одностороннем питании однопутного участка.

Принимаем, что величина тока к.з. на землю находится известными методами (см. п. 6.2).

Задача состоит в определении токораспределения между ЗУ и линиями с несовершенной изоляцией по отношению к земле или с линиями с утечкой тока в землю (рельсы, тросовые заземляющие объединения опор, протяженный заземлитель) в месте повреждения и расчете на этой основе напряжений на участках этих линий.

Напряжение в месте повреждения определяется током к.з., который представляет собой сумму токов заземленной фазы, токов ЗУ и цепных схем и может быть выражен соотношением

$$i_k = \sum_{j=1}^N K_j i_{kj},$$

или, если считать все ответвления подключенными к одной точке с учетом направлений векторов тока, а параметр K равным для всех цепных схем, то ток, протекающий по земле и цепным схемам, можно определить из соотношения

$$i_{кз} = K i_k - i_{к0}, \quad (6.42)$$

где i_k — полный ток в месте повреждения, $i_{к0}$ — доля тока в заземленной фазе трансформатора.

На основе свойств цепных схем токи в переходных сопротивлениях могут быть получены из соотношения

$$i_{пс} = \frac{R_3 \alpha_{пс}}{r_j} i_{кз} \exp(-ng_j). \quad (6.43)$$

Ток в металлической части протяженного заземляющего устройства (в рельсах) i_{3j} и ток в земле i_{yj} в отходящих от подстанции линиях в виде цепных схем j могут быть получены из соотношений:

$$\begin{aligned} i_{3j} &= (1 - K_j) i_{kj} + \beta_{nj} i_{кз} \exp(-ng_j), \\ i_{yj} &= K_j i_{kj} - \beta_{nj} i_{кз} \exp(-ng_j). \end{aligned} \quad (6.44)$$

Входное сопротивление в месте замыкания с учетом влияния подключенных цепных линий может быть оценено с помощью

коэффициента токораспределения $\alpha_{\text{пс}}$, полученного из соотношения (6.41),

$$Z_{\text{вх}} = R_3 \alpha_{\text{пс}}. \quad (6.45)$$

Напряжение на ЗУ подстанции может быть найдено в общем случае при подключенных к нему отличных по параметрам линий с несовершенной изоляцией (линиях с утечкой тока) из соотношения

$$u_3 = Z_{\text{вх}} i_{\text{к}} = R_3 \alpha_{\text{пс}} \sum_{j=1}^N K_j i_j. \quad (6.46)$$

Решая уравнения (6.34) и (6.38) с учетом граничных условий, можно найти напряжение в n -й точке любой цепной схемы и токи в протяженном заземляющем устройстве и земле:

$$\begin{aligned} u_{nj} &= u_{0j} \operatorname{chng}_j + Z_j (i_{y0j} - K_j i_{\text{кз}}) \operatorname{shng}_j, \\ i_{y0j} &= K_j i_{\text{кз}} - i_{3j}. \end{aligned} \quad (6.47)$$

Принимаем граничные условия (см. рис. 6.7):

$$u_3 = u_{0j} = \sum_{j=1}^N Z_j i_{3j}.$$

Подставляя выражения граничных условий в первое уравнение системы (6.47), найдем напряжение на n -м элементе любой цепной схемы, присоединенной к ЗУ тяговой подстанции:

$$u_{nj} = u_3 \operatorname{chng}_j - u_3 \operatorname{shng}_j = u_3 \exp(-ng_j)$$

или окончательно:

$$u_{nj} = R_3 \alpha_{\text{пс}} \exp(-ng_j) \sum_{j=1}^N K_j i_{kj}. \quad (6.48)$$

Рассмотренная модель позволяет решать задачи с продольной неоднородностью линий с несовершенной изоляцией (с утечкой тока), т.е. линий, у которых каждый элемент n_j цепной схемы имеет свою характеристическую постоянную g_j и характеристическое сопротивление Z_j , определяемые продольными сопротивлениями Z и поперечными $r_{\text{п}}$.

Действительно, если заменить линию последовательной схемой из n цепных схем, моделирующих продольную неоднородность линии, то напряжения на концах последовательности цепных схем можно выразить соотношениями

$$u_{0j} = u_3 \exp(-0g_{j0}), \quad u_{1j} = u_{0j} \exp(-1g_{j1}), \quad u_{2j} = u_{1j} \exp(-2g_{j2}), \quad \dots, \\ u_{nj} = u_{(n-1)j} \exp(-ng_{jn}).$$

Делая подстановку предыдущих значений напряжения в последующие значения, найдем для одной линии

$$u_{nj} = u_3 \exp\left[-ng_{jn} - (n-1)g_{j(n-1)} - \dots - 1g_{j1}\right] = u_3 \exp\left(-\sum_{i=1}^n ig_{ji}\right).$$

Откуда, в общем случае для N линий и n (в общем случае возможно и неоднородных) элементов цепной схемы, с учетом предыдущего соотношения

$$u_{nj} = R_3 \alpha_{\text{пс}} \exp\left(\sum_{i=1}^n ig_{ji}\right) \sum_{j=1}^N K_j i_{kj}, \quad (6.49)$$

где j — номер линии (цепной схемы); i — номер ячейки цепной схемы.

Замыкание тяговой сети на рельс или протяженное ЗУ вблизи подстанции. Принципиальная электрическая схема замыкания на землю в общем виде для разветвленной системы из K линий одной из фаз приведена на рис. 6.8.

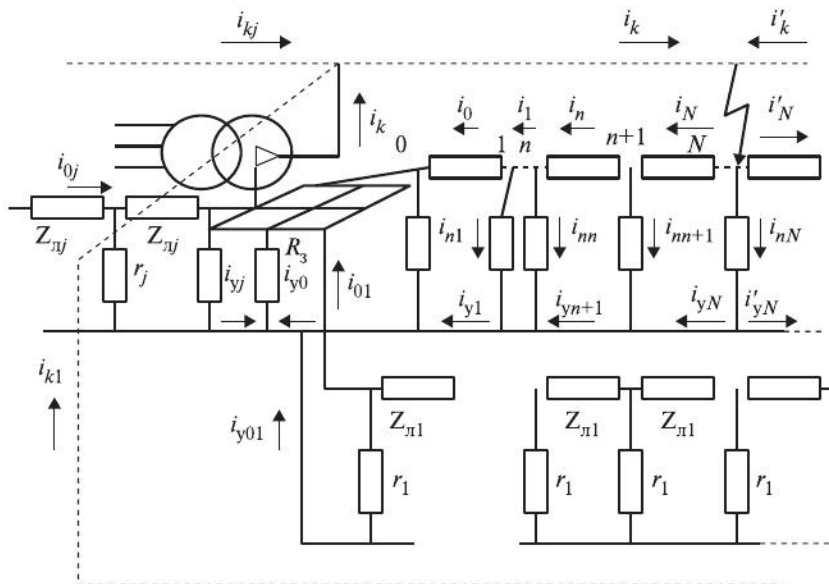


Рис. 6.8. Элементы цепной схемы при замыкании на землю вблизи подстанции

Так же как и в предыдущем случае, различные схемы электропитания однофазного или однополюсного питания электрической тяги будут частными случаями этой схемы. Выбранные направления переменных токов на рисунках показаны для их мгновенных значений. Величины токов к.з. принимаем заданными и найденными известными методами.

Задача состоит в определении токораспределения между 3У тяговой подстанции и другими линиями, связанными с землей, и расчета на этой основе напряжений на отдельных элементах линий и устройств.

Суммарный ток, протекающий через заземляющие устройства ТП и линии, связанные с землей, можно определить из соотношения

$$i_{кз} = Ki_k - \sum_{j=1}^{N-1} K_j i_{kj}. \quad (6.50)$$

Разница в знаках значений тока определяется их принятым направлением согласно первому закону Кирхгофа, применимого к точке питания линий.

Рассматривая аналогично точку замыкания, найдем полный ток в земле:

$$i_{кN} = K(i_k + i'_k) = Ki_{кзN}, \quad (6.51)$$

где i_k, i'_k — токи замыкания в поврежденной линии; K — коэффициент связи поврежденной линии и цепной схемы; $i_{кзN}$ — полный ток к. з. в точке N ; $i_{кN}$ — полный ток в земле при коротком замыкании в точке N .

Решая системы уравнений для определения напряжения на заземляющем устройстве тяговой подстанции аналогично (6.45), (6.46), найдем выражение

$$u_3 = R_3 \alpha_{пс} (i_{кз} - Ci_{кN}), \quad (6.52)$$

где $C = \exp(-Ng)$ — учитывает удаление места повреждения от подстанции, а N означает число элементарных четырехполюсников цепной схемы замещения от подстанции до места замыкания и в частном случае для системы «трос—опоры» может означать число опор до места повреждения; $i_{кз}$ — ток заземляющего устройства из (6.50).

Напряжения и токи в элементах цепных схем могут быть найдены в соответствии с уравнениями (6.34) цепных схем.

Напряжение между точкой n цепной схемы (с повреждением в точке N) и нулевым потенциалом земли можно определить из соотношения

$$u_n = R_3 \alpha_{пс} (i_{кз} - Ci_{кN}) \exp(-ng) - CZ_i \text{sh}ng.$$

Ток через сопротивление элемента цепной схемы (например, заземление опоры)

$$i_{\text{пн}} = R_3 \alpha_{\text{пс}} \frac{1}{r_{\text{п}}} (i_{\text{кз}} - C i_{\text{кN}}) \exp(-ng) - 2C \alpha_{\text{к}} \text{sh}ng.$$

Ток в проводе цепной схемы

$$i_n = (1-K) i_{\text{к}} + [\beta_n i_{\text{кз}} + C(\beta_n + 1) i_{\text{кN}}] \exp(-ng) + C(\alpha + 1) i_{\text{кN}} \text{sh}ng,$$

где β_n — коэффициент токораспределения из (6.41).

Ток в земле цепной схемы

$$i_{\text{yn}} = K i_{\text{к}} - [\beta_n i_{\text{кз}} + C(\beta_n + 1) i_{\text{кN}}] \exp(-ng) - C(\alpha + 1) i_{\text{кN}} \text{sh}ng. \quad (6.53)$$

Для неоднородной цепной схемы напряжение на n -м элементе можно по аналогии с (6.49) определить из соотношения

$$u_n = R_3 \alpha_{\text{пс}} (i_{\text{кз}} - C i_{\text{кN}}) \exp\left(-\sum_{i=1}^n i g_{ij}\right) - CZ_n i_{\text{к}} \text{sh} \sum_{i=1}^n i g_{ij}, \quad (6.54)$$

где Z_n — характеристическое сопротивление неоднородной цепной схемы (линии).

Характеристическое сопротивление неоднородной цепной схемы может быть вычислено с учетом характеристических сопротивлений входящих в нее четырехполюсников по формуле

$$Z_n = \frac{\prod_1^n Z_i}{\frac{1}{Z_n} \prod_1^n Z_i + \frac{1}{Z_{n-1}} \prod_1^n Z_i + \dots + \frac{1}{Z_1} \prod_1^n Z_i} \quad \text{или} \quad Z_n = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i}}. \quad (6.55)$$

Замыкание одиночной линии (тяговой сети) на рельс или протяженное ЗУ на значительном удалении от подстанций. На рис. 6.9 представлена соответствующая рассматриваемому случаю принципиальная схема замыкания тяговой сети.

Ряд последующих искомым величин может быть выражен через значение суммарного тока в цепной схеме:

$$i_{\text{ко}} = K(i_k + i'_k),$$

где i_k, i'_k — токи замыкания питающей сети соответственно слева и справа от места замыкания; K — коэффициент связи питающей сети и линии в соответствии с (6.37).

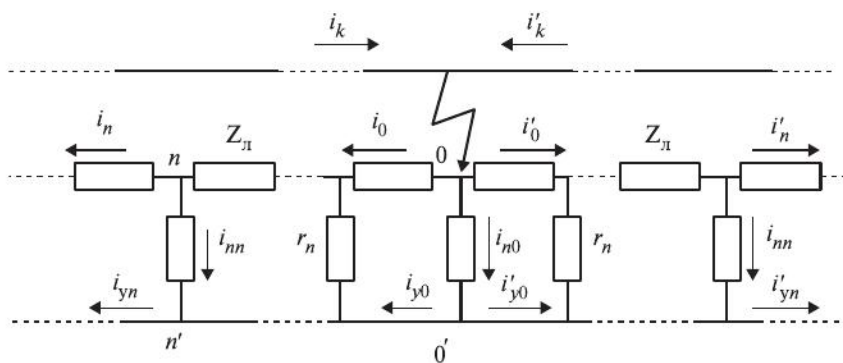


Рис. 6.9. Элементы цепной схемы при замыкании одиночной линии (тяговой сети) на землю на удалении от подстанции

Напряжения на элементах цепной схемы могут быть выражены из (6.34) с учетом граничных условий:

$$u_n = r_n i_{k0} \exp(-ng) \text{ или } u_n = u_0 \exp(-ng). \quad (6.56)$$

Напряжение на элементах неоднородной цепной схемы может быть выражено соотношением (при условии, что ток справа и слева от точки замыкания распространяется в земле равномерно в обе стороны)

$$u_n = \frac{i_{k0}}{2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i}} \exp\left(-\sum_{i=1}^n ig_i\right). \quad (6.57)$$

Из соотношения (6.56) легко можно получить ток через переходное сопротивление n -го элемента цепной схемы:

$$i_{nn} = \alpha i_{k0} \exp(-ng). \quad (6.58)$$

Для цепной схемы в данном случае справедливы соотношения

$$\begin{aligned} i_{yn} &= i_k - i_n - i_{jn}, & i_n &= -Ki_k + i_{yn}, \\ i_{y0} &= i_k - i_0 - i_{j0}, & i_0 &= -Ki_k + i_{y0}. \end{aligned}$$

Легко показать, что для точки 0 справедливы соотношения:

$$i_{y0} = \frac{\alpha i_{k0}}{2}, \quad i_0 = \beta i_{k0}.$$

Используя эти соотношения и граничные условия, из (6.34, 6.44) найдем

$$i_n = -i_o \exp(-ng),$$

откуда
$$i_{yn} = K i_k - \beta i_{ko} \exp(-ng), \quad (6.59)$$

$$i_n = i_k - i_{yn} = (1 - K) i_k + i_{ko} \exp(-ng). \quad (6.60)$$

Представляет интерес рассмотрение других случаев замыкания питающего провода на ЗУ или на протяженное заземляющее устройство, которые по физике явлений примыкают к рассмотренному случаю, частичные напряжения и токи для которого определены соотношениями (6.57)—(6.60).

Таковыми случаями могут быть замыкания на ПС или ППС тяговой сети, когда короткое замыкание на землю происходит на элементе цепной схемы, удаленном от обеих подстанций, но при этом рядом (параллельно на большом протяжении) расположены другие протяженные заземляющие устройства. Они могут моделироваться цепными схемами, электрически связанными с ЗУ источника питания только через землю и не подверженными магнитному влиянию от питающей линии.

Указанный случай представлен моделирующей цепной схемой на рис. 6.10. Для этой цепной схемы справедливы соотношения, характеризующие граничные условия для точки n и точки O :

$$\begin{aligned} i_{yn} &= K_1 i_k - i_n - i_{jn}, \quad i_{jn} = i_k - i_n - i_{yn}, \\ i_{yo} &= K_1 i_k - i_o - i_{jo}, \quad i_{jo} = i_k - i_o - i_{yo}. \end{aligned}$$

Решая уравнение (6.34) для данных граничных условий, получим соотношения

$$i_n = i_o \exp(-ng_j), \quad i_{jn} = i_{jo} \exp(-ng_j). \quad (6.61)$$

Определенный интерес представляет распределение токов и напряжений в расположенном параллельно электрической линии протяженном заземляющем устройстве или протяженном подземном сооружении без учета электромагнитного влияния на него этой линии. Иногда распределение напряжений и токов в подверженном влиянию сооружении в этих условиях называют гальваническим влиянием.

При этом исходим из допущения, что токораспределение в подверженных влиянию линиях в виде цепных схем не влияет на токораспределение в цепной схеме, в которой протекает ток замыкания электрической линии.

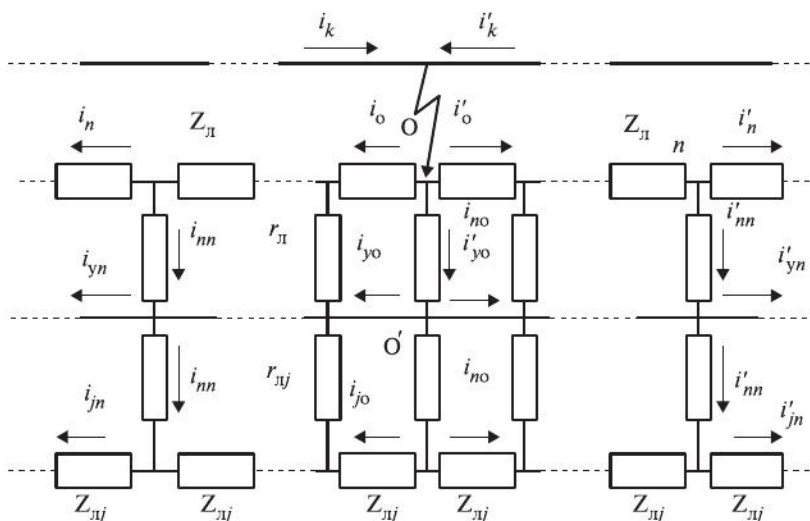


Рис. 6.10. Цепная схема при удаленном замыкании линии на протяженное заземляющее устройство при наличии другого протяженного заземляющего устройства

Исходя из уравнений системы (6.34), условных обозначений рис. 6.10, по аналогии с предыдущими соотношениями, найдем:

$$u_n = i_{no} r_{nj} \alpha_j \exp(-ng_j), \quad (6.62)$$

где значения со штрихом и индекс j на рисунке относятся к j -й линии, подверженной влиянию.

Рассматривая токораспределение в точке O' , найдем

$$i_{no} = i_{yo} + i'_{yo} + i_{no}.$$

Рассматривая электрическую цепь от точки O' до источника тока (см. также рис. 6.7) найдем, что токи i_y и i_{no} будут распределяться справа и слева от точки O' пропорционально проводимостям электрических цепей:

$$i_y = \alpha_{nc} i_{no}, \quad i_{no} = \beta_{nj} i_{no}.$$

Учитывая эти соотношения, а также (6.60)—(6.62), найдем токораспределение и значения напряжений на элементах подверженной влиянию цепной схемы j .

Напряжение на n -м элементе цепной схемы

$$u_n = \alpha_j \alpha \beta_{nj} i_{ko} r_{nj} \exp(-ng_j). \quad (6.63)$$

Ток через переходное сопротивление n -го элемента цепной схемы можно выразить соотношением

$$i_{nn} = \alpha_j \alpha_{\beta_{nj}} i_{k0} \exp(-ng_j). \quad (6.64)$$

Продольный ток в подверженной влиянию цепной схеме j на элементе схемы n можно выразить из соотношений

$$\begin{aligned} i_{jn} &= [i_k(1 - K_1 - K_2) - \alpha i_{k0}] \exp(-ng_j) \\ \text{или } i_{jn} &= \left(\frac{1 - K_1 - K_2}{2} - \alpha \right) i_{k0} \exp(-ng_j). \end{aligned} \quad (6.65)$$

Ток в земле в подверженной влиянию цепной схеме j на элементе схемы n :

$$i_{yn} = i_{k0} \left[\left(\frac{K_1}{2} - \exp(-ng_1) \right) + \left(\frac{1 - K_1 - K_2}{2} - \alpha \right) \exp(-ng_j) \right].$$

Ток в земле при наличии L цепных схем и замыкании на схему 1:

$$i_{yn}^L = i_{k0} \left[\left(\frac{K_1}{2} - \exp(-ng_1) \right) + \sum_{j=2}^L \left(\frac{1 - K_1 - K_j + m}{2} - \alpha \right) \exp(-ng_j) \right], \quad (6.66)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

Ток в земле при тех же условиях, но при неоднородной цепной схеме 1, оценивается соотношением

$$i_{yn}^L = i_{k0} \left[\left(\frac{K_1}{2} - \exp\left(-\sum_{i=1}^n ig_{1i}\right) \right) + \sum_{j=2}^L \left(\frac{1 - K_1 - K_j + m}{2} - \alpha \right) \exp\left(-\sum_{i=1}^n ig_{ji}\right) \right],$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

Замыкание на элементе цепной схемы при предыдущих условиях, но при наличии магнитного влияния фазной (питающей) линии на расположенные в зоне к.з. другие протяженные ЗУ (система «трос—опоры», «рельсы—земля» и т.п.). Для рассматриваемого случая схема представлена на рис. 6.11.

В этом случае в качестве граничных условий могут быть приняты следующие соотношения:

$$\begin{aligned} i_{yn} &= (K_1 - K_j) i_k - i_n - i_{jn}, \\ i_{y0} &= (K_1 - K_j) i_k - i_0 - i_{j0}, \\ i_{k0} &= (K_1 - K_j) (i_k + i'_k). \end{aligned}$$

Здесь, как и в предыдущих соотношениях, предполагаются действия с комплексными числами, в качестве которых могут быть значения электрических сопротивлений, токов и напряжений, а также значения коэффициентов. Подставляя полученные соотношения в систему (6.67), получим значения токов в любом участке цепной схемы замещения электрической цепи:

$$i_n = \left(K_{1k} i_k - \beta_{nj} K_{1k} i_k \frac{Z_1 + Z_j}{2(r_1 + Z_j)} - \alpha_{nc} K_{1k} i_k \frac{Z_1 + Z_j}{r_1 + Z_j} \right) \exp(-ng_1),$$

$$i_{jn} = \left(-K_{1k} i_k + \beta_{nj} K_{1k} i_k \frac{Z_1 + Z_j}{2(r_1 + Z_j)} \right) \exp(-ng_j).$$
(6.68)

Применение метода цепных схем позволяет учитывать продольные (линии с различными g_j) и поперечные неоднородности (в пределах одного элемента цепной схемы, в котором выбираются параметры моделирующей электрическую линию четырехполюсника с однородными параметрами). Применение метода позволяет с достаточно большой точностью оценить напряжения и токи на элементах схемы, по которой протекает ток однофазной тяговой нагрузки или короткого замыкания, а также напряжения и токи, возникающие в смежных линиях.

6.4. Порядок расчета параметров электробезопасности технических средств защиты в устройствах электроснабжения железных дорог методом цепных схем

Применение метода цепных схем для расчета напряжений прикосновения в аварийных режимах замыкания линий устройств электроснабжения железных дорог на РЛ и протяженные ЗУ позволяет:

- учитывать продольную неоднородность линии (различные величины Z_n);
- учитывать поперечную неоднородность линий с утечкой тока (РЛ, протяженные заземлители, тросовые групповые заземляющие объединения опор контактной сети);
- оценивать напряжения и токи в элементах заземляющих устройств и смежных линиях, по которым протекает ток замыкания.

Различные граничные условия требуют решения задач для трех возможных вынужденных режимов работы электрических схем: за-

мыкание питающей линии непосредственно на подстанции, вблизи подстанции и вдали от обеих подстанций.

При учете неоднородности электрических линий принимается допущение об однородности параметров в пределах одного элемента цепной схемы, при этом распределенные параметры для этого элемента принимаются сосредоточенными. Практически принимая n элементов цепной схемы сколь угодно большим, можно моделировать неоднородные линии реальной длины, задавая реальный разброс значений неоднородных элементов линии (продольного и переходного электрического сопротивления линии).

Метод цепных схем дает возможность рассчитать токи и напряжения на опорах контактной сети, сооружениях и рельсах в системе однофазного переменного тока как при режиме нагрузки, так и при однофазном замыкании на РЛ, что позволяет сделать достаточно строгий расчет, например, задачи распределения тока к.з. по элементам цепи отсоса тяговых подстанций, включающей защитное заземляющее устройство, или определения напряжений прикосновения к РЛ и другим сооружениям контактной сети. Распределение тока ТП по элементам цепи рельсового фидера рассматривалось ранее, где было дано приближенное решение указанной задачи токораспределения в трехэлементной цепи с помощью схемы замещения.

Особенностью конструкции рельсового фидера тяговой сети («цепи отсоса») является использование ЗУ, РЛ подъездного пути, воздушного рельсового фидера и перемычки, расположенной в земле. По этим элементам протекает тяговый ток при расположении тяговой нагрузки, как правило, вдали от подстанции. При коротком замыкании на тяговой подстанции ток к.з. будет протекать по элементам заземляющего фидера, и в зависимости от величины тока через ЗУ i_3 напряжение относительно нулевого потенциала удаленной «земли» можно определить из соотношения

$$U_3 = i_3 R_3.$$

Однако входное сопротивление в точке к.з. на ТП определяется не только сопротивлением ЗУ, но и подключенными к нему отдельными цепными линиями (рельсовый фидер, РЛ подъездных путей, линия «трос—опоры», перемычка). Ток разветвляется по параллельным путям и через ЗУ протекает только часть тока к.з. (см. расчет напряжения на ЗУ тяговой подстанции в гл. 4).

Метод цепных схем позволяет рассчитать напряжение на РЛ и на смежном протяженном ЗУ при замыкании контактной сети на РЛ, а также решать обратную задачу — определять напряжение на РЛ при замыкании контактной сети на протяженное ЗУ.

На рис. 6.12 представлены кривые изменения напряжений в двух сопряженных протяженных ЗУ при замыкании тяговой сети на одну из них. В частном случае это могут быть РЛ и протяженное ЗУ в виде тросового объединения опор, протяженная металлическая конструкция, лежащая в земле, и т.п. Приведено распределение напряжений в элементах цепных схем для случая замыкания тяговой сети на протяженное ЗУ вблизи тяговой подстанции.

Напряжения на линии, моделируемой цепной схемой, между точкой n цепной схемы (с повреждением в точке N) и нулевым потенциалом земли можно определить из соотношений (6.46), где $C = \exp(-Ng_0)$, а g_0 — характеристическая постоянная линии.

Из полученных соотношений могут быть сделаны следующие выводы, важные для расчета напряжения на заземленных элементах подстанции.

Величина напряжения на ЗУ подстанции зависит с одной стороны от соотношения величин токов i_{k3} , протекающего через ЗУ, и i_{kN} , протекающего в месте повреждения, а также постоянной C , характеризующей удаление места повреждения от подстанции. Су-

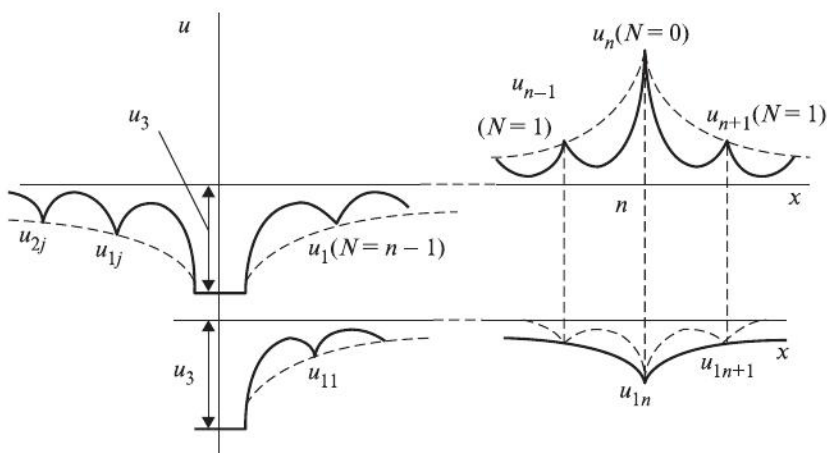


Рис. 6.12. Распределение напряжений в элементах цепных схем при замыкании на землю вблизи тяговой подстанции

существует определенное граничное расстояние, при котором напряжение u_3 принимает максимальное значение.

Пример. Произвести расчет напряжений на заземленных конструкциях однопутной контактной сети переменного тока 25 кВ (опоры № 1—10) при замыкании на групповое заземление металлических опор контактной сети, присоединенного к рельсу согласно рис. 6.13.

Величины сопротивлений растеканию фундаментов металлических опор контактной сети приведены в таблице, переходное сопротивление «рельс—земля» принимается активным и однородным $r_n = 1$ Ом·км, продольное сопротивление однопутной рельсовой линии $z_p = 0,11 + j0,252$, электрическое сопротивление одного пролета ($l_{пр} = 60$ м) троса АС-70 группового заземления опор составляет $z_{гр} = 0,0276 + j0,0264$.

Таблица 6.1

Сопротивление растеканию тока фундаментов опор КС № 1—10

Сопротивление растеканию тока	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9	R_{10}
Значения	5,7	6,4	12,2	14,1	8,9	12,1	20,6	16,8	8,6	7,3

Расчет включает несколько этапов.

Этап 1. Производится расчет тока к.з. в тяговой сети однофазного переменного тока в зависимости от параметров тяговой сети и схемы соединения по соотношениям (6.25, 6.26), приведенных в п. 6.2. Возможны два крайних случая замыкания, показанные на

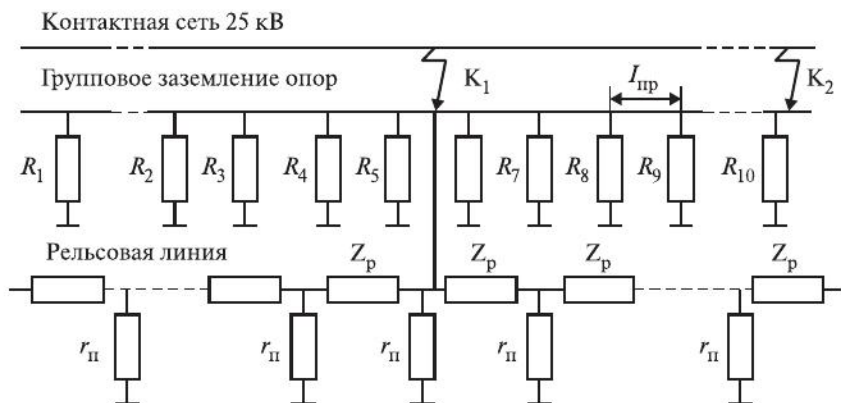


Рис. 6.13. Схема замыкания на групповое заземление опор

рисунке точками K_1 и K_2 в средней и наиболее удаленной точке группового заземления, а также случаи замыкания в промежуточных точках группового заземления опор КС. Рассчитанные модули токов к.з. при замыкании в середине межподстанционной зоны участка с контактной сетью ПБСМ-95 + МФК-100 и рельсах типа Р-65 составили $I_{k1} = 3250$ А, $I_{k2} = 2160$ А.

Этап 2. Строится схема замещения при замене группового заземления опор КС с помощью линии из неоднородных цепных схем, а для рельсовой линии — из однородных. Для случая замыкания K_1 с использованием соотношения (6.57) найдем

$$u_n = \frac{i_{k0}}{2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i}} \exp \left(- \sum_{i=1}^n i g_i \right),$$

где i_{k0} — величина тока к.з. в точке 0 цепной линии замещения, $i_{k0} = I_{k1}$, А; Z_i (в частном случае Z_1 и Z_2) — характеристические сопротивления цепных линий соответственно группового заземления опор и РЛ, Ом; i — номер цепной схемы, начиная от точки 0; g_i — характеристическая постоянная i -й цепной схемы;

$$g_{rpi} = \operatorname{arch} \left(1 + \frac{Z_{rpi}}{2R_i} \right), \quad g_p = \operatorname{arch} \left(1 + \frac{Z_p}{2r_n} \right).$$

Характеристическое сопротивление i -й цепной схемы замещения элемента группового заземления определяется (6.36):

$$Z_{rpi} = 2R_{zi} \sqrt{\frac{Z_{np}}{Z_{np} + 4R_{zi}}}.$$

Характеристическое сопротивление неоднородной линии из однородных цепных схем определяется (6.55):

$$Z_1 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n Z_{rpi}}.$$

Характеристическое сопротивление однородной рельсовой линии можно определить из соотношения (6.35):

$$Z_2 = 2r_n \sqrt{\frac{Z_p}{Z_p + 4r_n}}.$$

Этап 3. Рассчитанные модули значений параметров цепных схем сводятся в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Модули значений параметров цепных схем

Номера и сопротивления опор КС	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9	№ 10
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
$g_{гpi}$	0,0116	0,0109	0,0079	0,00735	0,00925	0,00793	0,00608	0,00673	0,00941	0,0102
g_p	0,518	0,518	0,518	0,518	0,518	0,518	0,518	0,518	0,518	0,518
$Z_{гpi}$	0,466	0,494	0,682	0,736	0,583	0,68	0,887	0,801	0,573	0,528
Z_1	0,115	0,115	0,115	0,115	0,115	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166
Z_2	0,507	0,507	0,507	0,507	0,507	0,507	0,507	0,507	0,507	0,507

Этап 4. Производится расчет напряжений на элементах группового заземления опор контактной сети с помощью соотношения (6.57) с учетом коэффициента токораспределения между четырьмя ответвлениями от точки к.з. в случае короткого замыкания в точке K_1 и тремя ответвлениями в случае замыкания в точке K_2 .

$$u_n = \alpha_{пс} \frac{i_{k0}}{n} \exp\left(-\sum_{i=1}^n ig_i\right),$$

$$2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i}$$

где $\alpha_{пс}$ — коэффициент токораспределения между параллельными линиями.

$$\alpha_{пс} = \frac{\frac{1}{z_{гpj}} - \frac{1}{2R_j}}{\frac{1}{z_{гpj}} - \frac{1}{2R_j} + \sum_{j=1}^N \left(\frac{1}{Z_j} - \frac{1}{2r_j}\right)}$$

Полученные результаты расчетов сводятся в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Данные расчетов модулей значений напряжений на заземленных конструкциях КС

Место замыкания	Напряжение на тресе группового заземления опоры КС, В									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$K_1 (\alpha_{пс})$	0,659	0,659	0,659	0,659	0,659	0,341	0,341	0,341	0,341	0,341
$K_1 (U, B)$	106	149	225	340	618	374	209	138	92,1	66,1
$K_2 (\alpha_{пс})$	0,746	0,746	0,746	0,746	0,746					
$K_2 (U, B)$	79,7	112	169	254	466	549	632	714	796	878

Таким образом, метод расчета протяженных ЗУ с использованием цепных схем позволяет определять напряжения прикосновения на заземленных частях оборудования контактной сети в режиме короткого замыкания на землю. Метод учитывает различного вида неоднородности электрических параметров протяженных ЗУ.

6.5. Разработка модели переходного сопротивления «рельсы—земля»

Исследованию электрического поля в земле от РЛ и других протяженных естественных и искусственных заземляющих устройств (трубопроводов, металлических оболочек кабелей, многократных заземлителей и других металлических конструкций, проложенных в земле) и заземляющих электродов конечной длины (одиночные вертикальные и горизонтальные, железобетонные фундаменты опор и стоек и т.п.) посвящено достаточно большое количество работ. Часть этих работ, примыкающая к проблемам протекания токов в земле и электрической коррозии подземных сооружений, связанная с расчетом распределения потенциалов и токов в РЛ и в протяженных металлических сооружениях, достаточно подробно разработана.

Другая часть проблемы, связанная с изучением вопросов расчета и распределения потенциалов и плотностей тока в окружающей электрические проводники среде, подробно изучается в работах геофизиков при электрическом зондировании проводящих пространств земли с неоднородной электрической проводимостью, а также в работах отечественных ученых, связанных с изучением электрического поля (ЭП) РЛ и ЗУ в окружающем однородном или неоднородном пространстве, и зарубежных ученых — К. Шимони, Ф. Оллендорфа, Л.И. Колле, Е.Д. Зунде и др.

В этих работах задача определения параметров ЭП тока, стекающего с металлических проводников в пространство с меньшей проводимостью, решается, как правило, для проводящей среды изотропной и однородной или изотропной и однородной, но имеющей многослойную структуру.

Решение задач осуществлялось на основании следующих допущений:

- окружающая проводящая среда является безграничной;
- поверхность заземлителя имеет форму поверхности вращения (эллипсоидальной, цилиндрической, сферической) с конечной или бесконечно малой координатой;

— контакт между поверхностью заземлителя и окружающей проводящей средой является идеальным;

— переходный слой «рельсы—грунт» и слоев грунта с различной проводимостью принимается бесконечно тонким.

Интересно, что только допущение о бесконечно тонком слое с меньшей проводимостью позволяет аналитически решить задачу распространения электрического поля РЛ в проводящем пространстве земли. Указанная задача для РЛ без принятого допущения пока не имела точного аналитического решения, как для стационарных, так и для переходных электрических процессов.

При исследовании электробезопасности эксплуатации РЛ и протяженных заземлителей, к которым осуществляется защитное присоединение конструкций железнодорожного транспорта доступных для прикосновения, важно иметь аналитическую модель распространения ЭП в земле. Из модели распространения электрического поля в проводящем пространстве земли может быть получено выражение для переходного сопротивления «рельсы—грунт» и «протяженный заземлитель—грунт», которое является важнейшим показателем расчета электробезопасности устройств электроснабжения с помощью цепных схем (см. п. 6.3, 6.4).

Рассмотрим цилиндрический протяженный заземлитель, расположенный в проводящем однородном пространстве, распространяющийся в обе стороны от нулевой точки начала координат (ρ , Z) в бесконечность. Ток конечной величины I приложен в начале координат, внутренняя часть цилиндрического проводника имеет однородную проводимость γ_i , а окружающее цилиндр пространство — однородную проводимость γ_a (рис. 6.14).

Электрическое поле, определяемое скалярной величиной потенциала ϕ , образуется вокруг протяженного цилиндрического заземляющего электрода симметрично меридианной плоскости.

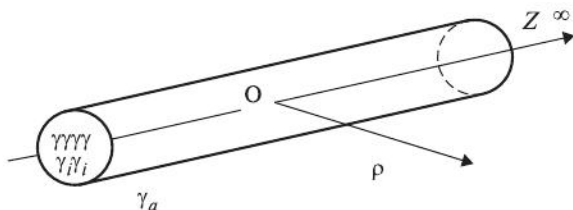


Рис. 6.14. Протяженный цилиндрический заземляющий электрод в цилиндрической системе координат

Уравнение Лапласа для потенциала электрического поля в цилиндрических координатах имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \rho^2} = 0. \quad (6.69)$$

Следует различать потенциалы электрических полей внутри протяженного заземлителя φ_i и внутри проводящего пространства земли φ_a . На границе двух сред потенциалы связаны граничными условиями:

$$\varphi_i = \varphi_a \quad \text{при } \rho = R, \quad (6.70)$$

$$\gamma_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial \rho} = \gamma_a \frac{\partial \varphi_a}{\partial \rho}. \quad (6.71)$$

Потенциалы протяженного цилиндрического заземляющего электрода и проводящего пространства при $\rho \rightarrow \infty$ и $z \rightarrow \infty$ должны стремиться к нулю из свойств потенциальной функции $\varphi \rightarrow 0$.

Общее решение уравнения (6.69) имеет вид

$$\varphi(Z, \rho) = [A \operatorname{ch} \lambda z + A \operatorname{sh} \lambda z] [C J_0(\lambda \rho) + D N_0(\lambda \rho)]. \quad (6.72)$$

Решение содержит постоянную λ . От ее выбора зависит характер распределения потенциальной функции. Неизвестными являются и постоянные A, B, C, D .

Решение уравнения (6.69) можно искать с помощью метода разделения переменных в виде произведения двух потенциальных функций. Одна функция зависит от переменной ρ , а другая от переменной z :

$$\varphi(z, \rho) = \varphi(\rho) \times \varphi(z). \quad (6.73)$$

Подставляя (6.73) в (6.69), найдем

$$\frac{1}{\varphi(\rho)} \frac{d^2 \varphi(\rho)}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho \varphi(\rho)} \frac{d\varphi(\rho)}{d\rho} = - \frac{1}{\varphi(z)} \frac{d^2 \varphi(z)}{dz^2}.$$

Левая часть выражения зависит от координаты ρ , а правая от координаты z . Уравнение будет выполняться, если обе части равенства будут равны одной и той же величине. Выберем в качестве постоянной величины λ^2 , тогда:

$$\frac{1}{\varphi(\rho)} \frac{d^2 \varphi(\rho)}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho \varphi(\rho)} \frac{d\varphi(\rho)}{d\rho} = \lambda^2 \quad \text{и} \quad \frac{1}{\varphi(z)} \frac{d^2 \varphi(z)}{dz^2} = -\lambda^2. \quad (6.74)$$

Первое линейное дифференциальное уравнение второго порядка (6.74) имеет частное решение с учетом характеристического уравнения:

$$\varphi(\rho) = A \exp(-1 - \sqrt{1 + \lambda^2 \rho^2}) + B \exp(-1 + \sqrt{1 + \lambda^2 \rho^2}). \quad (6.75)$$

Второе линейное дифференциальное уравнение второго порядка (6.74) имеет частное решение с учетом характеристического уравнения:

$$\varphi(z) = A_1 \exp(\lambda z) + B_1 \exp(-\lambda z). \quad (6.76)$$

Принимая во внимание граничные условия

$\varphi(z \rightarrow 0) = \varphi$, $\varphi(\rho = R) = \varphi_a = \varphi_i$, $\varphi(z \rightarrow \infty) = 0$, $\varphi(\rho \rightarrow \infty) = 0$ получим:

$$\begin{aligned} \varphi(z) &= \varphi \exp(-\lambda z), \\ \varphi(\rho) &= \varphi_a \exp(\sqrt{1 + \lambda^2 R^2} - \sqrt{1 + \lambda^2 \rho^2}). \end{aligned}$$

Окончательно с учетом (6.73)

$$\varphi(z, \rho) = \varphi \exp(\sqrt{1 + \lambda^2 R^2} - \sqrt{1 + \lambda^2 \rho^2} - \lambda z). \quad (6.77)$$

Для определения постоянной λ рассмотрим изменение потенциальной функции на границе двух сред и при приращении координат на бесконечно малые элементы $\Delta\rho$, Δz . Рассмотрим приращение координат, совпадающих с радиусом и длиной цилиндрического заземляющего электрода конечной длины, соответственно на $\Delta\rho$, Δz (рис. 6.15).

Приращение площади поверхности цилиндра составит $\Delta s = 2\pi\Delta z(\rho + \Delta\rho)$. Примем допущение, что приращение плотности тока в окружающем пространстве будет пропорционально приращению площади протяженного заземлителя и связано с приращением тока соотношениями:

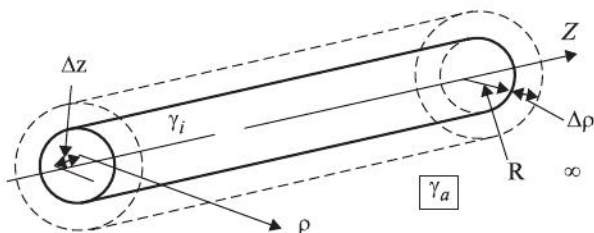


Рис. 6.15. Приращение координат протяженного заземляющего электрода

$$j_{\Delta s} = \frac{\Delta I}{2\pi\Delta z(\rho + \Delta\rho)} \quad \text{и} \quad j_{\Delta z} = \frac{\Delta I}{2\pi\Delta z\rho}.$$

Второе соотношение является линейной плотностью тока, определяемое приращением линейного тока ΔJ :

$$\Delta J = \frac{\Delta I}{\Delta z}, \quad J = \frac{I}{z},$$

с учетом данных обозначений получим

$$j_{\Delta s} = \frac{\Delta J}{2\pi(\rho + \Delta\rho)}, \quad j_{\Delta z} = \frac{\Delta J}{2\pi\rho}.$$

Воспользовавшись для проводящего пространства с удельной электрической проводимостью γ_a законом Ома в дифференциальной форме, получим выражение для напряженности электрического поля в этом пространстве:

$$E_{\Delta s} = \frac{\Delta J}{2\pi(\rho + \Delta\rho)\gamma_a}, \quad E_{\Delta z} = \frac{\Delta J}{2\pi\rho\gamma_a}. \quad (6.78)$$

Принимая во внимание предельное соотношение

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta z} = \frac{dI}{dz} = dJ(z), \quad (6.79)$$

воспользовавшись свойством дифференциала, пренебрегая бесконечно малым значением слагаемого в знаменателе, найдем

$$\lim_{\Delta\rho \rightarrow 0} \Delta E = dE = \frac{dJ(z)}{2\pi\rho\gamma_a} - \frac{dJ(z)}{2\pi(\rho + \Delta\rho)\gamma_a} = dJ(z) \frac{d\rho}{2\pi\gamma_a\rho^2}. \quad (6.80)$$

Окончательно выражение для напряженности электрического поля в проводящем пространстве с проводимостью γ_a определится интегрированием выражения (6.80) по ρ с учетом граничных условий при $\rho \rightarrow \infty$, $E = 0$:

$$E = \frac{d\varphi_a}{dz} = -\frac{dJ(z)}{2\pi\gamma_a\rho}.$$

Потенциальную функцию можно получить, взяв двойной интеграл по координатным осям ρ и z :

$$\varphi(z, \rho) = \iint_z \rho - \frac{dJ(z)}{2\pi\gamma_a\rho} dz d\rho = -\frac{1}{2\pi\gamma_a} [dJ(z) \ln \rho + \frac{dI(z)}{\rho}] + C.$$

Потенциальная функция по оси z на поверхности цилиндра с учетом (6.76) и граничных условий будет иметь вид

$$\varphi_a(z) = -\frac{1}{2\pi\gamma_a\rho} \int \frac{dI(z)}{dz} dz = -\frac{I(z)}{2\pi\gamma_a\rho}. \quad (6.81)$$

Напряженность внутри цилиндрического провода можно получить из соотношения

$$E(z) = \frac{d\varphi(z)}{dz} = -\frac{I(z)}{\pi R^2\gamma_i},$$

откуда

$$\varphi_i(z) = \int E(z) dz = -\frac{1}{\pi R^2\gamma_i} \int I(z) dz \quad \text{или} \quad \frac{d\varphi_i(z)}{dz} = -\frac{I(z)}{\pi R^2\gamma_i}.$$

$$\text{С учетом } \varphi(z) = \varphi_i(z) + \varphi_a(z) \text{ и } \frac{d\varphi(z)}{dz} = \frac{d\varphi_i(z)}{dz} + \frac{d\varphi_a(z)}{dz},$$

$$\text{получим } \frac{d\varphi(z)}{dz} = -\frac{I(z)}{\pi R^2\gamma_i} - \frac{I(z)}{2\pi\gamma_a R z}. \quad (6.82)$$

Соотношение (6.82) можно представить как приращение потенциала провода:

$$d\varphi(z) = -I(z)r_3 dz = -I(z) \left(\frac{2\gamma_a z + R\gamma_i}{2\pi R^2\gamma_a\gamma_i z} \right) dz,$$

где $I(z)$ — ток провода по координате z , A ; r_3 — продольное сопротивление на единицу длины провода с проводимостью γ_i , лежащего в проводящем пространстве с проводимостью γ_a , Ом/м:

$$r_3 = \frac{2\gamma_a z + R\gamma_i}{2\pi R^2\gamma_a\gamma_i z}. \quad (6.83)$$

В соответствии с (6.82) и (6.83) при $z \rightarrow \infty$

$$r_3 = \frac{1}{\pi R^2\gamma_i}.$$

Из (6.81) по закону Ома для участка цепи найдем сопротивление на единицу длины z поверхности цилиндра с единичным радиусом в пространстве с проводимостью γ_a :

$$r_{\text{II}} = \frac{\varphi(z)}{-I(z)} = \frac{1}{2\pi\gamma_a\rho}, \text{ Ом.} \quad (6.84)$$

Возвращаясь к решению (6.77), в котором по аналогии с длинными линиями можно обозначить:

$$\varphi = \frac{Im}{2}, \quad \lambda = \sqrt{\frac{r_3}{r_{\Pi}}},$$

где $\frac{m}{2} = r_{\text{вх}} = \frac{\sqrt{r_3 r_{\Pi}}}{2}$ — входное сопротивление протяженного заземляющего устройства (цилиндрического проводника с утечкой тока), Ом; λ — коэффициент распространения.

Окончательно входное сопротивление бесконечно длинного ($z \rightarrow \infty$) цилиндрического проводника с утечкой тока в проводящее пространство земли может быть выражено из соотношения

$$r_{\text{вх}} = \frac{\sqrt{r_3 r_{\Pi}}}{2} = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi R \sqrt{\gamma_i \gamma_a}}. \quad (6.85)$$

Коэффициент распространения

$$\lambda = \sqrt{\frac{r_3}{r_{\Pi}}} = \frac{\sqrt{2}}{R} \sqrt{\frac{\gamma_a}{\gamma_i}}. \quad (6.86)$$

С учетом (6.85) и (6.86) потенциальная функция (6.77) будет иметь вид

$$\varphi(z, \rho) = \frac{I}{8,88R \sqrt{\gamma_i \gamma_a}} \exp \left(\sqrt{1 + \frac{2\gamma_a}{\gamma_i}} - \sqrt{1 + \frac{\rho^2}{R^2} \frac{2\gamma_a}{\gamma_i}} - \frac{z}{R} \sqrt{\frac{2\gamma_a}{\gamma_i}} \right). \quad (6.87)$$

Оценка входного сопротивления протяженного заземлителя в месте приложения тока замыкания. Из выражения (6.85) на основании теории заземлителей можно принять без доказательства два важных положения.

Входное электрическое сопротивление протяженного заземлителя для проводящего полупространства, т.е. лежащего на поверхности земли, можно выразить из соотношения

$$r_{\text{вх}} = \frac{1}{4,44R \sqrt{\gamma_i \gamma_a}} = \frac{0,225}{R \sqrt{\gamma_i \gamma_a}}. \quad (6.88)$$

Входное электрическое сопротивление протяженного заземлителя для проводящего полупространства, простирающегося в бесконечность и расположенного одним концом в начале координат, будет равно удвоенной величине электрического сопротивления заземлителя, простирающегося в бесконечность по обе стороны от начала координат:

$$r'_{\text{вх}} = \frac{0,45}{R\sqrt{\gamma_i\gamma_a}}. \quad (6.89)$$

Для анализа соотношений входного электрического сопротивления протяженного ЗУ интересно сравнить его расчетные значения с электрическим сопротивлением горизонтального заземляющего электрода конечной длины, принимая протяженное ЗУ и горизонтальный электрод конечной длины выполненными из стали ($\gamma_i = 8,33 \cdot 10^6$ См/м):

$$R_{\text{гз}} = 0,366 \frac{\rho}{l} \lg \frac{l^2}{dt}, \quad (6.90)$$

где l — длина горизонтального электрода, м; d — диаметр или ширина сечения металлического электрода, м; t — глубина укладки в грунт, м; ρ — удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м.

На рис. 6.16 приведены кривые зависимостей электрического сопротивления горизонтальных ЗУ, вычисленные по формуле (6.90) для горизонтальных электродов различной длины и для протяженного заземляющего устройства по формуле (6.88). Известно, что соотношение (6.90) справедливо для сравнительно коротких горизонтальных электродов, потому что получено на основе рассмотрения ЭП горизонтального заземлителя в виде эллипсоида вращения.

Сравнительный анализ показывает, что при длинах до 1000 м значения электрического сопротивления из (6.90) приближаются к величине, полученной из соотношения (6.88).

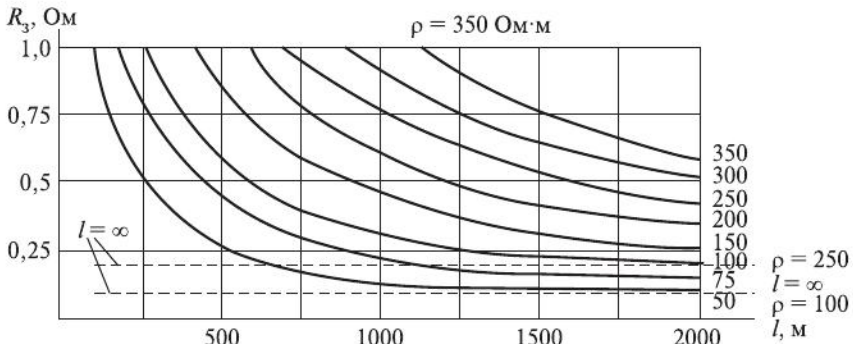


Рис. 6.16. Кривые сопротивления растеканию ЗУ конечной и бесконечной длины

Характеристики входного электрического сопротивления для протяженного ЗУ, расположенного по обе стороны от начала координат, приведены в зависимости от удельного электрического сопротивления грунта (пунктирные линии на рис. 6.16), а характеристики сопротивления растеканию горизонтального заземляющего электрода ограниченной длины — в зависимости от удельного электрического сопротивления грунта и длины электрода (сплошные линии).

Для определения переходного сопротивления «рельсы—грунт» рассмотрим особенности РЛ как протяженного ЗУ. Конструкция рельсового пути создает трехслойную электрическую структуру проводящего пространства земли, на котором расположены рельсы: балластная призма непосредственно под рельсами состоит, как правило, из крупнозернистого щебня или асбестовой крошки с малой удельной проводимостью; насыпь, которая выполняется из хорошо проводящих влагу грунтов от супеси до каменистых с удельной электрической проводимостью от средней до малой; естественные грунты, которые в свою очередь могут иметь слоистую структуру с различной проводимостью слоев. Электрический контакт рельсов с балластной призмой осуществляется через шпалы (деревянные или железобетонные) и непосредственно с балластной призмой при высокой подсыпке материала балласта. В связи с применением в последние годы исключительно железобетонных шпал в первом приближении можно считать удельную проводимость бетона и балластной призмы одного уровня.

Для аналитического определения переходного сопротивления «рельсы—грунт» приравняем полученное выражение для входного сопротивления из (6.88) входному электрическому сопротивлению РЛ, полученному на основе теории длинных линий и выразим из полученного тождества переходное сопротивление РЛ:

$$\frac{0,225}{R\sqrt{\gamma_i\gamma_a}} = \frac{\sqrt{z_p r_{\Pi}}}{2},$$

откуда

$$r_{\Pi} = \frac{0,203}{R^2 \gamma_i \gamma_a z_p}. \quad (6.91)$$

Оценим с помощью соотношения (6.91) переходное сопротивление однопутного рельсового пути с рельсами Р-65. Принимая для рельсовой стали $\gamma_i = 8,33 \cdot 10^6$ См/м, эквивалентный радиус однопутной РЛ $R_{pэ} = \sqrt{R_p a_{p12}} = 0,437$ м, где $R_p = 0,128$ м – эквивалентный радиус одного рельса Р-65, $a_{p12} = 1,55$ м – расстояние между осями путей; заменяя проводимость проводящего пространства эквивалентным удельным сопротивлением, получим:

$$r_{п} = 0,128 \frac{\rho_{эгр}}{z_p} \cdot 10^{-3}, \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

где $\rho_{эгр}$ – эквивалентное удельное электрическое сопротивление грунта, включающее удельное сопротивление балластной призмы и насыпи, Ом·м; z_p – продольное погонное электрическое сопротивление РЛ, Ом/км.

Следует иметь в виду, что при подстановке в формулу величины продольного сопротивления рельсов переменному току, необходимо учитывать и соответственное уменьшение удельной проводимости материала рельса, поэтому на рис. 6.17 показаны значения продольного сопротивления однопутной РЛ для удельной проводимости стали постоянному току. Соотношение (6.91) показывает, что при пропорциональном увеличении продольного сопротивления РЛ и уменьшении проводимости рельсовой стали при протекании переменного тока величина переходного сопротивления останется неизменной, т.е с достаточной степенью точности приведенные на рис. 6.17 кривые зависимости справедливы для любого рода тока.

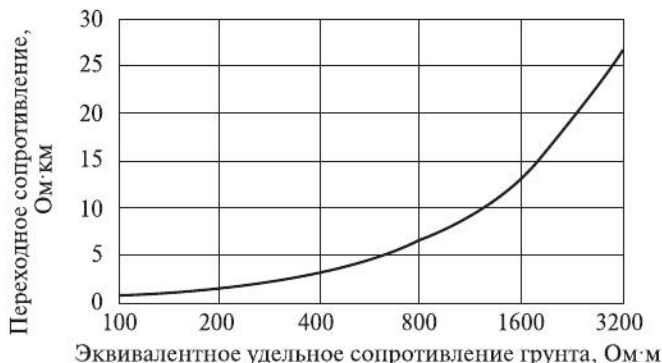


Рис. 6.17. Зависимость переходного сопротивления «рельсы—грунт» от эквивалентного удельного сопротивления грунта

Сложной является электрическая структура проводящего пространства верхнего строения пути: рельсовые скрепления, шпалы, балластная призма, земляное полотно. Элементы структуры часто имеют различное удельное электрическое сопротивление. Так, для балластной призмы применяют щебень, асбестовую крошку, гравий, ракушечник и песок. Балластный слой должен хорошо отводить воду от основной площадки земляного полотна или не пропускать атмосферную воду в глубь балластной призмы (асбестовый балласт). Балластная призма может быть одно-, двух- и трехслойной. Основным (верхним) слоем при многослойной структуре является щебеночный или асбестовый слой, вторым слоем может быть только асбестовый слой и нижним слоем песок (песчаная подушка). Верхнее строение пути располагается на земляном полотне железной дороги, которое выполняется в виде насыпи, выемки (рис. 6.18), полунасыпи, полувыемки, полунасыпи-полувыемки и нулевого места.

Насыпь возводят обычно из однородного местного или привозного грунта, получаемого при разработке выемок, из путевого резерва (водоотвод вдоль насыпи) или специальных карьеров. Насыпь высотой до 12 м выполняют из обычных грунтов, высотой до 20 м — из скальных пород. Крутизна откосов насыпи составляет 1:1,5 высотой до 6 м или 1:1,75 высотой до 12 м. Крутизна откосов выемок составляет 1:1,5.

Электрическая цепь между рельсами и железобетонными шпалами происходит в основном за счет контакта боковой поверхности закладного болта с материалом шпалы. В остальных возможных местах контакта (подшва рельса, гайки и закладные шайбы за-

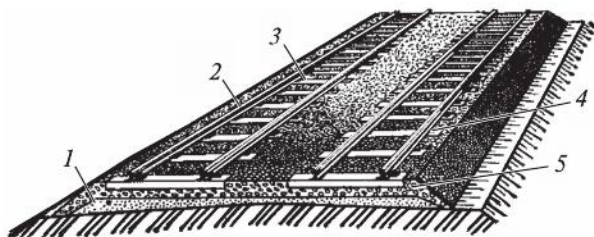


Рис. 6.18. Структура верхнего строения пути:
1, 5 — слои балластной призмы; 2 — рельсы; 3 — шпалы; 4 — рельсовые скрепления

кладного болта) устанавливаются полиэтиленовые или текстолитовые прокладки.

С достаточной степенью точности закладные болты железобетонных шпал можно рассматривать как заземляющие электроды, расположенные в двухслойной проводящей среде. В первом приближении проводящее пространство можно рассматривать двухслойным, состоящим из верхнего слоя, включающего железобетонные шпалы и материал балластной призмы, и нижнего слоя, включающего насыпь и проводящее пространство земли вдоль трассы железнодорожного пути. Исключение могут составлять случаи, когда насыпь выполняется из скального грунта и все проводящее пространство можно принять однородным.

При указанных допущениях эквивалентное удельное электрическое сопротивление грунта можно рассчитать методом относительного сопротивления, изложенного в гл. 4.

Наличие насыпи увеличивает переходное сопротивление «рельсы—земля», а при наличии выемки сопротивление снижается. Это определяется формой проводящего пространства земли, что можно учитывать коэффициентом формы K_{ϕ} (табл. 6.4).

Таблица 6.4

Коэффициент формы проводящего пространства земли

Форма верхнего строения пути	Глубина выемки или высота насыпи, м					
	2	4	6	8	10	>12
Выемка	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
Насыпь	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6

Использование формул (6.87) и (6.91) для оценки условий электробезопасности при использовании РЛ в качестве защитного ЗУ возможно при достаточно точных для инженерной практики расчетов эквивалентного удельного сопротивления грунтов в зоне прокладки РЛ и ее эквивалентного радиуса.

Таким образом, получена аналитическая зависимость для определения потенциальной функции электрического поля у протяженных ЗУ, позволившая выявить зависимость переходного сопротивления «рельсы—грунт» от эквивалентного удельного электрического сопротивления грунтов в зоне прокладки РЛ. Указанные зависимости позволяют аналитически оценивать условия электробезопасности при использовании РЛ и протяженных ЗУ в качестве защитного ЗУ.

6.6. Воздействие ЭМП электрифицированного рельсового транспорта переменного тока на окружающую среду и технические средства защиты

Однофазная тяговая сеть (включая системы «два провода—рельс» и 2×25 кВ) является полностью несимметричной по параметрам, поэтому передает энергию синусоидального переменного тока в окружающее пространство в виде ЭМП.

В любых параллельных контурах, образуемых электрическими линиями (ВЛ ниже 1000 В, линии связи, смежные протяженные металлические сооружения), ЭМП тяговой сети наводит опасное напряжение:

при параллельном сближении

$$U_M = \omega M s k_\Phi I_B I_\Delta;$$

при сложной трассе сближения

$$U_M = \omega k_\Phi I_B \sum_{i=1}^n M_i s_i l_{\Delta i},$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота переменного тока промышленной частоты 50 Гц, $1/\text{с}$; M — коэффициент взаимоиндукции между контурами, Гн/км; s — коэффициент экранирующего действия, при отсутствии тяговых трансформаторов $s = 1$; k_Φ — коэффициент формы влияющего тока (в режиме к.з. $k_\Phi = 1$, в вынужденном режиме $k_\Phi = 1,15$); I_B — влияющий ток соответствующего режима, А; l_Δ — длина сближения, км.

Основными техническими средствами защиты от опасного электромагнитного влияния тяговой сети на смежные сооружения являются:

- различные схемы включения отсасывающих трансформаторов, при применении которых ЭМП видоизменяются таким образом, что их суммарное влияние на смежные линии существенно снижается;
- экранирование смежных сооружений с помощью применения экранированных кабельных линий и устройств экранирующего провода, заземленного на рельс.

Необходимо отметить, что применение указанных технических средств снижает опасное электромагнитное влияние на сооружения, но практически не снижает вредное воздействие на человека. Исключение составляет применение экранирующего провода, заземленного на рельс, но такая конструкция обладает дру-

гим очевидным недостатком с точки зрения воздействия электрического тока и ЭМП на человека, так как создает условия для вынесения опасного потенциала РЛ на заземленные металлические конструкции.

На Южно-Уральской ж.д. совместно с УрГУПС разработано экранирующее защитное устройство (ЭЗУ) электрофицированных железных дорог переменного тока, реализующее концепцию отказа от использования РЛ в качестве ЗУ и использующее для этой цели специально проложенные протяженные ЗУ, что позволяет осуществить ряд технических и социальных задач:

- снизить электромагнитное влияние на смежные сооружения, линии связи, уменьшить электромагнитное загрязнение окружающей среды, повысить надежность рельсовых цепей автоблокировки;

- повысить безопасность и снизить объемы работ при техническом обслуживании ЭУ, что позволяет снизить объемы работ в опасной зоне движения поездов и в условиях необходимости прикосновения к РЛ и присоединенным к ним конструкциям, которые могут находиться под напряжением в нормальных и аварийных режимах работы;

- повысить защиту населения от опасного и вредного воздействия ЭМП;

- повысить производительность труда при ремонте пути с применением тяжелых машин.

Экранирующее заземляющее устройство реализовано в проекте на участке ст. Магнитогорск—ст. Субутак (рис. 6.19).

Существо технических решений состоит в следующем:

- ЭЗУ представляет собой сплошное тросовое объединение опор участка межподстанционной зоны с четной и нечетной стороны РЛ, соединенных наземными перемычками через 1—2 км и связанных с землей с помощью ЗУ в виде протяженной заземляющей магистрали (протяженное ЗУ);

- протяженное ЗУ представляет собой стальной прут диаметром не менее 10 мм или полосу толщиной не менее 4 мм (40×4), уложенные в траншею на участках длиной до 800 м;

- трасса траншеи располагается с полевой стороны железнодорожного пути у края насыпи (редко верхний край выемки), глубина траншеи 0,5—0,8 м;

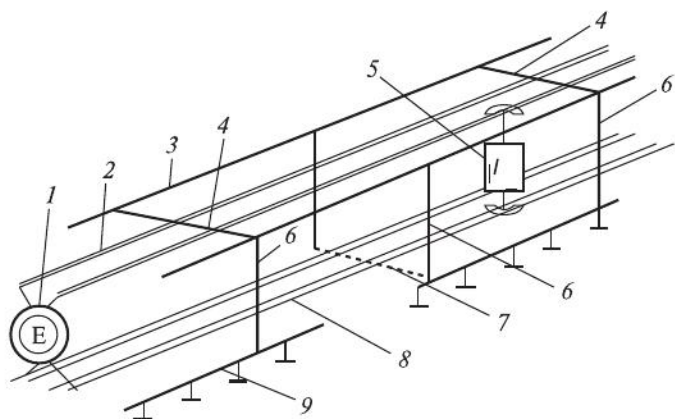


Рис. 6.19. Принципиальная схема экранирующего заземляющего устройства: 1 — источник тока; 2 — контактная сеть; 3 — экранирующий провод 1-го пути; 4 — переключка; 5 — потребитель тока (ЭПС); 6 — заземляющие спуски; 7 — наземные переключки; 8 — рельсовая линия; 9 — заземляющее устройство

— вдоль железнодорожного пути трасса может располагаться с четной и нечетной стороны в зависимости от геолого-топографических условий и технико-экономических соображений;

— металлические конструкции контактной сети, подлежащие защитному заземлению, присоединяются к ЭЗУ на основе типовых решений, а соединение заземляющих присоединений к протяженному ЗУ осуществляется сваркой;

— межпутные соединения ЭЗУ выполняются естественными соединениями (металлические ригельные конструкции контактной сети) или искусственными из стального прута (полосы) или троса ПБСМ-70 по стене искусственных сооружений (труб, отверстий мостов) или прокладываются под балластной призмой рельсового пути в асбоцементной трубе на глубине 0,8 м.

Укладка протяженного ЗУ с полевой стороны опор контактной сети или в тело насыпи с достаточно низким удельным сопротивлением грунта позволяет в большинстве случаев повысить надежность работы защиты контактной сети за счет сохранения величины сопротивления цепи короткого замыкания и уменьшения угла сдвига между током и напряжением за счет активного характера величины сопротивления ЗУ.

Определение эффективности экранирующего действия ЭЗУ. Для оценки экранирующего действия ЭЗУ от электрической составляющей ЭМП введено понятие коэффициента экранирующего действия

$$S = \frac{u_{\text{э}}}{u}, \quad (6.92)$$

где $u_{\text{э}}$ и u соответственно разность потенциалов, действующая на человека, при наличии и отсутствии ЭЗУ.

Разность потенциалов электрической составляющей ЭМП, действующая на человека при отсутствии экранирующего провода, получена нами в гл. 4 из соотношения

$$u = U \frac{\ln \left(1 + \frac{4hK}{a^2 + h^2 + K^2 - 2hK} \right)}{2 \ln(4h/d)}.$$

Для определения потенциала электрического поля условного провода на уровне роста человека система потенциальных уравнений Максвелла для варианта расположения контактного и экранирующего провода на проектных высотах и условного провода на уровне роста человека (рис. 6.20) имеет вид:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= q_1 \alpha_{11} + q_{\text{э}} \alpha_{\text{э}1} + q_k \alpha_{k1}, \\ \varphi_{\text{э}} &= q_1 \alpha_{1\text{э}} + q_{\text{э}} \alpha_{\text{э}\text{э}} + q_k \alpha_{k\text{э}}, \\ \varphi_k &= q_1 \alpha_{1k} + q_{\text{э}} \alpha_{\text{э}k} + q_k \alpha_{kk}. \end{aligned} \quad (6.93)$$

где U , φ_1 , $\varphi_{\text{э}}$, φ_k , q_1 , q_k , $q_{\text{э}}$ — потенциалы и заряды контактного, экранирующего и условного провода в расчетной точке K ; α_{11} , $\alpha_{\text{э}1}$, $\alpha_{1\text{э}}$, $\alpha_{k\text{э}}$, α_{1k} , α_{kk} — собственные и взаимные потенциальные коэффициенты.

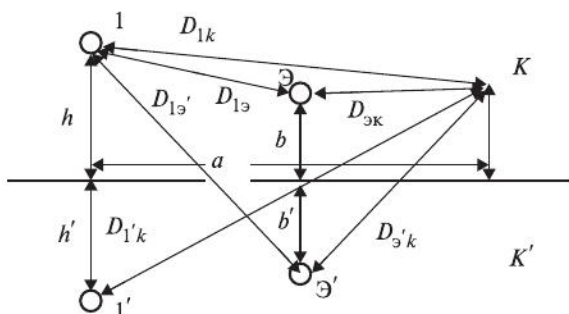


Рис. 6.20. К определению потенциальных коэффициентов

Так как провод условной линии K изолирован от земли, то в первом приближении можно принять, что на нем отсутствуют заряды $q_k = 0$, тогда система (6.93) примет вид:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= q_1 \alpha_{11} + q_3 \alpha_{31}, \\ \varphi_3 &= q_1 \alpha_{13} + q_3 \alpha_{33}, \\ \varphi_k &= q_1 \alpha_{1k} + q_3 \alpha_{3k}.\end{aligned}$$

Решая систему, найдем напряжение на условной линии K при электрическом влиянии при наличии экранирующей системы:

$$\varphi_k = u_3 = U \frac{\alpha_{13} \alpha_{1k} - \alpha_{13}^2 \alpha_{3k}}{\alpha_{11} \alpha_{33} - \alpha_{13}^2} + U_3 \frac{\alpha_{11} \alpha_{3k} + \alpha_{1k} \alpha_{13}}{\alpha_{11} \alpha_{33} + \alpha_{13}^2}. \quad (6.94)$$

Экранирующая линия заземлена на всем протяжении, поэтому можно принять в (6.94) $U_3 = 0$, тогда потенциал условной линии можно определить из соотношения

$$\varphi_k = u_3 = U \frac{\alpha_{13} \alpha_{1k} - \alpha_{13}^2 \alpha_{3k}}{\alpha_{33} \alpha_{11} - \alpha_{13}^2}. \quad (6.95)$$

Указанное допущение для экранирующего провода $U_3 = 0$ возможно только для экранирующего провода, заземленного на ЗУ; присоединение экранирующего провода к РЛ приведет к необходимости учитывать второе слагаемое выражения (6.94), в котором напряжение экранирующего провода будет равно напряжению РЛ $U_3 = U_p$, что приведет к увеличению напряжения на условной линии K , воздействующего на человека.

Входящие в формулы потенциальные коэффициенты можно найти из соотношений в соответствии с рис. 6.20:

$$\begin{aligned}\alpha_{33} &= 18 \cdot 10^6 \ln \frac{2b}{r_3}, \quad \alpha_{11} = 18 \cdot 10^6 \ln \frac{2h}{r_{11}}, \quad \alpha_{13} = 18 \cdot 10^6 \ln \frac{D_{13}'}{D_{13}}, \\ \alpha_{1k} &= 18 \cdot 10^6 \ln \frac{D_{1k}'}{D_{1k}}, \quad \alpha_{k3} = 18 \cdot 10^6 \ln \frac{D_{k3}'}{D_{k3}}.\end{aligned}$$

Представляет определенные трудности определение собственного потенциального коэффициента тела человека непосредственно из рассматриваемых уравнений, так как математическая модель с использованием уравнений Максвелла применяется для расчета

электрического поля системы проводов и их зарядов при использовании ряда допущений:

- провода представляют собой бесконечно длинные и параллельные проводники;
- высота подвеса неизменна на всем протяжении;
- подстилочный грунт имеет проводимость бесконечно большую по сравнению с проводимостью воздуха; поверхность земли горизонтальная.

Принимается в первом приближении, что на высоте роста человека расположен провод, изолированный от земли. Напряжение на условном проводе относительно земли определяет напряженность поля между условным проводом и землей, в которой может оказаться реальный человек, высота подвеса условного провода принимается нами равной среднему росту человека K .

Выражая расстояния между проводами и их зеркальными изображениями D через геометрические соотношения с учетом фактического расположения проводов, принимая эквивалентный радиус контактной сети для однопутного или двухпутного участка через известные соотношения, найдем из (6.95):

$$\varphi_k = u_3 = \left(\ln \frac{\sqrt{(h+b)^2 + a_3^2}}{\sqrt{(h-b)^2 + a_3^2}} \ln \frac{\sqrt{(h+K)^2 + a^2}}{\sqrt{(h-K)^2 + a^2}} - \ln \frac{\sqrt{(h+b)^2 + a_3^2}}{\sqrt{(h-b)^2 + a_3^2}} \ln \frac{\sqrt{(b+K)^2 + (a-a_3)^2}}{\sqrt{(b-K)^2 + (a-a_3)^2}} \right) / \left(\ln \frac{2b}{r_3} - \ln \frac{2h}{r_k} - \ln^2 \frac{\sqrt{(h+b)^2 + a_3^2}}{\sqrt{(h-b)^2 + a_3^2}} \right).$$

При отсутствии экранирующего провода система потенциальных уравнений примет вид:

$$\begin{aligned} U &= q_1 \alpha_{11} + q_k \alpha_{1k}, \\ u_k &= q_1 \alpha_{1k} + q_k \alpha_{kk}. \end{aligned} \quad (6.96)$$

Потенциал, индуцированный на проводе, находящемся в электрическом поле, можно выразить через напряжение влияющей

линии и проводимости влияющей и подверженной влиянию линий:

$$u_k = \frac{-j\omega C_1}{G_k - j\omega C_k} U. \quad (6.97)$$

Решая систему (6.96) относительно зарядов, найдем:

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= \frac{\alpha_{kk}}{\alpha_{11}\alpha_{kk} - \alpha_{1k}^2} U - \frac{\alpha_{1k}}{\alpha_{11}\alpha_{kk} - \alpha_{1k}^2} u_k, \\ q_k &= \frac{\alpha_{11}}{\alpha_{11}\alpha_{kk} - \alpha_{1k}^2} u_k - \frac{\alpha_{k1}}{\alpha_{11}\alpha_{kk} - \alpha_{1k}^2} U. \end{aligned} \right\} \quad (6.98)$$

Заряды влияющего провода и провода, подверженного влиянию в расчетной точке на уровне роста человека, можно выразить через коэффициенты емкостной связи:

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= C_{11}U + C_{1k}(U - u_k), \\ q_k &= C_{k1}(U - u_k) + C_{kk}u_k. \end{aligned} \right\} \quad (6.99)$$

Преобразуем систему (6.99) к виду:

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= (C_{11} + C_{1k})U - C_{1k}u_k, \\ q_k &= (C_{k1} + C_{kk})u_k - C_{k1}U. \end{aligned} \right\} \quad (6.100)$$

Сопоставив системы (6.98) и (6.100), найдем:

$$\left. \begin{aligned} C_{1k} &= \frac{\alpha_{1k}}{\alpha_{11}\alpha_{kk} - \alpha_{1k}^2}, \\ C_{kk} &= \frac{\alpha_{11} - \alpha_{1k}}{\alpha_{11}\alpha_{kk} - \alpha_{1k}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (6.101)$$

Выражение (6.101) можно записать в виде

$$u_k = U \frac{-j\omega C_{1k}}{G_k - j\omega C_{kk}}. \quad (6.102)$$

Известно, что при частоте электрического тока 50 герц без большой погрешности для изолированного провода действительной составляющей знаменателя выражения (6.102) можно пренебречь.

Откуда получим напряжение в линии, подверженной влиянию, при электрическом влиянии при отсутствии экранирования:

$$u_k = U \frac{\alpha_{1k}}{\alpha_{11} - \alpha_{1k}}. \quad (6.103)$$

Выражение для коэффициента экранирования примет вид:

$$S = \frac{(\alpha_{13} \alpha_{1k} - \alpha_{13} \alpha_{k3})(\alpha_{11} - \alpha_{1k})}{\alpha_{1k} (\alpha_{11} \alpha_{33} - \alpha_{13}^2)}. \quad (6.104)$$

Откуда можно получить модуль коэффициента экранирования при электрическом влиянии:

$$S = \left(\ln \frac{\sqrt{(h+b)^2 + a_3^2}}{\sqrt{(h-b)^2 + a_3^2}} \ln \frac{\sqrt{(h+K)^2 + a^2}}{\sqrt{(h-K)^2 + a^2}} - \ln \frac{\sqrt{(h+b)^2 + a_3^2}}{\sqrt{(h-b)^2 + a_3^2}} \ln \frac{\sqrt{(b+K)^2 + (a-a_3)^2}}{\sqrt{(b-K)^2 + (a-a_3)^2}} \right) \times \left(\ln \frac{2h}{r_k} - \ln \frac{\sqrt{(h+K)^2 + a^2}}{\sqrt{(h-K)^2 + a^2}} \right) / \left(\ln \frac{2b}{r_3} \ln \frac{2h}{r_k} - \ln^2 \frac{\sqrt{(h+b)^2 + a_3^2}}{\sqrt{(h-b)^2 + a_3^2}} \right) \ln \frac{2h}{r_k}.$$

При рассмотрении, например, двухпутного участка контактной сети переменного тока с подвеской проводов ПБСМ95+МФ100 с использованием в качестве экранирующего провода троса группового заземления опор контактной сети ПБСМ70 некоторые величины рассматриваемого соотношения будут иметь постоянные значения: $h = 7,25$ м, $a_3 = 6$ м, $b = 3,5$ м, $r_{11} = 0,0062$ м, $d = 0,0124$ м, $K = 1,75$ м, $r_3 = 0,0055$.

Выражение для определения коэффициента экранирования при электрическом влиянии для рассматриваемого участка примет вид:

$$S = \frac{\left(0,554 \ln \frac{\sqrt{81+a^2}}{\sqrt{30,3+a^2}} - 0,554 \ln \frac{\sqrt{27,6+(a-6)^2}}{\sqrt{3,06+(a-6)^2}} \right) \left(7,76 - \ln \frac{\sqrt{81+a^2}}{\sqrt{30,3+a^2}} \right)}{428}.$$

На рис. 6.21 показано изменение коэффициента экранирующего действия при электрическом влиянии на удалении с полевой стороны от контактной подвески (место расположения оси экранирующего провода соответствует расстоянию 6 м).

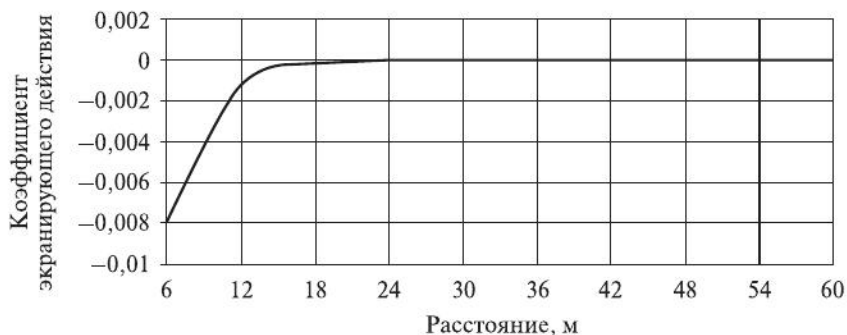


Рис. 6.21. Зависимость коэффициента экранирующего действия от расстояния до контактной сети при электрическом влиянии

Анализ коэффициента экранирования показывает, что применение экранирующей системы снижает уровень электрической составляющей ЭМП, воздействующий на человека с полевой стороны контактной сети более чем в 125 раз, т.е. напряженность электрического поля составляет менее одного процента напряженности при отсутствии ЭЗУ.

Экранирующее действие ЭЗУ при магнитном влиянии контактной сети на окружающее пространство может быть оценено как разность магнитных полей тяговой сети и встречного магнитного поля экранирующей системы, которое возникает за счет тока в контуре «экранирующий провод—ЗУ» из-за наведенной ЭДС в этом контуре от контура «тяговая сеть—РЛ».

Величина напряженности магнитного поля от тяговой сети была определена нами ранее в гл. 4:

$$H_M = \sqrt{H_x^2 + H_z^2} = \frac{Ih}{2\pi x \sqrt{x^2 + h^2}}.$$

Суммарная напряженность магнитного поля в пространстве при наличии ЭЗУ может быть определена из соотношения

$$H = H_M - H_{MЭ} = \frac{I_k h_k}{2\pi x \sqrt{x^2 + h_k^2}} - \frac{I_э h_э}{2\pi(x + a_э) \sqrt{(x + a_э)^2 + h_э^2}}, \quad (6.105)$$

где I_k и $I_э$ — величины токов в контуре «контактная сеть—РЛ» и в контуре «экранирующий провод—ЗУ» соответственно (являются векторными величинами); h_k , $h_э$ — высоты подвеса эквивалентного контактного и экранирующего провода; $a_э$ — расстояние между контурами.

Отношение напряженностей магнитного поля при наличии экранирования и в его отсутствие можно оценить коэффициентом экранирования магнитного поля

$$K_{\text{э}} = \frac{H}{H_M} = 1 - \frac{I_{\text{э}} h_{\text{э}}}{I_k h_k} \frac{x \sqrt{x^2 + h_k^2}}{(x + a_{\text{э}}) \sqrt{(x + a_{\text{э}})^2 + h_{\text{э}}^2}}. \quad (6.106)$$

Определение коэффициента экранирования сводится к определению вектора тока в экранирующем проводе.

Как известно при протекании тока в контактной сети I_k в смежной линии индуцируется продольная ЭДС $E_{\text{э}} = -z_{\text{кэ}} I_k l$, вектор которой отстает от тока практически на 90° .

Ток в экранирующем проводе может быть определен с учетом электрического сопротивления контура ЭЗУ:

$$I_{\text{э}} = \frac{-z_{\text{кэ}} I_k l}{z_{\text{э}}}, \quad (6.107)$$

где $z_{\text{кэ}}$ — погонное сопротивление взаимоиндукции «контактная сеть—ЭЗУ», Ом/км; $z_{\text{э}}$ — сопротивление ЭЗУ, Ом; l — длина сближения контуров, км.

Подставим выражение (6.107) в (6.106) и найдем коэффициент экранирования от неизменных во времени величин:

$$K_{\text{э}} = 1 - \frac{z_{\text{кэ}} l h_{\text{э}}}{z_{\text{э}} h_k} \frac{x \sqrt{x^2 + h_k^2}}{(x + a_{\text{э}}) \sqrt{(x + a_{\text{э}})^2 + h_{\text{э}}^2}}. \quad (6.108)$$

Погонное сопротивление взаимоиндукции контуров может быть найдено из соотношения

$$z_{\text{кэ}} = 0,05 + j \cdot 0,144(1,97 - \lg a_{\text{э}} \sqrt{\gamma_{\text{э}}}), \text{ Ом/км.}$$

Полное сопротивление контура экранирующего провода длиной 1 км может быть определено из соотношения

$$z_{\text{э}} = R_{\text{э}} + z_{\text{эп}} I_{\text{э}} = r_{\text{з1}} + r_{\text{з2}} + r_{\text{э}} + 0,05 + j \cdot 0,144(2,08 - \lg R_{\text{пр}} \sqrt{\gamma_{\text{э}}}), \text{ Ом,}$$

где $r_{\text{з1}}$ и $r_{\text{з2}}$ — входные сопротивления ЭЗУ на концах участка экранирующего провода; $r_{\text{э}}$ — активное сопротивление экранирующего провода; $R_{\text{пр}}$ — радиус экранирующего провода; $\gamma_{\text{э}}$ — удельная проводимость грунта; $l_{\text{э}}$ — длина экранирующего контура (1 км).

Подставляя средние значения сопротивлений из табл. 6.5 и 6.6 в соотношение (6.108), получим значение коэффициента экранирования при средних параметрах грунтов и длинах взаимодействующего

ющих контуров 1 км в зависимости от координаты x в поперечном направлении по отношению к трассе РЛ.

Таблица 6.5

Зависимость сопротивления контура ЭЗУ от удельной проводимости грунта

Удельная проводимость грунта, Сим/м	Сопротивление троса ЭЗУ, Ом/км	Сопротивление контура ЭЗУ, Ом
$100 \cdot 10^{-3}$	$0,781 + j \cdot 0,697 = 1,047e^{j41,75}$	$1,287 + j \cdot 0,697 = 1,46e^{j31,6}$
$50 \cdot 10^{-3}$	$0,781 + j \cdot 0,719$	$1,287 + j \cdot 0,719$
$33 \cdot 10^{-3}$	$0,781 + j \cdot 0,732$	$1,287 + j \cdot 0,732$
$25 \cdot 10^{-3}$	$0,781 + j \cdot 0,740$	$1,287 + j \cdot 0,740$
$20 \cdot 10^{-3}$	$0,781 + j \cdot 0,747$	$1,287 + j \cdot 0,747$
$17 \cdot 10^{-3}$	$0,781 + j \cdot 0,752 = 1,08e^{j43,92}$	$1,287 + j \cdot 0,752 = 1,49e^{j33,7}$

Таблица 6.3

Зависимость сопротивления взаимной индукции от удельной проводимости грунта

Удельная проводимость грунта, Сим/м $\cdot 10^{-3}$	100	50	33	25	20	17
Сопротивление взаимной индукции, $z_{кэ}$	$j \cdot 0,244$	$j \cdot 0,257$	$j \cdot 0,266$	$j \cdot 0,273$	$j \cdot 0,278$	$j \cdot 0,281$

Эта зависимость модуля коэффициента экранирования от координаты x в поперечном направлении трассы железнодорожного пути показана в виде кривой на рис. 6.22.



Рис. 6.22. Модуль коэффициента экранирования в зависимости от расстояния до контактной сети

Анализ зависимости рис. 6.22 показывает, что применение ЭЗУ существенно снижает уровень магнитной составляющей ЭМП, воздействующей на человека и окружающую среду. В ближней зоне этот уровень не превышает 6 %, а в дальней зоне — 8 % от уровня магнитной составляющей ЭМП тяговой сети при отсутствии ЭЗУ.

Глава 7. ЗАЩИТА СООРУЖЕНИЙ И УСТРОЙСТВ ОТ АТМОСФЕРНОГО И СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

7.1. Защита сооружений и устройств от атмосферного электричества

Грозы и молнии. Грозы, сопровождающиеся разрядами атмосферного электричества, — весьма распространенное явление природы. Одновременно на земном шаре происходит до 1800 гроз и каждую секунду отмечается около 100 разрядов молнии. Грозы по поверхности земли распределяются очень неравномерно. На каждый квадратный километр нашей страны в среднем приходится одна-две грозы в год. На Кавказе имеются места с числом грозовых дней в году более 60, в Европейской части страны в районе Москвы, Смоленска и на Южном Урале — 20–25, над территорией Сибирской низменности число гроз не превышает 10–12 в год, а у берегов Байкала — 6 в течение года (рис. 7.1).

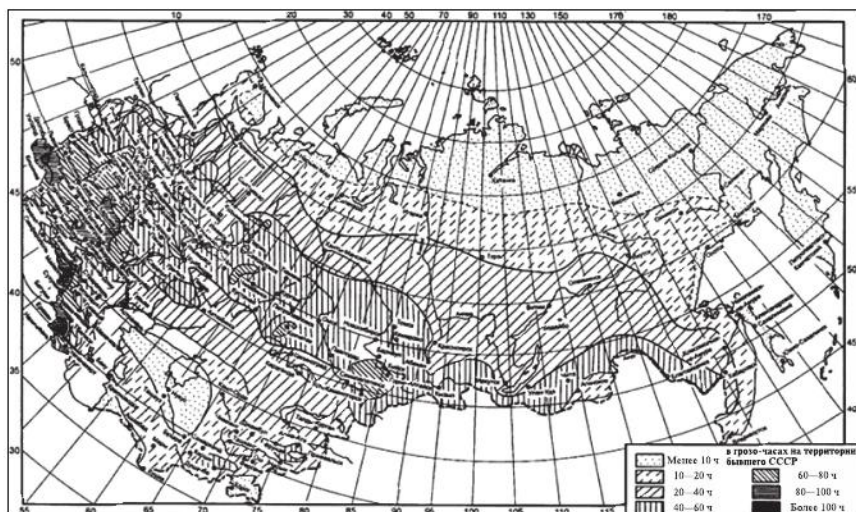


Рис. 7.1. Карта грозовой деятельности на территории России и стран СНГ

Грозовой разряд оказывает электромагнитные, тепловые и механические воздействия.

С электрическим разрядом атмосферного электричества связано электромагнитное поле (ЭМП), которое индуцирует напряжение на проводах и проводящих конструкциях вблизи места разряда. Индуцированные напряжения в линиях электропередачи и контактной сети могут достигать сотен киловольт.

Ток молнии (до 50 кА и выше) I_M , протекая через заземленный объект с сопротивлением заземляющего устройства R_3 , например, через опору контактной сети, создает на этом сопротивлении падение напряжения $U_3 = I_M R_3$, которое может достигать сотен и даже тысяч киловольт и совместно с напряжением, индуцированным ЭМП тока молнии, может привести к так называемым «перенапряжениям прямого удара молнии».

Индуцированные перенапряжения и перенапряжения прямого удара молнии, объединяемые под общим названием «атмосферные перенапряжения», распространяются на все участки электрически связанной системы и поэтому представляют опасность с точки зрения разрушения (пробоя) электрической изоляции и опасного воздействия на незащищенное оборудование и человека.

Систему защитных устройств и мероприятий, применяемых в промышленных (ЛЭП, электрические подстанции и др.) и гражданских (в том числе жилых) сооружениях для их защиты от аварий при воздействии на них молнии, называют *молниезащитой*.

Современное представление о процессе образования атмосферного электричества и развитии разряда молнии связано с процессами *электризации капель воды и кристаллов льда* (на больших высотах) в быстро восходящих потоках воздуха при формировании грозового облака.

В процессе движения капель воды в облаке и замерзания их в верхних слоях атмосферы, при столкновениях друг с другом в струях воздуха происходит одновременно электризация частиц влаги, разделение зарядов разных знаков в разных частях грозового облака. Обычно в облаке на высоте от 1 до 8 км и более образуется несколько зон скопления зарядов разного знака. В нижней части облака преимущественно скапливаются отрицательные, а в верхней — положительные заряды. Это подтверждается тем, что в большинстве случаев (90—95 %) молния несет к земле отрицательный электрический заряд.

Под действием объемных зарядов внутри облака и между облаком и землей возникают электрические поля напряженностью у земли до 30 кВ/м, а у грозового облака — до 1000 кВ/м.

Создаваемое объемными зарядами электрическое поле распределяется в пространстве неравномерно, в отдельных областях его напряженность может превышать критическое значение ударной ионизации. В этих местах заряженные частицы при соударении с молекулами воды и воздушной смеси газов вызывают их ионизацию, что приводит к лавинному процессу нарастания числа ионизированных частиц, образованию «стримеров» — каналов с повышенной проводимостью за счет высокого уровня ионизации газовой смеси. Протекающие по стримерам токи еще более повышают их проводимость, в результате чего образуется лидерный канал молнии (рис. 7.2), в котором происходит интенсивная ударная ионизация, термоионизация и фотоионизация газовой смеси.

На конце лидерного канала 3 под действием высокого потенциала зарядов облака образуется импульсная корона 5, представляющая собой нитевидные разряды в газе в виде каналов. При протекании определенного количества электричества по этим каналам в виде токов разрядов проводимость их резко увеличивается, что

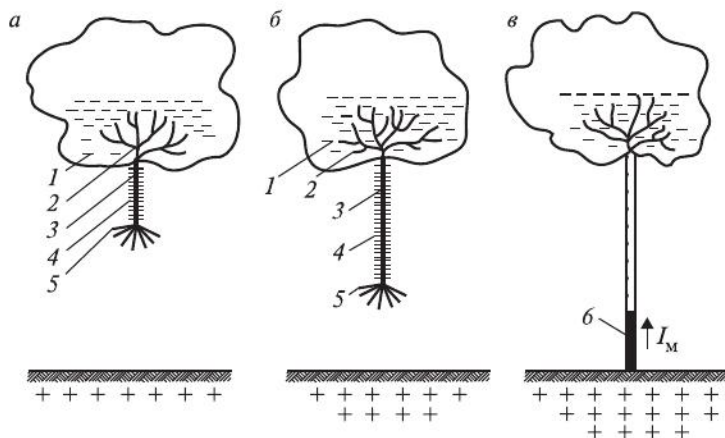


Рис. 7.2. Схема развития разряда молнии:

а, б — две ступени лидера; *в* — образование главного канала молнии; 1 — объемный разряд облака; 2 — стримеры; 3 — канал ступенчатого лидера; 4 — корона канала; 5 — импульсная корона на головке канала; 6 — канал молнии

сопровождается скачкообразным удлинением лидерного канала и образованием на его конце новой импульсной короны.

Скорость движения ступенчатого лидерного канала, полученная с помощью специального фотографирования процесса, достигает $5 \cdot 10^7$ м/с, а длина отдельных ступеней канала от 10 до 100 м. Диаметр канала ступенчатого лидера колеблется от 0,005 до 5 м. Вокруг него образуется корона, диаметр которой достигает 10—12 м.

Под действием электрического поля зарядов лидерного канала на ближайшей к нему поверхности земли и конструкциях (опоры и ЛЭП, крыши домов и сооружений и т.п.) накапливаются заряды противоположного знака. При достижении лидером поверхности земли или встречного лидерного канала с возвышенных частей земли начинается вторая стадия разряда молнии, сопровождающаяся «нейтрализацией» отрицательных зарядов главного лидера. Этот процесс можно рассматривать как волну тока I_M , распространяющуюся по каналу от земли к облаку со скоростью от 0,05 до 0,5 скорости света и создающую вокруг канала сильное магнитное поле.

Эта стадия процесса разряда молнии сопровождается наиболее ярким свечением, возникновением больших давлений газа в канале, расширение которого приводит к мощным звуковым колебаниям воздуха.

После протекания тока разряда свечение канала ослабевает, а проводимость падает. В этот период под действием электрического поля оставшихся в облаке отрицательных зарядов по каналу разряда продолжает протекать небольшой ток. Благодаря этому в канале и нижней части облака накапливаются положительные заряды, резко увеличивающие напряженность поля между этой зоной облака и расположенными рядом объемными отрицательными зарядами.

Возникающие под действием этой напряженности поля стримеры способствуют образованию обратного разряда по остаточному каналу, появлению нового лидера и повторному разряду молнии.

По наблюдениям до 50—60 % молний имеют от 2 до 3 повторных разрядов с паузами между ними 0,03—0,05 с. Число повторных разрядов в редких случаях достигает 20—25, а общая длительность такой многократно повторяющейся молнии 1,2—1,5 с. Общий заряд, переносимый многократными молниями, достигает 350—380 Кл.

Форма волны тока разряда молнии имеет аperiодический характер (рис. 7.3) и отражает основные физические процессы в канале молнии.

В первый момент по каналу течет небольшой ток в несколько десятков ампер. Дальнейшее возрастание тока (зона $a-b$ на рис. 7.3) связано с развитием встречного стримера. Участок $b-c$ соответствует нарастанию тока главного разряда до наибольшего амплитудного значения тока молнии I_M . Время нарастания тока молнии (участок $b-c$) или *длина фронта волны* τ_ϕ определяется процессом изменения канала молнии в зависимости от плотности зарядов в канале лидера, длины встречного стримера, величины сопротивления заземления объекта, через который произошел разряд молнии. *Длина волны тока молнии* τ_B условно отсчитывается от геометрического начала фронта волны тока до момента достижения током молнии величины $0,5I_M$. Полное время протекания тока молнии по каналу намного превышает τ_B .

Время возрастания тока молнии τ_ϕ не превышает 10 мкс, в большинстве случаев оно лежит в пределах 1–2 мкс. Максимальная скорость (крутизна) нарастания тока в среднем составляет 5–10 кА/мкс и редко достигает 50 кА/мкс. Амплитуда тока молнии I_M колеблется от 1–2 кА до 200–300 кА.

Термины и определения. При описании молниезащиты применяются следующие термины.

Удар молнии в землю — электрический разряд атмосферного происхождения между грозовым облаком и землей, состоящий из одного или нескольких импульсов тока.

Точка поражения — точка, в которой молния соприкасается с землей, зданием или устройством молниезащиты, удар молнии может иметь несколько точек поражения.

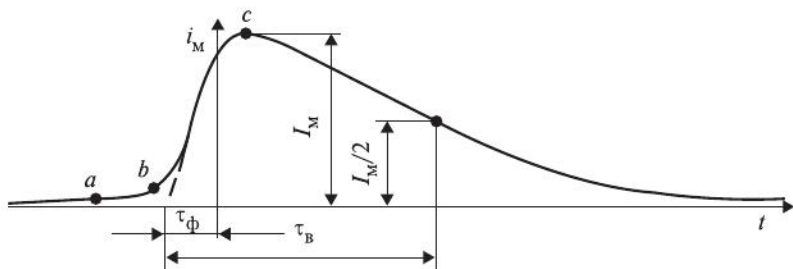


Рис. 7.3. Форма волны тока молнии

Защищаемый объект — здание или сооружение, их часть или пространство, для которых выполнена молниезащита, отвечающая требованиям нормативов.

Устройство молниезащиты — система, позволяющая защитить здание или сооружение от воздействий молнии, включающая в себя внешние и внутренние устройства. В частных случаях молниезащита может содержать только внешние или только внутренние устройства.

Устройства защиты от прямых ударов молнии (молниеотводы) — комплекс, состоящий из молниеприемников, токоотводов и заземлителей.

Устройства защиты от вторичных воздействий молнии — устройства, ограничивающие воздействия электрического и магнитного полей молнии.

Устройства для выравнивания потенциалов — элементы устройств защиты, ограничивающие разность потенциалов, обусловленную растеканием тока молнии.

Молниеприемник — часть молниеотвода, предназначенная для перехвата молний.

Токоотвод (спуск) — часть молниеотвода, предназначенная для отвода тока молнии от молниеприемника к заземлителю.

Заземляющее устройство — совокупность заземлителя и заземляющих проводников.

Заземлитель — проводящая часть или совокупность соединенных между собой проводящих частей, находящихся в электрическом контакте с землей непосредственно или через проводящую среду.

Заземляющий контур — заземляющий проводник в виде замкнутой петли вокруг здания в земле или на ее поверхности.

Сопротивление заземляющего устройства — отношение напряжения на заземляющем устройстве к току, стекающему с заземлителя в землю.

Напряжение на заземляющем устройстве — напряжение, возникающее при стекании тока с заземлителя в землю между точкой ввода тока в заземлитель и зоной нулевого потенциала.

Соединенная между собой металлическая арматура — арматура железобетонных конструкций здания (сооружения), которая обеспечивает электрическую непрерывность.

Опасное искрение — недопустимый электрический разряд внутри защищаемого объекта, вызванный ударом молнии.

Безопасное расстояние — минимальное расстояние между двумя проводящими элементами вне или внутри защищаемого объекта, при котором между ними не может произойти опасного искрения.

Устройство защиты от перенапряжений — устройство, предназначенное для ограничения перенапряжений между элементами защищаемого объекта (например, разрядник, нелинейный ограничитель перенапряжений или иное защитное устройство).

Отдельно стоящий молниеотвод — молниеотвод, молниеприемники и токоотводы которого расположены таким образом, чтобы путь тока молнии не имел контакта с защищаемым объектом.

Молниеотвод, установленный на защищаемом объекте — молниеотвод, молниеприемники и токоотводы которого расположены таким образом, что часть тока молнии может растекаться через защищаемый объект или его заземлитель.

Зона защиты молниеотвода — пространство в окрестности молниеотвода заданной геометрии, отличающееся тем, что вероятность удара молнии в объект, целиком размещенный в его объеме, не превышает заданной величины.

Допустимая вероятность прорыва молнии — предельно допустимая вероятность P удара молнии в объект, защищаемый молниеотводами.

Надежность защиты определяется как $1 - P$.

Промышленные коммуникации — силовые и информационные кабели, проводящие трубопроводы, непроводящие трубопроводы с внутренней проводящей средой.

Способы защиты от прямых ударов молнии или вызываемых грозовой деятельностью электрических перенапряжений в элементах оборудования выбирают в зависимости от класса объекта защиты и параметров тока молнии. Среднегодовую продолжительность гроз в часах можно определять по карте, приведенной на рис. 7.1.

Все здания и сооружения по уровню надежности защиты от прямых ударов молнии разделяют на классы по опасности ударов молнии для самого объекта и его окружения.

Непосредственное опасное воздействие молнии — это пожары, механические повреждения, травмы людей и животных, а также

повреждения электрического и электронного оборудования. Последствиями удара молнии могут быть взрывы и выделение опасных продуктов — радиоактивных и ядовитых химических веществ, а также бактерий и вирусов.

Удары молнии могут быть особо опасны для информационных систем, систем управления, контроля и электроснабжения. Для электронных устройств, установленных в объектах разного назначения, требуется специальная защита.

Классификация зданий и сооружений по устройству молниезащиты определяется по опасности ударов молнии для самого объекта и его окружения.

Рассматриваемые объекты могут подразделяться на обычные и специальные.

К обычным объектам относятся:

— жилые и административные строения, а также здания и сооружения, высотой не более 60 м, предназначенные для торговли, промышленного производства, сельского хозяйства.

К специальным объектам относятся:

— объекты, представляющие опасность для непосредственного окружения; объекты, представляющие опасность для социальной и физической окружающей среды (объекты, которые при поражении молнией могут вызвать вредные биологические, химические и радиоактивные выбросы);

— прочие объекты, для которых может предусматриваться специальная молниезащита, например, строения высотой более 60 м, игровые площадки, временные сооружения, строящиеся объекты.

Все основные здания железнодорожного транспорта относятся, как правило, к обычным объектам по молниезащите и только средства связи относятся к специальным объектам с ограниченной опасностью. Их молниезащита осуществляется в основном при помощи стержневых молниеотводов (при специальном обосновании могут применяться тросовые и сетчатые молниеотводы), заземляемых на специальное ЗУ.

При строительстве и реконструкции для каждого класса объектов требуется определить необходимые *уровни надежности защиты от прямых ударов молнии* (ПУМ). Например, для обычных объектов в основном действующем нормативном документе (СО

153-34.21.122-2003) предложено четыре уровня надежности защиты, указанные в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Уровни защиты от ПУМ отдельных объектов

Уровень защиты	Надежность защиты от ПУМ
I	0,98
II	0,95
III	0,90
IV	0,80

Для специальных объектов минимально допустимый уровень надежности защиты от ПУМ устанавливается в пределах 0,9—0,999 в зависимости от степени его общественной значимости и тяжести ожидаемых последствий от ПУМ по согласованию с органами государственного контроля.

Для каждого уровня молниезащиты должны быть определены предельно допустимые параметры тока молнии. Данные, приведенные в этих нормативах, относятся как к нисходящим, так и к восходящим молниям.

Параметры токов молнии необходимы для расчета механических и термических воздействий, а также для нормирования средств защиты от электромагнитных воздействий.

Соотношение полярностей разрядов молнии зависит от географического положения местности. В отсутствие местных данных принимают это соотношение равным 10 % для разрядов с положительными токами и 90 % для разрядов с отрицательными токами.

Механические и термические действия молнии обусловлены пиковым значением тока I , полным зарядом $Q_{\text{полн}}$, зарядом в импульсе $Q_{\text{имп}}$ и удельной энергией W/R . Наибольшие значения этих параметров наблюдаются при положительных разрядах.

Повреждения, вызванные индуцированными перенапряжениями, обусловлены крутизной фронта тока молнии. Крутизна оценивается в пределах 30%-го и 90%-го уровней от наибольшего значения тока. Наибольшее значение этого параметра наблюдается в последующих импульсах отрицательных разрядов.

Значения расчетных параметров для принятых в табл. 7.1 уровней защищенности (при соотношении 10 % к 90 % между долями положительных и отрицательных разрядов) приведены в табл. 7.2.

Соответствие параметров тока молнии и уровней защиты

Параметр молнии	Уровень защиты		
	I	II	III—IV
Пиковое значение тока I , кА	200	150	100
Полный заряд $Q_{\text{полн}}$, Кл	300	225	150
Заряд в импульсе $Q_{\text{имп}}$, Кл	100	75	50
Удельная энергия W/R , кДж/Ом	10 000	5600	2500
Средняя крутизна $di/dt_{30/90}$ %, кА/мкс	200	150	100

Сопротивление рабочего ЗУ принимается $R_3 = 10$ Ом, а для зданий и сооружений I категории не более 5 Ом. Металлический заземленный стержень (молниеприемник) выполняется сечением не менее 100 мм^2 , а при нескольких молниеприемниках сечение каждого должно быть не менее 50 мм^2 .

Защитные зоны. Конструкция и зона защиты одиночного стержневого молниеотвода показана на рис. 7.4.

Размеры защищаемого объекта можно обозначить следующим образом: h_x — высота защищаемого объекта, r_x — максимальное расстояние наиболее удаленной части объекта от центра установки молниеотвода на высоте h_x . Превышение молниеотвода над за-

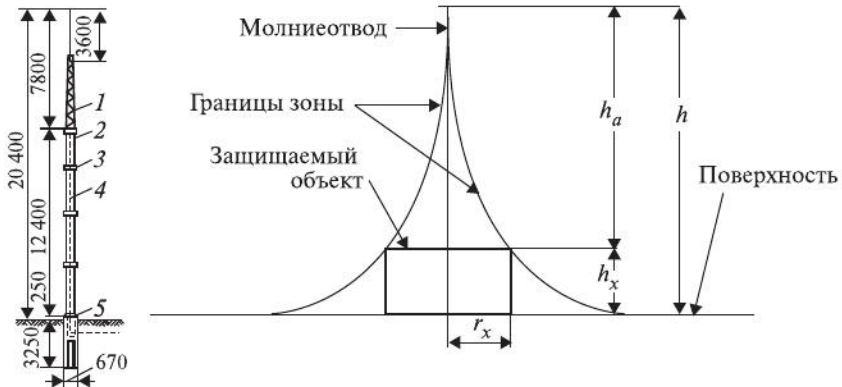


Рис. 7.4. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода (типичная конструкция стержневого молниеотвода на железобетонной опоре):

1 — металлический молниеотвод; 2 — железобетонная опора СКУВ 13/6; 3 — хомуты из алюминиевой полосы; 4 — заземляющий спуск из стальной полосы $40 \times 5 \times 18000$; 5 — железобетонный фундамент ДС10/3,5)

щищаемым объектом называется активной высотой молниеотвода h_a . Зона защиты молниеотвода образует шатер, образуемый квадратичной параболой, радиус которого на уровне h_x определяется соотношением

$$r_x = h_a \frac{1,6}{1 + \frac{h_x}{h}} p, \quad (7.1)$$

где p — коэффициент, учитывающий высоту молниеотвода при $h \geq 30$ м:

$$\begin{aligned} \text{при } h < 30 \quad p &= 1, \\ \text{при } h \geq 30 \quad p &= 5,5/\sqrt{h}. \end{aligned}$$

В последнее время появляются интересные инновационные технические решения по оборудованию молниеприемника устройством ионизации воздушной среды. По замыслу разработчиков ионизация газовой среды вокруг молниеприемника повышает проводимость среды и создает условия для существенного увеличения его зоны защиты. Вероятно, эти исследования могут быть подтверждены лабораторными экспериментами. Необходимо только иметь в виду, что разряд молнии, как правило, сопровождается шквалистым ветром и интенсивными осадками. Указанные метеоусловия естественно могут привести к деионизации воздушной среды вокруг молниеотвода.

Молниезащита объектов одиночными молниеотводами осуществляется только для отдельно стоящих зданий, сооружений, труб. Для защиты территорий или протяженных объектов используется установка нескольких стержневых молниеотводов (рис. 7.5). В этом случае имеется альтернатива: установить один отдельно стоящий «высокий» молниеотвод или два и более «низких». В этом случае нужно иметь в виду, что стоимость молниеотвода возрастает пропорционально высоте в третьей степени, поэтому, как правило, отдельно стоящие молниеотводы высотой более 30 м выполняются крайне редко при специальном технико-экономическом обосновании. Молниеотводы выполняются обычно с использованием существующих строительных конструкций, мачт для освещения, металлических и железобетонных стоек высотой до 25 м.

Защитная зона двух молниеотводов существенно расширяется. Радиус защиты r_x для внешних областей определяется, как для одиночного молниеотвода. Наименьшая ширина зоны защиты b_x между молниеотводами на уровне h_x определяется по кривым рис. 7.6.

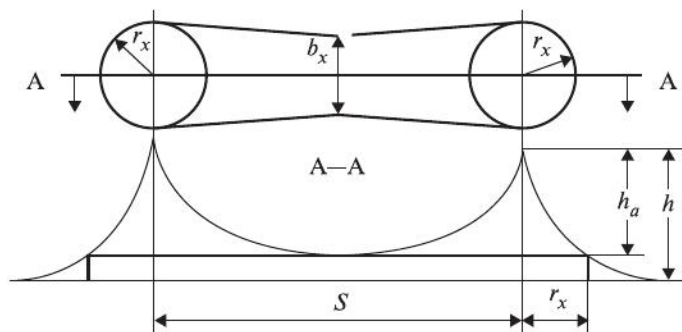


Рис. 7.5. Защитная зона двух молниеотводов

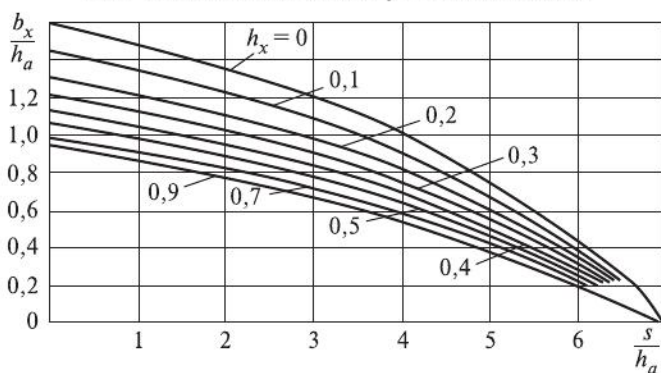


Рис. 7.6. График значений наименьшей ширины зоны защиты двух стержневых молниеотводов b_x (при $h \geq 30$ м значения обеих координат умножаются на $p = \frac{5,5}{\sqrt{h}}$)

Опыты на моделях показали, что стержневой молниеотвод обладает некоторой «зоной 100%-го поражения», в которой лидер молнии всегда развивается по направлению к молниеотводу. На высоте ориентировки молнии радиус r_x этой зоны равен примерно $3,5h_a$, где h_a — активная высота молниеотвода. Если на расстоянии $s = 7h_a$ помещен второй молниеотвод, то зоны 100%-го поражения обоих молниеотводов будут касаться друг друга.

Защитная зона двух стержневых молниеотводов при этом расширяется в два раза. Для исключения вероятности разрядов в точках, расположенных вблизи и вне касания зон, необходимо сближение молниеотводов. На этой основе определяется защитная зона двух стержневых молниеотводов, очертания которой показаны на рис. 7.5.

Защитная зона двух стержневых молниеотводов при этом расширяется в два раза. Для исключения вероятности разрядов в точках, расположенных вблизи и вне касания зон, необходимо сближение молниеотводов. На этой основе определяется защитная зона двух стержневых молниеотводов, очертания которой показаны на рис. 7.5.

Ширина зоны защиты b_x на уровне высоты защищаемого объекта определяется по кривым, приведенным на рис. 7.6, в зависимости от соотношения искомым значений s/h_a и высоты защищаемого объекта h_x . По кривым определяется отношение pb_x/h_a , откуда находится значение b_x .

При разной высоте молниеотводов зону их защиты определяют следующим образом. Вокруг молниеотвода 2 (рис. 7.7) большей высоты строится зона защиты, как для одиночного молниеотвода. Затем через вершину молниеотвода 1 меньшей высоты проводится горизонтальная прямая до пересечения с границей зоны защиты молниеотвода 2. Точку пересечения принимают за вершину фиктивного молниеотвода 3, отстоящего от первого на расстоянии $a_{\Phi} = s$. Зона защиты между молниеотводами 1 и 3 определяется так же, как для двух равных по высоте молниеотводов (рис. 7.5, 7.6), расположенных на расстоянии $s = a_{\Phi}$.

Для осуществления защиты территории при помощи трех и более молниеотводов защитные зоны и величину b_x определяют для каждой пары молниеотводов по приведенным выше соотношениям. Степень защищенности территории внутри треугольника или четырехугольника, образованного центрами установки молниеотводов (см. рис. 7.8), определяется условием

$$D \leq 8h_a p, \quad (7.2)$$

где D — диаметр окружности, построенной по трем точкам — центрам установки молниеотводов, или диагональ четырехугольника соответственно.

Для защиты зданий и сооружений могут применяться тросовые и сетчатые молниеотводы, расчет которых может быть выполнен по (7.1—7.3).

Зона защиты одиночного тросового молниеотвода имеет форму конусообразного коридора (рис. 7.9). Расстояние r_x , которое по

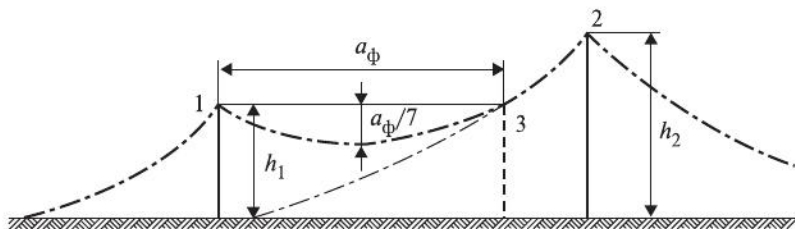


Рис. 7.7. Зона защиты двух молниеотводов разной высоты

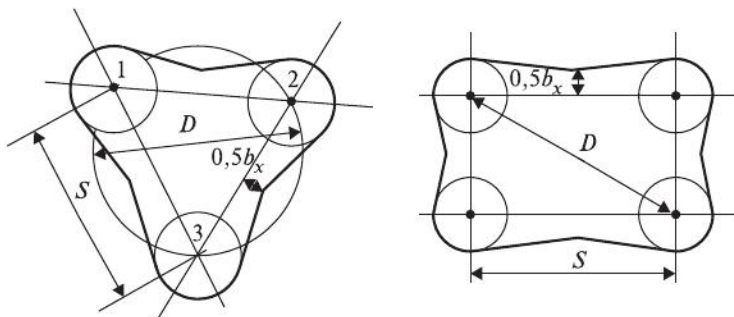


Рис. 7.8. Зоны защиты территории на высоте h_x тремя и четырьмя молниеотводами

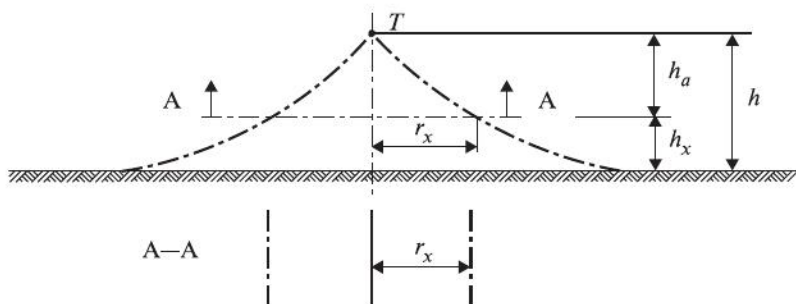


Рис. 7.9. Зона защиты тросового молниеотвода в виде конусообразного коридора аналогии с одиночными стержневыми молниеотводами, называют радиусом защиты, определяется по формуле

$$r_x = \frac{kh_a}{1 + \frac{h_x}{h}}, \quad (7.3)$$

где k — коэффициент, принимаемый равным 1,2 при защите сооружений на территории электростанции или подстанции и равным 0,8 при защите ЛЭП.

При высоте подвески тросового молниеотвода $h = 30\text{--}100$ м значение r_x умножается на $p = 5,5/\sqrt{h}$.

Тросовые молниеотводы находят широкое применение в энергосистемах для защиты от атмосферного электричества ЛЭП и сооружений подстанций. На контактной сети электрифицированного железнодорожного транспорта тросовые молниеотводы не применяются.

Пример. На рис. 7.10 показана компоновка ОРУ-110 кВ, которое требуется защитить от прямых ударов молнии. Молниеотводы

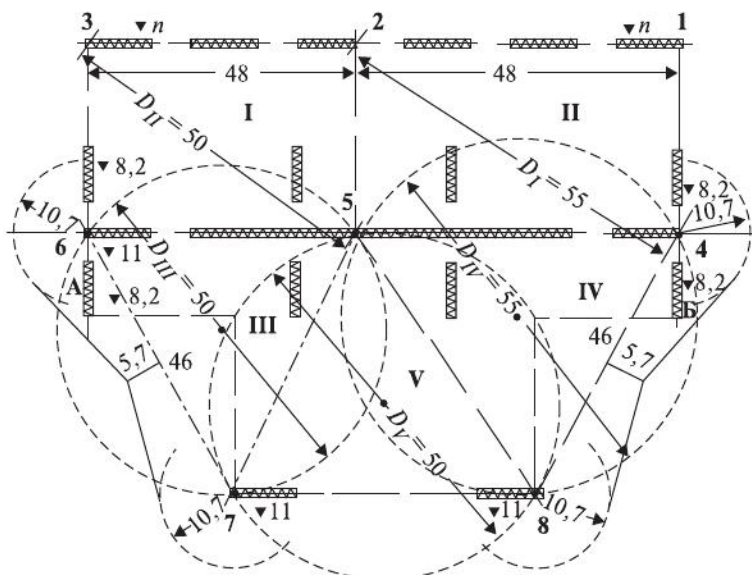


Рис. 7.10. Компонка молниеотводов ОРУ-110 кВ подстанции

устанавливаются на стационарных конструкциях ОРУ-110 подстанции. Места установки молниеотводов выбираются на основе прикидочного расчета размещения минимального числа молниеотводов с активной высотой 5—10 м. Площадь ОРУ-110 разбивается на секторы I—V, для каждого из секторов условия защиты оцениваются из соотношения (7.2).

Минимальная активная высота молниеотвода для защиты прямоугольного сектора I равна $h_a = 50/8 = 6,25$ м; для защиты прямоугольного сектора II — $h_a = 55/8 = 6,9$ м; для защиты треугольного сектора IV — $h_a = 55/8 = 6,9$ м и т.д. Для всех секторов оказывается достаточной активная высота молниеотвода $h_a = 7$ м.

Как видно из рис. 7.10, порталы А и Б, имеющие высоту 8,2 м, находятся за пределами треугольных секторов III и IV. Защищенность этих порталов от разрядов атмосферного электричества проверяется построением двойных защитных зон для стержневых молниеотводов 4—8 и 6—7 с помощью соотношения (7.1) и графиков на рис. 7.6.

При известной полной высоте молниеотводов $h = 18$ м (молниеотводы с активной высотой 7 м установлены на порталах вы-

сотой 11 м) и активной высоте молниеотвода над порталами А и Б $h_a = 18 - 8,2 = 9,8$ м определяем радиус защитной зоны (при $p = 1$):

$$r_x = 9,8 \frac{1,6}{1 + \frac{8,2}{18}} = 10,7 \text{ м.}$$

Находим b_x , экстраполируя по кривым рис. 7.6 для значений $\frac{s}{h_a} = \frac{46}{9,8} = 4,7$ и $\frac{h_x}{h} = \frac{8,2}{18} = 0,455$; $\frac{b_x}{h_a} = 0,58$, откуда $b_x = 0,58 \cdot 9,8 = 5,7$ м.

Следовательно, выполненный расчет показывает, что порталы А и Б входят в защитную зону молниеотводов.

Таким образом, рассчитывается молниезащита всех ОРУ тяговой подстанции.

7.2. Защита устройств электроснабжения от атмосферных перенапряжений

Молниеотводы. Территория и здания *тяговых подстанций постоянного тока* защищаются от разрядов атмосферного электричества молниеотводами, а подходы ЛЭП переменного тока — тросовыми молниеотводами и трубчатыми разрядниками, подключаемыми к линии вблизи ТП. От прямых ударов молнии на территории тяговой подстанции должны быть защищены: ОРУ, включая шинные мосты и гибкие связи; склады горючих и смазочных материалов; маслохозяйство и открытые маслобаки; здание подстанции или конструкции, его заменяющие. Сооружения и здания, имеющие металлические несущие конструкции кровли или металлическую кровлю, заземляют на общий контур заземления подстанции. В местах присоединения спусков к контуру заземления дополнительно устанавливаются два-три вертикальных электрода заземления. При отсутствии на зданиях указанных металлических конструкций они защищаются стержневыми молниеотводами.

Металлические и железобетонные конструкции ОРУ 110 кВ переменного тока и выше могут использоваться для установки молниеотводов. Стойки металлических конструкций (или арматура железобетонных), на которых установлены молниеотводы, должны присоединяться к заземляющему контуру ОРУ. Около стойки

с молниеотводом целесообразно устраивать дополнительные вертикальные электроды ЗУ.

Место присоединения молниеотвода к заземляющему контуру подстанции должно находиться на расстоянии не ближе 15 м от места присоединения защитных заземляющих присоединений электрического оборудования (трансформаторов, приводов разъединителей, выключателей и т.п.). Расстояние по воздуху между заземленными частями конструкции молниеотвода и токоведущими частями должно быть не меньше длины гирлянды изоляторов.

На порталах конструкций у силовых трансформаторов устанавливать молниеотводы не разрешается.

Защита ОРУ напряжением 35 кВ осуществляется стержневыми молниеотводами, имеющими индивидуальные ЗУ, обособленные от заземляющего устройства подстанции. Расстояния в земле между обособленным заземляющим устройством молниеотвода и ЗУ ТП должно быть не менее 3 м.

Для ограничения атмосферных перенапряжений, воздействующих по питающим линиям постоянного тока на выпрямительные преобразователи (ВП) или на выпрямительные инверторные преобразователи (ВИП) тяговых подстанций, используются вентильные разрядники, подключаемые к каждому фидеру КС и к шинам подстанции.

Разрядники на питающих фидерных линиях (в большинстве случаев типов РМБВ-3,3 и РМВУ-3,3) служат для ограничения *индуктированных* атмосферных перенапряжений. Опасность таких перенапряжений возрастает при наличии отключенного фидерного выключателя, так как набегающая по линии волна перенапряжения, отражаясь от разомкнутого конца линии, удваивается. Эти разрядники не предназначены для ограничения перенапряжений при прямом ударе молнии. Для предупреждения повреждения разрядников такими перенапряжениями их напряжение срабатывания увеличено до 12—13 кВ, что позволяет отстроить эти разрядники и от коммутационных перенапряжений, которые могут достигать 10—11 кВ (рис. 7.11).

Главную роль в ограничении перенапряжений от прямого удара молнии выполняет разрядник, подключаемый к шинам подстанции. Для этой цели используются разрядники РВПК-3,3 и РВПКН-3,3, которые обладают более низким напряжением срабатывания (7,5-

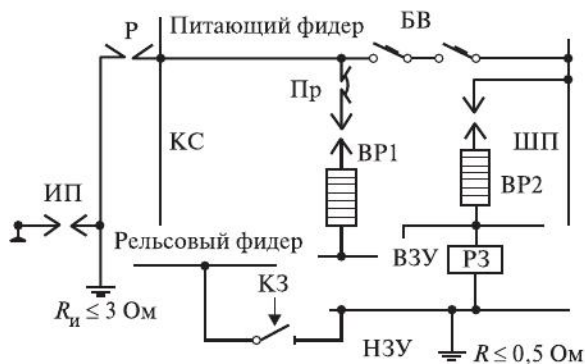


Рис. 7.11. Схема включения разрядников на тяговой подстанции постоянного тока:

КС — контактная сеть; ШП — главная плюс шина подстанции; ВЗУ — внутреннее заземляющее устройство; НЗУ — наружное заземляющее устройство; БВ — фидерные быстродействующие выключатели; РЗ — реле земляной защиты; КЗ — короткозамыкатель; Пр — плавкий предохранитель; Р — роговой разрядник; ВР1 и ВР2 — разрядники

8,5 кВ) и способностью ограничивать мощные импульсы перенапряжений. Они предупреждают срабатывание и повреждение фидерных разрядников, имеющие постоянное электрическое соединение с шинами подстанции через включенные выключатели смежных фидеров.

При близких ударах молнии в питающую линию при установленных разрядниках РВПК-3,3 на линии могут оставаться значительные напряжения, поэтому в районах с интенсивной грозовой деятельностью рекомендуется к шинам подстанции подключать не один, а несколько разрядников РВПК-3,3, что обеспечит соответствующее снижение перенапряжений.

На тяговых подстанциях постоянного тока используется сглаживающее фильтрующее устройство (ФУ), которое применяется для сглаживания пульсаций выпрямленного тока, снижения помех электрической связи и включается параллельно тяговой сети. При наличии в нем емкостного контура или при использовании для снятия перенапряжений одного из его контуров, индуктированные перенапряжения снижаются до безопасных величин. В этом случае дроссель контура, применяемого для защиты от перенапряжений, шунтируется искровым промежутком с пробивным напряжением 5—6 кВ. Для защиты электрического оборудования подстан-

ции от индуктированной волны перенапряжения с амплитудой 35 кВ подключают между шиной «плюс» и шиной «минус» тяговой подстанции конденсаторную батарею емкостью 1 мкФ, что снижает перенапряжение до 9 кВ, а при емкости 5 мкФ — до 4,5 кВ и 10 мкФ — до 3,5 кВ.

Защита от атмосферных перенапряжений ОРУ *тяговых подстанций переменного тока* осуществляется так же, как и на ТП постоянного тока. Со стороны контактной сети 25 кВ оборудование подстанции защищается вентильными и трубчатыми разрядниками. Защита фидеров контактной сети обеспечивается трубчатыми разрядниками, обмотки тягового трансформатора защищаются вентильным разрядником РВ-25, величина напряжения срабатывания которого может быть повышена до 75—80 кВ. Разрядники РВС-35, применяемые для защиты оборудования тяговой подстанции вместо РВ-25 и имеющие более высокие напряжения срабатывания не следует применять для защиты цепей переменного тока с напряжением 25 кВ.

При *прямом ударе молнии в контактную сеть* предотвратить прекращение ее изоляции, имеющей сравнительно невысокую электрическую прочность, практически невозможно. Применение тросовых и стержневых молниеотводов для защиты линий контактной сети из-за экономической нецелесообразности не практикуется ни у нас в стране, ни за рубежом.

Особенностью незащищенной линии контактной сети является наличие тока к.з., сопровождающего электрический пробой изоляции при грозовых перенапряжениях. Протекание этого тока может привести к серьезным повреждениям контактной сети и представлять собой опасность для человека.

Разрядники и ограничители перенапряжений. В контактной сети для защиты от атмосферных перенапряжений, предотвращения разрядов атмосферных перенапряжений по поверхности изоляторов и отключения сопровождающего этот процесс тока к.з. чаще всего используются *роговые разрядники*.

Роговые разрядники (рис. 7.12), срабатывая под воздействием перенапряжений, замыкают контактную сеть на рельс и тем самым обеспечивают стекание зарядов волны перенапряжения в землю. При возникновении электрической дуги постоянного тока в искровом промежутке рогового разрядника она под действием по-

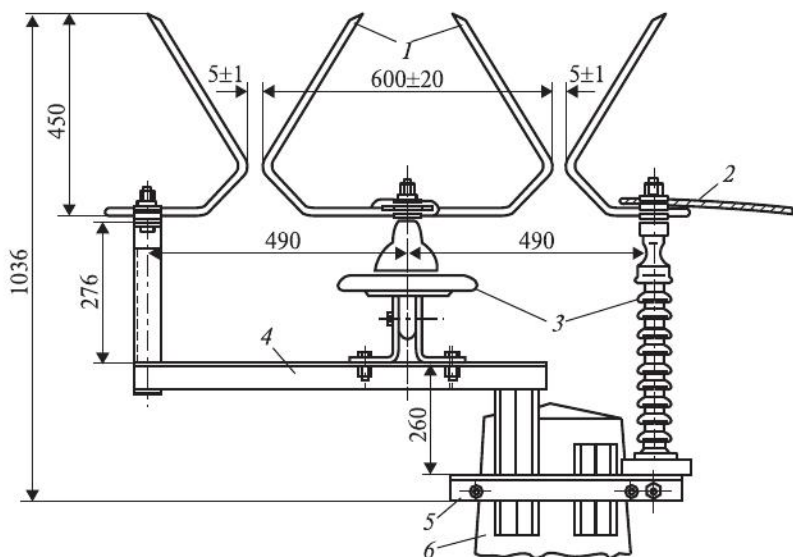


Рис. 7.12. Конструкция рогового разрядника с двумя искровыми промежутками: 1 — электроды; 2 — трос контактной сети; 3 — изоляторы; 4, 5 — кронштейны; 6 — опора КС

токов воздуха, нагреваемых электрической дугой, и собственного магнитного поля, создаваемого током дуги вблизи устья, поднимается вверх и, растягиваясь под действием неравномерного теплового потока и собственного магнитного поля, приобретает зигзагообразную форму. Дуга достигает достаточно большой длины из-за извилистой формы ее канала. Увеличение длины дуги сопровождается периодическими электрическими пробоями отдельных участков ее канала, в которых происходит интенсивная деионизация за счет быстрого перемещения дуги и рассеивания ионов неионизированными участками воздушной среды. Процесс горения дуги характеризуется резкими колебаниями тока в электрической цепи.

Существенное влияние на процесс развития дуги оказывает угол между электродами в верхней части. Оптимальным является угол $60\text{--}65^\circ$. При таком угле между электродами дуга поднимается вверх равномерно и к моменту погасания (при напряжении в контактной сети $3,3\text{--}3,8$ кВ) возвышается над концами рогов примерно на 1 м. Почти таких же размеров она достигает в горизонтальной плоскости между рогами разрядника. Дуга гаснет после того, как

общая длина ее канала превысит 4,3—4,9 м, когда градиент напряжения вдоль канала снизится ниже 800—1000 В/м.

Продолжительность горения дуги постоянного тока на роговом разряднике составляет 0,25—0,6 с при токе 1500—3000 А. Значительно снижается продолжительность горения при наличии ветра, который ускоряет процессы деионизации канала дуги. Так, при скорости движения воздуха 3 м/с в плоскости, перпендикулярной каналу дуги, продолжительность ее горения снижается в два раза, а возвышение над концами рогов — не превышает 0,5—0,7 м.

Процесс срабатывания роговых разрядников в контактной сети переменного тока значительно отличается из-за синусоидального характера переменного тока. Гашение дуги происходит в момент изменения величины тока и прохода значения тока через ноль. Горение дуги может носить перемежающийся характер в течение нескольких полупериодов переменного тока, пока импульсное перенапряжение в контактной сети не снизится ниже пробивного напряжения искрового промежутка разрядника.

Основные технические данные роговых разрядников приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Технические данные роговых разрядников

Параметры	Один промежуток			Два промежутка	
	Один промежуток	Два промежутка			
Номинальное напряжение, кВ	3,3	3,3	25		
Величина искрового промежутка, мм	10±1	5±0,5	45+5		
Пробивное напряжение 50 Гц, кВ	33±2	33±2	95+15		
Импульсное пробивное напряжение при длине волны 2—20 мкс, кВ, не более	35	25	190		
Наибольший ток отключения при номинальном напряжении, индуктивности цепи 6—14 мГн и отсутствии ветра, кА	3	7	—		
Продолжительность гашения дуги при наибольшем токе и индуктивности 6—14 мГн, с	0,25—0,6	0,2—0,6	—		

В последнее время появились конструкции *ограничителей перенапряжения*, представляющие собой разрядное устройство из нелинейных элементов на основе оксида цинка (ZnO) и имеющие нелинейную вольт-амперную характеристику, что позволило создать разрядные аппараты без последовательно включенных искровых промежутков. У нас в стране эти аппараты получили название *ограничителей перенапряжения*.

раничителей перенапряжения (ОПН), а за рубежом — безыскровых разрядников.

Ограничители напряжения обладают следующими преимуществами по сравнению с обычными разрядниками:

- низкий уровень остаточных напряжений;
- способность рассеивания большей энергии;
- увеличенная защитная зона;
- стабильность электрических характеристик;
- отсутствие переходных процессов;
- устойчивость к атмосферным загрязнениям;
- не требуют обслуживания на протяжении всего срока эксплуатации (25—30 лет);
- меньшие габариты;
- высокая стойкость к вибрационным воздействиям.

Перечисленные преимущества способствовали широкому введению этих аппаратов для защиты от грозовых и коммутационных перенапряжений в электрических установках железнодорожного транспорта (табл. 7.4).

Таблица 7.4

Места установки и типы разрядников и ограничителей перенапряжения

РУ, кВ	Место установки	Тип разрядника	Тип ОПН (Россия)	Тип ОПН (ЗАО «АББ-УЭТМ»)
220	Шины опорных подстанций, присоединение трансформатора	РВС-220 МУ1	ОПН-220 УХЛ1	EXLIM-Q216 ДН245
110	Шины опорных подстанций, присоединение трансформатора	РВС-110 МУ1	ОПН-110 УХЛ1	EXLIM-R108 АН123
35	Вводы, шины	РВС-35 У1	ОПН-35А УХЛ1	MWK 41
27,5	Вводы, шины	РВМ-1-35	ОПН-27,5 УХЛ1	MWK 33
	Фидеры контактной сети	РТВ-35-2/10У1	ОПН-27,5 УХЛ1	MWK 33
10	Вводы, шины	РВО—10У1	ОПН-10А УХЛ1	POLIM-D 14L
6	Вводы, шины	РВО—6У1	ОПН-6А УХЛ1	POLIM-D 08L
3,3	Шины	РВПК-3,3	Не применяются	Не применяются
	Фидеры контактной сети	РВКУ-3,3 БО1	ОПН-3,3 О1	POLIM-H 4,5 DC

Для ограничения перенапряжений в тяговых сетях переменного тока применяются *трубчатые разрядники*.

Основными элементами трубчатого разрядника (рис. 7.13) являются электроды, образующие наружный S_H и внутренний S_B искровые промежутки, и изоляционная трубка I из газогенерирующего материала. Внешний промежуток устанавливают с целью предупреждения протекания тока утечки по изоляционной трубке и ее интенсивного старения при длительном воздействии рабочего напряжения ЭУ. Напряжение срабатывания разрядника регулируют с помощью внутреннего электрода 4 и резьбы наконечника 5 .

Гашение дуги в трубчатом разряднике осуществляется потоком газов, выделяющихся из материала трубки при соприкосновении с ней канала дуги. В качестве газогенерирующих материалов применяются фибра, винипласт, органическое стекло, способные при высокой температуре канала дуги создать внутри разрядника поток газов давлением 5—15 МПа. Этот поток устремляется к открытому концу трубки и создает интенсивное продольное дутье, обеспечивающее гашение дуги сопровождающего тока при первом прохождении его через нулевое значение.

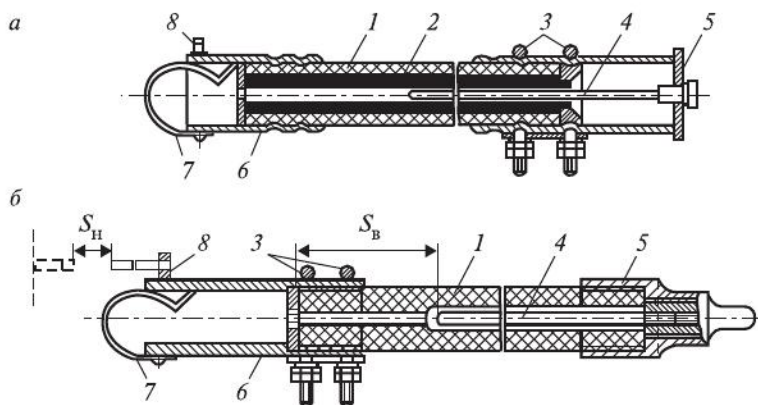


Рис. 7.13. Трубчатый фибробакелитовый разрядник типа РТ (а) и винипластовый типа РТВ (б):

I — бакелитовая трубка; 2 — фибровая трубка; 3 — хомутики для крепления разрядника; 4 — внутренний электрод; 5 — наконечник закрытой камеры; 6 — металлический цилиндр; 7 — гибкая пластина указателя срабатывания; 8 — ушко для крепления электрода внешнего искрового промежутка

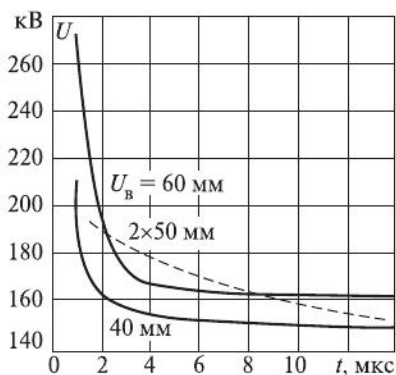


Рис. 7.14. Вольт-секундные характеристики трубчатых разрядников РТ 35/0,8-5 (сплошные линии) и роговых разрядников с двойным искровым промежутком (штриховая линия)

Трубчатые разрядники имеют ограничение по минимальному току к.з. в их цепи, ниже которого гашение дуги не гарантируется. Это связано с тем, что интенсивность выделения газов из трубки снижается с уменьшением тока, сопровождающего процесс гашения. Дугогасящая способность разрядника в целом зависит не только от материала трубки, но и от ее внутреннего диаметра, длины внутреннего искрового промежутка, объема свободного пространства у закрытого конца трубки. На рис. 7.14 приведены сравнительные вольт-секундные характеристики трубчатого и рогового разрядников.

В тяговой сети постоянного тока для защиты от атмосферных перенапряжений и сопровождающего процесс разряда атмосферного электричества тока к.з. вдоль контактной сети (через 1,5–2,0 км) устанавливают (рис. 7.15) роговые разрядники, а на фидерных выключателях применяют автоматическое повторное включение (АПВ).

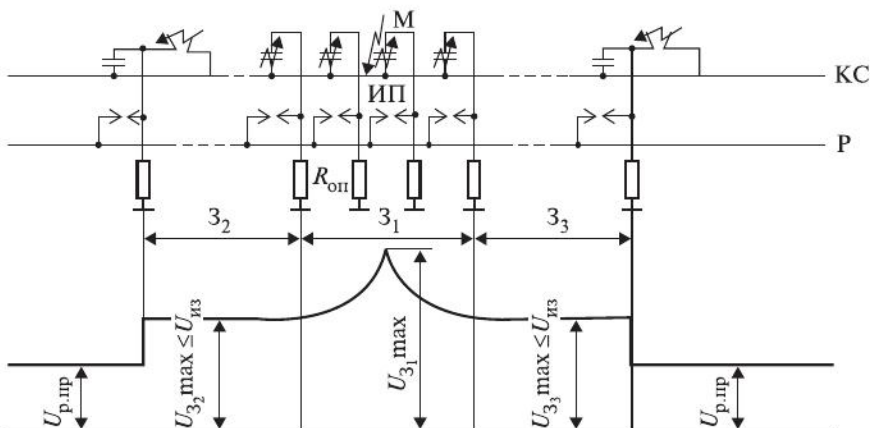


Рис. 7.15. Распределение атмосферных перенапряжений в контактной сети при прямом ударе молнии

Роговые разрядники ограничивают распространение перенапряжений вдоль контактной сети и предотвращают появление электрических разрядов по поверхности изоляторов контактной сети в месте разряда молнии, потому что после перекрытия роговых разрядников контактная сеть оказывается замкнутой на рельсы с обеих сторон от места разряда молнии.

Максимальные перенапряжения при прямом ударе молнии в контактную сеть возникают внутри участка с перекрытой изоляцией контактной сети (зона Z_1). В промежутке между крайними перекрытыми изоляторами контактной сети и перекрытыми роговыми разрядниками (зоны Z_2 и Z_3) амплитуда волны перенапряжения ограничивается уровнем изоляции контактной сети $U_{из}$, а далее за роговыми разрядниками — пробивным напряжением их воздушных промежутков $U_{р.пр} = 31—35$ кВ.

На электрифицированных участках *постоянного тока* роговые разрядники устанавливают:

- на переходных опорах всех сопряжений анкерных участков — на перегонах, а также на станционных опорах, не имеющих оттяжек, не далее двух пролетов от анкеровок и не далее одного пролета от секционных разъединителей;

- на фидерных линиях — в месте присоединения к контактной сети (по одному на каждую линию). При длине фидерных линий более 150 м устанавливают дополнительные разрядники на каждой линии не далее 100 м от начала воздушной трассы у тяговой подстанции; при большей длине линии — через 1—1,5 км;

- на трехпролетных изолирующих сопряжениях анкерных участков с нормально разомкнутыми продольными секционными разъединителями — на каждую ветвь сопряжения, а при нормальных замкнутых — на одну из ветвей с соблюдением указанных расстояний от анкеровок и секционных разъединителей;

- у искусственных сооружений, используемых для закрепления анкеровок контактной сети; при длине искусственного сооружения более 80 м — с обеих сторон сооружения, а при длине менее 80 м — с одной из сторон на расстоянии от анкеровки не далее одного пролета;

- на опорах контактной сети с обеих сторон поста секционирования.

Роговые разрядники располагают, как правило, на вершинах опор под углом $45\text{--}90^\circ$ к оси пути, что облегчает их осмотр с поезда. При необходимости расположения рогового разрядника не на вершине, а в средней части опоры, его заземляющий рог располагают со стороны опоры на расстоянии не менее 0,8 м. Наличие каких-либо проводов, тросов или изоляторов выше рогового разрядника на расстоянии менее 3 м от верхней части рогов не допускается.

На *контактной сети переменного тока* по условиям электрической прочности и для усиления изоляции применяют три, а в районах с большими загрязнениями атмосферы — четыре и пять последовательно включенных изоляторов в гирлянде (в отличие от постоянного тока, где применяются два последовательно включенных изолятора).

Более высокий уровень изоляции КС и ЭПС 25 кВ определяет меньшую опасность повреждения изоляции от атмосферных перенапряжений, что позволяет устанавливать роговые и трубчатые разрядники менее часто. Разрядники в этом случае применяют для защиты определенных объектов в следующих местах: у изолирующих вставок контактной сети в горловинах станций, на концах консольных участков контактной сети, в местах присоединения фидерных питающих линий к контактной сети, в местах присоединения к линиям ДПР потребителей, у отсасывающих трансформаторов и т.п. Из-за недолговечности и необходимости тщательного ухода в настоящее время трубчатые разрядники на контактной сети используются достаточно редко, вместо них применяют роговые разрядники с двойным искровым промежутком.

Для защиты от перенапряжения в контактной сети переменного 27,5 кВ и постоянного тока 3,3 кВ в последнее время часто применяют ограничители перенапряжения (см. табл. 7.4).

7.3. Защита ЭПС от атмосферных перенапряжений

На электроподвижном составе железных дорог повсеместно применяют для защиты от атмосферных и коммутационных перенапряжений вентильные разрядники различных типов и схемы включения конденсаторов и дросселей.

Так, для защиты *моторных вагонов электропоездов постоянного тока* применяется схема, включающая вентильные разрядники

1, 4; дроссель 2 и конденсатор 3 для защиты от радиопомех и для защиты витковой изоляции обмоток двигателей от перенапряжений (рис. 7.16).

По рекомендации ЦНИИ МПС на электропоездах постоянного тока стали устанавливать на каждом моторном вагоне по два вентильных разрядника: один до дросселя, другой после него параллельно входной емкости. Для защиты изоляции оборудования ЭПС от атмосферных и коммутационных перенапряжений наиболее рациональной является схема использования вентильных разрядников, показанная на рис. 7.16: первого — у токоприемников с повышенной уставкой 9,5—10 кВ для защиты крышевого оборудования от атмосферных перенапряжений и второго — за дросселем с пониженной уставкой 7,5—8,5 кВ, рассчитанного на ограничение мощных коммутационных перенапряжений и большое число срабатываний.

В качестве первого может применяться разрядник РМВУ-3,3; в качестве второго — разрядник РВПКН-3,3. В случаях низкого качества изоляции тяговых двигателей для ограничения коммутационных перенапряжений может быть применен разрядник с еще более низкой уставкой (6—7 кВ).

На электропоездах с несколькими моторными вагонами защита от атмосферных перенапряжений облегчается за счет срабатывания одновременно нескольких параллельно включенных разрядников на разных вагонах.

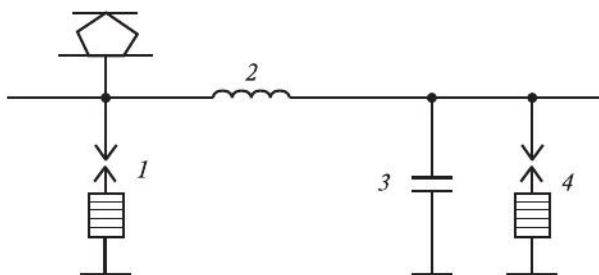


Рис. 7.16. Схема включения вентильных разрядников на моторном вагоне электропоезда ЭР2:

1 — вентильный разрядник РМВУ-3,3; 2 — дроссель индуктивностью $L = 500$ мкГн, $L = 200$ мкГн на электровозе; 3 — конденсатор емкостью $C = 0,5$ —1,0 мкФ; 4 — вентильный разрядник РВПКН-3,3

Защита электрооборудования ЭПС переменного тока от атмосферных и коммутационных перенапряжений имеет особенности из-за наличия силовой преобразовательной установки — выпрямителя.

Для защиты от перенапряжений применяют: вентильный разрядник на первичной стороне трансформатора, вентильный разрядник на вторичной стороне трансформатора, вентильный разрядник на стороне постоянного тока.

Целесообразно включать разрядник на первичной стороне между разъединителем главного выключателя и его дугогасительными контактами ГВ, автоматически замыкающимися после срабатывания выключателя. В этом случае разрядник ограничивает коммутационные перенапряжения, вызываемые отключением воздушного выключателя, и защищает цепь высокого напряжения от атмосферных перенапряжений при разомкнутом главном выключателе.

Существенно облегчает условия работы (рис. 7.17) разрядника 1 шунтирование дугогасительных контактов ГВ нелинейным резистором 2. Его применение уменьшает амплитуду тока в момент отключения ГВ, что снижает амплитуду коммутационных перенапря-

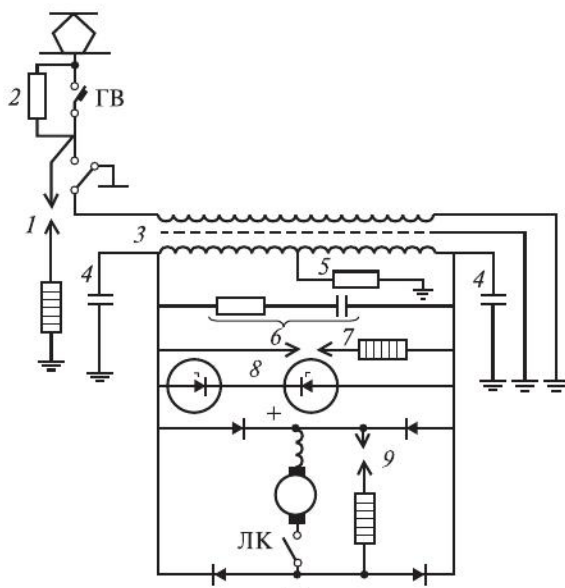


Рис. 7.17. Схема возможных способов включения элементов защиты от перенапряжения силового оборудования ЭПС переменного тока

жений, возникающих на обмотках трансформатора 3. Применение вентильного разрядника 1 и нелинейного резистора 2 не исключает возникновение опасных перенапряжений на вторичной обмотке трансформатора 3 и подключенном к ней оборудовании. Эти перенапряжения возникают из-за наличия емкостной связи между первичной и вторичной обмотками трансформатора, и их можно почти полностью устранить, поместив между ними заземленный металлический экран. Такое решение усложняет конструкцию и увеличивает габариты трансформатора, поэтому для снижения емкостной составляющей перенапряжения наряду с вилитовыми разрядниками 7 и 9 применяют заземляющие конденсаторы 4 и заземляющие резисторы 5.

Включение дополнительных конденсаторов между выводами вторичной обмотки трансформатора вызывает понижение магнитной составляющей напряжения. Шунтирующие контуры РС 6 не позволяют ограничивать перенапряжение на выводах вторичной обмотки трансформатора строго в заданных пределах, с этой целью применяются вентильные разрядники 7 и полупроводниковые разрядники 8.

На ЭПС переменного тока различных типов и серий защита от перенапряжений имеет свои особенности (рис. 7.18).

Высокий уровень изоляции крышевого оборудования ЭПС переменного тока, близкого по величине к уровню изоляции контактной сети, объясняет включение на локомотивах всех типов вентильного разрядника 5 за дросселем ДП. Такое включение способствует ограничению перенапряжений на изоляции главного выключателя ГВ и трансформатора.

На электропоездах для ограничения коммутационных перенапряжений на кабельных вводах, вызывающих отключение главного выключателя ГВ, вентильные разрядники 5 включают в среднюю точку между дугогасительными контактами ГВ и контактами отделителя напряжения. Это способствует повышению надежности работы кабельного ввода, но повышает интенсивность работы вентильного разрядника РВЭ-25.

Основные типы применяемых аппаратов защиты от перенапряжений в схемах ЭПС (рис. 7.18) и значения их параметров приведены в табл. 7.5, в которой цифрами 5, 7, 8 обозначены только применяемые типы разрядников.

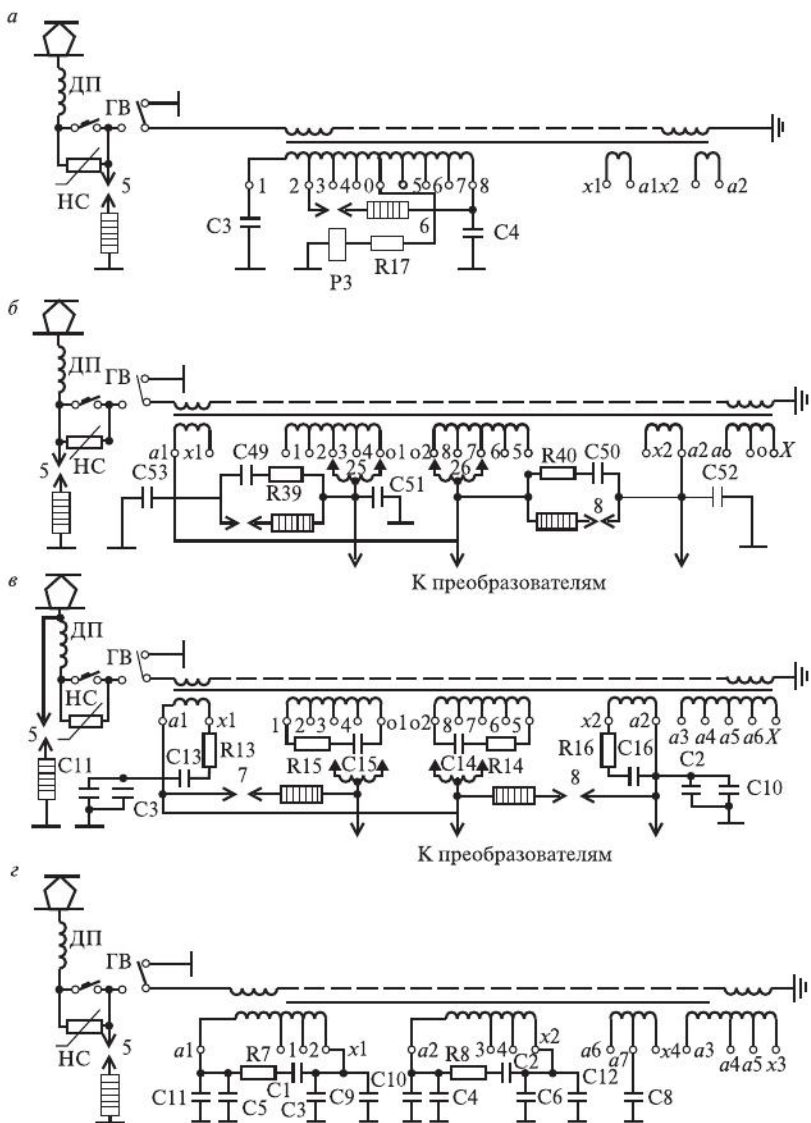


Рис. 7.18. Принципиальные схемы включения аппаратов защиты от перенапряжений на ЭПС переменного тока:

a — на электропоездах ЭР9 и ЭР9П; *б* — на электровозах ВЛ60 и ВЛ60^К; *в* — на электровозах ВЛ80^К; *z* — на электровозах ВЛ80^Т

Типы аппаратов защиты от перенапряжений в ЭПС переменного тока

Тип и серия ЭПС	Обозначения на схеме рис. 7.18	Тип аппаратов	Параметры аппаратов
ЭР9 ЭР9П (рис. 7.18, а)	5 НС 7 РЗ (реле заземления) Р17 С3, С4	РВЭ-25 ВНКС-25 РВМК-V РЭВ-2112/11 АС-16А-1 КБГП-6-1,1	$U_{\text{пр}50} = 58-66$ кВ $U_{\text{пр}50} = 3,9-4,7$ кВ 4,8 Ом 1 мкФ; $U_{\text{НОМ}} = 6$ кВ
ВЛ60 ^К ВЛ60 ^П (рис. 7.18, б)	5 НС 7, 8 С49, С50 С51, С52, С53 R39, R40	РВЭ-25 ВНКС-25 РВМК-V КБГ-П2-6-1 КБГ-П2-6-1 СР-13	$U_{\text{пр}50} = 58-66$ кВ $U_{\text{пр}50} = 3,9-4,7$ кВ 10 мкФ; $U_{\text{НОМ}} = 6$ кВ 1 мкФ; $U_{\text{НОМ}} = 6$ кВ 4,8 Ом
ВЛ80 ^К (рис. 7.18, в)	5 НС 7, 8 С11, С2, С10, С13 С3, С14, С15, С16 R7, R8	РВЭ-25 ВНКС-25 РВМК-IV КБГ-П2-6-1 КБГ-Г12-6-1 СР-10	$U_{\text{пр}50} = 58-66$ кВ $U_{\text{пр}50} = 2,2-2,7$ кВ 6 мкФ; $U_{\text{НОМ}} = 6$ кВ 1 мкФ; $U_{\text{НОМ}} = 6$ кВ 5,3 Ом
ВЛ80 ^Т (рис. 7.18, з)	5 НС С1, С2, С3, С4 С9, С10, С11, С12 С5, С6, С8 7, 8 R13, R14, R15, R16	РВЭ-25М ВНКС-25 КБГ-П2-6 КБГ-П1-10-0,01 КБГ-П2-3-6 РВМК-IV СР-13	$U_{\text{пр}50} = 58-66$ кВ 1 мкФ; $U_{\text{НОМ}} = 6$ кВ 0,01 мкФ; $U_{\text{НОМ}} = 10$ кВ 12 мкФ; $U_{\text{НОМ}} = 3$ кВ $U_{\text{пр}50} = 2,2-2,7$ кВ 2,4 Ом

7.4. Защита от статического электричества

Под *статическим электричеством* в технике понимают совокупность явлений, связанных с возникновением, сохранением и релаксацией свободного электрического заряда на поверхности и в объеме диэлектрических и полупроводниковых веществ, материалов и изделий или на изолированных проводниках (в том числе диспергированных в диэлектрической среде).

Электрические заряды возникают главным образом в диэлектриках и на поверхности плохо проводящих тел в результате трения диэлектрических твердых тел друг о друга, при переливании

и движении диэлектрических жидкостей, при размельчении твердых диэлектриков, их просеивании и т.п.

Образование статического электричества происходит в результате процесса перераспределения электронов и ионов диэлектрика при соприкосновении двух разных веществ таким образом, что на поверхности образуется двойной электрический слой зарядов с противоположными знаками. Этот электрический заряд Q можно представить в виде заряда эквивалентной емкости $Q = UC$, где U — напряжение двойного слоя, V ; C — емкость эквивалентного двойному слою конденсатора, Φ .

Увеличение разности потенциалов между двумя заряженными телами может привести к электрическому пробое среды между ними. Градиент пробивного напряжения сухого воздуха составляет около 3 кВ/мм. При достижении разности потенциалов между заряженными телами градиента напряжения, превышающего градиент пробивного напряжения, между ними происходит электрический разряд с энергией $E = 0,5CU^2$, Дж.

Появление электрического искрового разряда между телом человека и другим заряженным телом или заземленными конструкциями вызывает болезненные ощущения, вредное воздействие таких разрядов на организм человека еще недостаточно изучено, опасных воздействий не выявлено. Значительную опасность электрический искровой разряд статического электричества представляет при возможном воспламенении смесей паров, газов, аэрозолей и пыли с воздухом, так как возникает опасность пожара, взрыва и, следовательно, неблагоприятного воздействия на человека.

Электрический разряд в газах, газовых смесях и других материалах возможен при достаточно высоком удельном электрическом сопротивлении веществ ($\rho \geq 10^4$ Ом·м). Заряд статического электричества может накапливаться на движущихся телах, механизмах и аппаратах при использовании органических веществ и синтетических волокон.

Заряды статического электричества в производственных условиях возникают и накапливаются при работе ременных передач и транспортерных лент (при скорости движения $v = 15$ м/с потенциал может достигать 70—80 кВ); при транспортировке диэлектрических жидкостей в незаземленных емкостях и по трубопроводам, изолированным от земли (при скорости протекания бензина по трубоп-

роводу $v = 0,5$ м/с на расстоянии 25 м от насоса потенциал может достигать 1000 В); при сливе-наливе, особенно в случаях подачи жидкости свободно падающей струей (потенциал на незаземленной емкости может достигать 200 кВ); при движении по трубопроводу и выходе из сопла сжатых и сжиженных газов; при перемешивании веществ в смесителях и при других процессах, связанных с трением. Пожароопасными производствами с точки зрения возможного искрообразования из-за разрядов статического электричества являются производства бумаги и синтетических пленок, типографское производство.

Статические электрические заряды могут накапливаться на поверхности тела человека, после чего могут происходить разряды статического электричества на заземленные конструкции или на другие тела с зарядом противоположного знака. Это сопровождается достаточно неприятными болезненными ощущениями колющего характера в месте разряда. Наиболее вероятно, что эти ощущения связаны с высокой температурой плазмы электрического разряда и представляют собой микроскопический ожог поверхности тела. С точки зрения электробезопасности это явление не представляет большой угрозы для жизнедеятельности организма, так как электрические процессы протекания тока не затрагивают внутренних тканей организма. В то же время такие разряды представляют большую опасность как зажигающая или инициирующая взрыв искра при наличии воспламеняющихся материалов.

Допустимые уровни напряженности электростатических полей установлены в ГОСТ 12.1.045-84. «Электростатические поля» и зависят от продолжительности пребывания на рабочих местах. Предельно допустимый уровень напряженности электростатических полей ($E_{\text{пред}}$) равен 60 кВ/м в течение 1 ч. При напряженности электростатических полей менее 20 кВ/м время пребывания в электростатических полях не регламентируется.

Продолжительность пребывания персонала в электростатическом поле без средств защиты $t_{\text{доп}}$ в часах определяется по формуле

$$t_{\text{доп}} = \left(\frac{E_{\text{пред}}}{E_{\text{факт}}} \right)^2,$$

где $E_{\text{факт}}$ — фактическое значение напряженности электростатического поля, кВ/м.

Основными техническими мерами защиты от возможного проявления статического электричества в виде электрических искровых разрядов являются: защитное заземление оборудования, резервуаров, трубопроводов и т.п.; установка металлических заземленных щеток, касающихся транспортных, синтетических, бумажных и др. лент при их движении; общее и местное увлажнение окружающего воздуха в помещениях (повышение относительной влажности до 75 %); устройство проводящих полов и заземленных площадок для автоматического снятия зарядов с людей; ионизация воздуха помещения; применение электропроводящих защитных смазок для покрытия наружных поверхностей из синтетических материалов, ременных передач, транспортерных лент; очистка жидкостей от коллоидных включений, очистка газовых смесей от взвешенных твердых и жидких частиц материалов с диэлектрическими свойствами.

Примерные тестовые вопросы

*для проведения экзамена обслуживающего персонала
на V группу по электробезопасности*

А. Общие требования нормативно-технических документов

1. На какие электроустановки распространяются требования Правил устройства электроустановок (ПУЭ)?

а) Только на электроустановки переменного тока напряжением до 380 кВ.

б) На вновь сооружаемые и реконструируемые электроустановки постоянного и переменного тока напряжением до 750 кВ, в том числе на специальные электроустановки.

в) На сооружаемые электроустановки постоянного и переменного тока напряжением до 750 кВ.

г) На все электроустановки.

2. Требованиям каких нормативно-технических документов должно соответствовать устройство электроустановок?

а) ПУЭ, ПТЭЭП, ПОТЭЭ, ГОСТ, СП и другим нормативно-техническим документам.

б) ПУЭ, ПТЭЭП, ПОТ ЭЭ, ГОСТ и РД.

в) ПУЭ и ГОСТ.

г) ПУЭ, ПТЭ ЭП, ГОСТ и СП.

3. Как подразделяются электроустановки переменного тока по условиям электробезопасности?

а) Электроустановки напряжением до 50 В, до 1000 В и выше 1000 В.

б) Электроустановки напряжением до 10 кВ и выше 10 кВ.

в) Электроустановки напряжением до 50 В и выше 380 В.

г) Электроустановки напряжением до 1000 В и выше 1000 В.

4. Какая электроустановка считается действующей?

а) Исправная электроустановка.

б) Электроустановка или ее часть, которая находится под напряжением либо на которую напряжение может быть подано включением коммутационных аппаратов.

в) Электроустановка, которая находится в постоянной эксплуатации.

г) Любая электроустановка, которая находится под напряжением 220 В и выше.

5. На какие субъекты распространяется действие Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей?

а) На организации, независимо от форм собственности и организационно-правовых форм, индивидуальных предпринимателей и граждан — владельцев электроустановок напряжением выше 1000 В, эксплуатирующие действующие электроустановки напряжением до 220 кВ включительно.

б) На организации, независимо от форм собственности и организационно-правовых форм, эксплуатирующие действующие электроустановки напряжением до 220 кВ включительно.

в) На организации, независимо от форм собственности и организационно-правовых форм, на индивидуальных предпринимателей, эксплуатирующих действующие электроустановки напряжением до 220 кВ включительно, а также на электроустановки электрических станций, блок-станций.

г) На организации, независимо от форм собственности и организационно-правовых форм, индивидуальных предпринимателей, эксплуатирующим действующие электроустановки.

6. За что несут персональную ответственность работники, непосредственно обслуживающие электроустановки?

а) За несвоевременное и неудовлетворительное техническое обслуживание электроустановок.

б) За нарушения, произошедшие по их вине, а также за неправильную ликвидацию ими нарушений в работе электроустановок на обслуживаемом участке.

в) За невыполнение требований должностной инструкции.

г) За допущенные нарушения при эксплуатации электротехнологического оборудования.

7. За что несут персональную ответственность руководитель Потребителя и работник, ответственный за электрохозяйство?

а) За невыполнение требований, предусмотренных Правилами и должностными инструкциями.

б) За неправильную (не соответствующую Правилам) ликвидацию ими нарушений в работе электроустановок на обслуживаемом участке.

в) За нарушения в работе электроустановок из-за несвоевременного и неудовлетворительного технического обслуживания и невыполнения противоаварийных мероприятий.

г) За допущенные нарушения при эксплуатации электротехнологического оборудования.

8. Какому административному штрафу могут быть подвергнуты должностные лица организации за повреждение ВЛ напряжением выше 1000 В?

а) От трех до четырех тысяч рублей.

б) От десяти до пятнадцати тысяч рублей.

в) От двух до трех тысяч рублей.

г) От пяти до десяти тысяч рублей.

9. Как классифицируются помещения в отношении опасности поражения людей электрическим током?

а) Помещения без повышенной опасности, помещения с повышенной опасностью, опасные помещения, особо опасные помещения.

б) Помещения без повышенной опасности, помещения с повышенной опасностью, опасные помещения.

в) Помещения без повышенной опасности, помещения с повышенной опасностью, особо опасные помещения и территория открытых электроустановок.

г) Неопасные помещения, помещения с повышенной опасностью, опасные помещения, особо опасные помещения.

10. Как обозначаются нулевые рабочие (нейтральные) проводники в электроустановках до 1 кВ системы TN-S?

а) Обозначаются буквой N и зеленым цветом.

б) Обозначаются буквой N и белым цветом.

в) Обозначаются буквой N и голубым цветом.

г) Обозначаются буквой N и желтым цветом.

Б. Персонал электроустановок и его подготовка

1. На какие функциональные группы подразделяется электротехнический персонал организации?

а) Оперативный, административный и ремонтный.

б) Административно-технический и оперативно-ремонтный.

в) Оперативный, административно-технический, оперативно-ремонтный и ремонтный.

з) Оперативный, оперативно-ремонтный и ремонтный.

2. Как часто проводится проверка знаний по электробезопасности для электротехнического персонала?

а) Не реже одного раза в год.

б) Периодичность определяет руководитель.

в) Не реже одного раза в три года.

г) Не реже одного раза в пять лет.

3. Какую периодичность повышения квалификации должен обеспечивать работодатель для персонала?

а) Не реже одного раза в год.

б) Не реже одного раза в три года.

в) Не реже одного раза в пять лет.

г) Не реже одного раза в десять лет.

4. Когда проводится внеочередная проверка знаний персонала?

а) При введении в действие у Потребителя новых или переработанных норм и правил.

б) По требованию органов государственного надзора и контроля.

в) При перерыве в работе в данной должности более 6 месяцев.

г) В любом из перечисленных случаев.

5. В течении какого срока (количество смен) должна проводиться стажировка электротехнического персонала на рабочем месте до назначения на самостоятельную работу?

а) От 2 до 4; б) от 2 до 10; в) от 2 до 12; г) от 2 до 14.

6. В течении какого срока (количество смен) проводится дублирование перед допуском оперативного электротехнического персонала к самостоятельной работе?

а) От 2 до 4 смен; б) от 2 до 10; в) от 2 до 12; г) от 2 до 14 смен.

7. Какую группу электробезопасности должен иметь ответственный за электрохозяйство в электроустановках напряжением до 1000 В?

а) Вторую; б) третью; в) четвертую; г) пятую.

8. Какую группу электробезопасности должен иметь ответственный за электрохозяйство в электроустановках напряжением выше 1000 В?

а) Вторую; б) третью; в) четвертую; г) пятую.

9. Какой минимальный стаж работы в предыдущей группе должен быть у работника с высшим электротехническим образованием для перехода с четвертой группы электробезопасности на пятую?

а) 3 месяца; б) 6 месяцев; в) 12 месяцев; г) не нормируется.

10. Какую группу по электробезопасности должен иметь председатель комиссии по проверке знаний электротехнического персонала Потребителя с электроустановками выше 1000 В?

а) Третью при проверке знаний персонала на 3 группу.

б) Четвертую.

в) Пятую.

г) Четвертую или пятую при проверке знаний персонала на 4 группу.

В. Организация безопасного производства работ

1. Кто имеет право единоличного обслуживания электроустановок переменного тока напряжением до 1000 В?

а) Работники из числа оперативного или оперативно-ремонтного персонала организации, имеющие группу по электробезопасности не ниже III.

б) Работники из числа ремонтного персонала организации, имеющие группу по электробезопасности не ниже III.

в) Работники из числа оперативного или оперативно-ремонтного персонала организации, имеющие группу по электробезопасности не ниже II.

г) Работники из числа оперативного или оперативно-ремонтного персонала организации, имеющие группу по электробезопасности II или III.

2. Кто имеет право проводить единоличный осмотр электроустановок переменного тока напряжением выше 1000 В?

а) Работник из числа оперативного персонала, имеющий группу по электробезопасности не ниже III, либо работник из числа административно-технического персонала, имеющий группу не ниже V.

б) Работник из числа оперативного персонала, имеющий группу по электробезопасности не ниже IV, либо работник из числа административно-технического персонала, имеющий группу не ниже V.

в) Только работник из числа оперативного персонала, имеющий группу по электробезопасности не ниже IV.

з) Только работник из числа административно-технического персонала, имеющий группу не ниже IV.

3. Какие мероприятия из перечисленных относятся к организационным мероприятиям, обеспечивающим безопасность работ?

а) Оформление работ нарядом, распоряжением или перечнем работ, выполняемых в порядке текущей эксплуатации.

б) Допуск к работе и надзор во время работы.

в) Оформление перерыва в работе, перевода на другое место, окончания работы.

г) Любое из перечисленных мероприятий относится к организационным мероприятиям, обеспечивающим безопасность работ.

4. На какой срок (количество календарных дней со дня начала работы) выдается наряд на производство работ в электроустановках?

а) Не более 5 дней; б) не более 10 дней; в) не более 15 дней; г) не более 20 дней.

5. На какой срок (количество календарных дней со дня продления) может быть продлен наряд на производство работ в электроустановках?

а) Не более 5 дней; б) не более 10 дней; в) не более 15 дней; г) не более 20 дней.

6. Кто имеет право выдавать наряды и распоряжения в электроустановках напряжением выше 1000 В?

а) Работники из числа административно-технического персонала организации, имеющие группу V.

б) Работники из числа оперативного персонала организации, имеющие группу V.

в) Работники из числа административно-технического персонала организации, имеющие группу IV.

г) Ответственный за электрохозяйство организации.

7. На какой срок (количество календарных дней со дня начала работы) выдается распоряжение на производство работ в электроустановках?

а) Не более 5 дней; б) не более 10 дней; в) распоряжение носит разовый характер, срок его действия определяется продолжительностью рабочего дня исполнителей; г) не более 20 дней.

8. Какие работы из перечисленных можно отнести к работам, выполняемым в порядке текущей эксплуатации в электроустановках напряжением до 1000 В?

а) Снятие и установка электросчетчиков, других приборов и средств измерений.

б) Ремонт пусковой и коммутационной аппаратуры, установленной на щитках.

в) Замена ламп и чистка светильников на высоте более 2,5 м.

г) Любые из перечисленных работ.

9. Кто должен назначаться допускающим в электроустановках?

а) Работник из числа оперативного персонала.

б) Работник из числа ремонтного персонала.

в) Работник из числа оперативно-ремонтного персонала.

г) Работник из числа административно-технического персонала.

10. Какую группу по электробезопасности должен иметь допускающий к работе в электроустановках?

а) В электроустановках до 1000 В — третью, а в электроустановках свыше 1000 В — четвертую.

б) В электроустановках до 1000 В — четвертую, а в электроустановках свыше 1000 В — пятую.

в) Во всех электроустановках — третью.

г) Во всех электроустановках — четвертую.

Г. Организация учета энергопотребления

1. Кто в организации ведет наблюдение за работой счетчиков электрической энергии?

а) Оперативный персонал.

б) Административно-технический персонал.

в) Электротехнический персонал.

г) Электротехнологический персонал.

2. Кто должен осуществлять плановую поверку электрических счетчиков?

а) Энергоснабжающая организация.

б) Собственник приборов учета по согласованию с энергоснабжающей организацией.

в) Органы энергонадзора.

г) Органы стандартизации и метрологии, которые находятся по месту регистрации собственника приборов учета электрической энергии.

3. Кто должен осуществлять замену расчетных электрических счетчиков?

а) Энергоснабжающая организация.

б) Собственник приборов учета по согласованию с энергоснабжающей организацией.

в) Органы энергонадзора.

г) Органы стандартизации и метрологии, которые находятся по месту регистрации собственника приборов учета электрической энергии.

4. Кто должен осуществлять установку и замену измерительных трансформаторов тока и напряжения?

а) Энергоснабжающая организация.

б) Персонал потребителя по согласованию с энергоснабжающей организацией.

в) Органы энергонадзора.

г) Органы стандартизации и метрологии, которые находятся по месту регистрации собственника приборов учета электрической энергии.

5. Какой класс точности должен быть у расчетных счетчиков активной электроэнергии для непромышленных объектов?

а) 2,0; б) 1,0; в) 1,5; г) 2,5.

6. Как производится учет электроэнергии во время ремонта средств учета?

а) По усредненным данным, полученным за последние три месяца.

б) На время ремонта должны быть установлены резервные средства учета.

в) В этот период учет электроэнергии не производится.

г) По установленной мощности приемников электрической энергии.

7. Какая группа электробезопасности должна быть у производителя работ при испытании электрооборудования?

а) Не ниже третьей.

б) Не ниже четвертой.

в) Не ниже пятой.

г) От третьей и выше.

8. Мегомметром какого напряжения производится измерение сопротивления изоляции при испытании цепей до 500 В?

а) 500 В; б) 1000 В; в) 1500 В; г) 2500 В.

9. Каким образом проводится проверка цепи фаза—ноль в электроустановках до 1000 В с системой TN?

а) Непосредственным измерением тока однофазного замыкания на корпус.

б) Непосредственным измерением тока однофазного замыкания на нулевой защитный проводник.

в) Измерением полного сопротивления цепи фаза—нулевой защитный проводник с последующим вычислением тока однофазного замыкания.

г) Любым из указанных способов.

10. Какая надпись должна быть выполнена на счетчике электрической энергии?

а) Надпись, указывающая наименование владельца счетчика.

б) Надпись, указывающая наименование присоединения, на котором производится учет электроэнергии.

в) Надпись, указывающая наименование энергоснабжающей организации.

г) Надпись, указывающая наименование организации-поверителя.

Д. Заземление и защитные меры электробезопасности

1. Какое определение напряжению прикосновения дано в ПУЭ?

а) Напряжение между двумя проводящими частями или между проводящей частью и землей при одновременном прикосновении к ним человека или животного.

б) Напряжение между двумя точками земли, обусловленное растеканием тока замыкания на землю, при одновременном касании их ногами человека.

в) Напряжение, возникающее при протекании тока по проводнику между двумя точками.

г) Напряжение между двумя точками электрической цепи с разным потенциалом.

2. Какое определение напряжению шага дано в ПУЭ?

а) Напряжение между двумя точками земли, обусловленное растеканием тока замыкания на землю, при одновременном касании их ногами человека.

б) Напряжение между двумя проводящими частями или между проводящей частью и землей при одновременном прикосновении к ним человека или животного.

в) Напряжение между двумя точками на поверхности земли на расстоянии 1 м одна от другой, которое принимается равным длине шага человека.

г) Напряжение между двумя точками электрической цепи на поверхности земли с разными потенциалами.

3. Какая из перечисленных защитных мер применяется для защиты людей от поражения электрическим током при косвенном прикосновении в случае повреждения изоляции?

- а) Установка барьеров.
- б) Защитное заземление.
- в) Ограждения и оболочки.
- г) Основная изоляция токоведущих частей.

4. Каким должно быть сопротивление заземлителя нейтрали источника питания при линейном напряжении 380 В трехфазного тока?

а) Не более 2 Ом; б) не более 4 Ом; в) не более 6 Ом; г) не более 8 Ом.

5. Какие трубопроводы могут быть использованы в качестве естественных заземлителей?

- а) Металлические трубы водопровода, проложенные в земле.
- б) Трубопроводы горючих газов и смесей, проложенные в земле.
- в) Трубопроводы канализации, проложенные в земле.
- г) Трубопроводы отопления, проложенные в земле.

6. Какая система защитного зануления и отключения относится к системе TN-C?

а) Система, в которой нейтраль источника питания глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки присоединены к глухозаземленной нейтрали источника посредством нулевых защитных проводников.

б) Система, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники разделены на всем ее протяжении.

в) Система, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники совмещены в одном проводнике на всем ее протяжении.

г) Система, в которой функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников совмещены в одном проводнике в какой-то ее части, начиная от источника питания.

7. Какая система защитного зануления и отключения относится к системе TN-S?

а) Система, в которой нейтраль источника питания глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки присоединены к глухозаземленной нейтрали источника посредством нулевых защитных проводников.

б) Система, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники разделены на всем ее протяжении.

в) Система, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники совмещены в одном проводнике на всем ее протяжении.

з) Система, в которой функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников совмещены в одном проводнике в какой-то ее части, начиная от источника питания.

8. В качестве РЕ-проводников в электроустановках напряжением до 1000 В могут использоваться?

а) Стальные трубы электропроводок.

б) Свинцовые оболочки кабелей.

в) Трубы канализации и центрального отопления.

г) Водопроводные трубы при наличии в них изолирующих вставок.

9. При каком напряжении питания разрешается применять переносные электроприемники переменного тока?

а) Только при напряжении сети 12 В.

б) Только при напряжении сети 42 В.

в) Только при напряжении 380/220 В.

г) При всех указанных напряжениях сети.

10. Какова периодичность осмотров заземляющих устройств с выборочным вскрытием грунта?

а) По графику, но не реже одного раза в три года.

б) По графику, но не реже одного раза в 6 лет.

в) По графику, но не реже одного раза в 9 лет.

г) По графику, но не реже одного раза в 12 лет.

Е. Средства защиты электротехнического персонала

1. Какие средства защиты относятся к основным изолирующим электрозачитным средствам для электроустановок напряжением до 1000 В?

а) Изолирующие штанги всех видов, изолирующие клещи, указатели напряжения, электроизмерительные клещи, диэлектрические перчатки, ручной изолирующий инструмент.

б) Изолирующие штанги всех видов, изолирующие клещи, указатели напряжения, электроизмерительные колпаки и накладки, диэлектрические перчатки, ручной изолирующий инструмент.

в) Изолирующие штанги всех видов, изолирующие клещи, указатели напряжения, диэлектрические перчатки, галоши и боты, ручной изолирующий инструмент.

з) Изолирующие штанги всех видов, изолирующие клещи, колпаки, покрытия и накладки, указатели напряжения, диэлектрические перчатки, галоши и боты, ручной изолирующий инструмент.

2. Какие средства защиты относятся к дополнительным изолирующим электрозщитным средствам для электроустановок напряжением до 1000 В?

а) Диэлектрические галоши, диэлектрические ковры и изолирующие подставки, изолирующие колпаки, покрытия и накладки, лестницы приставные, изолирующие стеклопластиковые стремянки, штанги для переноса и выравнивания потенциала.

б) Диэлектрические галоши, диэлектрические ковры и изолирующие подставки, изолирующие колпаки, покрытия и накладки, лестницы приставные, изолирующие стеклопластиковые стремянки.

в) Диэлектрические галоши, диэлектрические ковры и изолирующие подставки, изолирующие колпаки, покрытия и накладки, лестницы приставные, изолирующие штанги всех видов.

г) Диэлектрические галоши, диэлектрические ковры и изолирующие подставки, изолирующие колпаки, покрытия и накладки, лестницы приставные, стремянки изолирующие стеклопластиковые, указатели напряжения.

3. Какие средства защиты относятся к основным изолирующим электрозщитным средствам для электроустановок напряжением выше 1000 В?

а) Изолирующие штанги всех видов, изолирующие клещи, указатели напряжения, электроизмерительные клещи, диэлектрические перчатки, ручной изолирующий инструмент.

б) Изолирующие штанги всех видов, изолирующие клещи, указатели напряжения, электроизмерительные колпаки и накладки, диэлектрические перчатки, ручной изолирующий инструмент.

в) Изолирующие штанги всех видов, изолирующие клещи, указатели напряжения.

г) Изолирующие штанги всех видов, изолирующие клещи, колпаки, покрытия и накладки, указатели напряжения, диэлектрические перчатки, галоши и боты, ручной изолирующий инструмент.

4. Какие средства защиты относятся к дополнительным изолирующим электрозщитным средствам для электроустановок напряжением выше 1000 В?

а) Диэлектрические перчатки и боты, диэлектрические ковры и изолирующие подставки, изолирующие колпаки, покрытия и накладки, лестницы приставные, изолирующие стеклопластиковые стремянки, штанги для переноса и выравнивания потенциала.

б) Диэлектрические перчатки и боты, диэлектрические ковры и изолирующие подставки, изолирующие колпаки и накладки, лестницы приставные, изолирующие стеклопластиковые стремянки, штанги для переноса и выравнивания потенциала.

в) Диэлектрические галоши, диэлектрические ковры и изолирующие подставки, изолирующие колпаки, покрытия и накладки, лестницы приставные, изолирующие штанги всех видов.

г) Диэлектрические галоши, диэлектрические ковры и изолирующие подставки, изолирующие колпаки, покрытия и накладки, лестницы приставные, изолирующие стеклопластиковые стремянки, указатели напряжения.

5. Каким образом работник перед непосредственным использованием может определить, что электрозащитные средства прошли эксплуатационные испытания и пригодны для применения?

а) По протоколам эксплуатационных испытаний.

б) По штампу или маркировке на средстве защиты.

в) По бирке, которая приклеивается к средству защиты.

г) По внешнему виду средств защиты.

6. В каких электроустановках при пользовании указателем напряжения необходимо надевать дополнительное защитное средство — диэлектрические перчатки?

а) В электроустановках напряжением выше 380/220 В.

б) В электроустановках напряжением до 1000 В.

в) В электроустановках напряжением выше 1000 В.

г) В электроустановках напряжением выше 10 кВ.

7. В каких электроустановках диэлектрические перчатки можно применять в качестве основного изолирующего электрозащитного средства?

а) Во всех электроустановках используются в качестве дополнительного защитного средства.

б) В электроустановках напряжением выше 1000 В.

в) В электроустановках напряжением до 1000 В.

г) В электроустановках напряжением выше 10 кВ.

8. Какие средства индивидуальной защиты должны применяться для защиты от шагового напряжения в электроустановках выше 1000 В?

- а) Диэлектрические галоши.
- б) Диэлектрические боты.
- в) Диэлектрические коврики.
- г) Изолирующие подставки.

9. К какому виду плакатов безопасности относится плакат с надписью «Не влезай! Убьет»?

а) К запрещающим; б) к предупреждающим; в) к предписывающим; г) к указательным.

10. Какое минимальное количество диэлектрических перчаток должно быть в распределительных устройствах напряжением до 1000 В?

а) 1 пара; б) 2 пары; в) 3 пары; г) определяется местными условиями.

Ж. Опасность электрической травмы и оказание первой помощи

1. Какое воздействие на организм человека оказывает электрический ток?

- а) Термическое (тепловое) воздействие.
- б) Электролитическое (биохимическое) воздействие.
- в) Воздействие на нервную систему организма.
- г) Все указанные виды воздействия.

2. Приведите наиболее полный перечень факторов, определяющих степень воздействия электрического тока на организм человека при случайном прикосновении?

а) Величина тока прикосновения, продолжительность протекания тока, род и частота тока, путь протекания тока по телу человека, состояние организма.

б) Величина тока прикосновения, продолжительность протекания тока, род и частота тока, путь протекания тока по телу человека, условия внешней среды.

в) Величина тока прикосновения, напряжение прикосновения, продолжительность протекания тока, род и частота тока, путь протекания тока по телу человека.

г) Величина тока прикосновения, напряжение прикосновения, продолжительность протекания тока, род и частота тока, путь протекания тока по телу человека, состояние организма.

3. Какая допустимая величина и какого рода (постоянного или переменного) тока прикосновения продолжительностью воздействия не более 10 мин имеет большее значение при нормальном (неаварийном) режиме?

- а) Постоянного тока.
- б) Переменного тока 50 Гц.
- в) Переменного тока 400 Гц.
- г) Равные значения.

4. Какая допустимая величина и какого рода (постоянного или переменного) тока прикосновения продолжительностью воздействия 0,1 с имеет большее значение при аварийном режиме?

- а) Постоянного тока.
- б) Переменного тока 50 Гц.
- в) Переменного тока 400 Гц.
- г) Равные значения.

5. Какие основные пути протекания электрического тока через тело человека возможны в ситуации случайного прикосновения?

а) Ладонь—ладонь, ладонь—ступня (ступни), ступня—ступня, ладонь—голова, голова—ступня (ступни).

б) Ладонь—ладонь, ладонь—ступня (ступни), ладонь—голова, ступня—ступня, голова—туловище.

в) Ладонь—ладонь, ладонь—ступня (ступни), ладонь—голова, ступня—ступня, голова—ступня (ступни), голова—туловище.

г) Ладонь—ладонь, правая ладонь—ступня (ступни), левая ладонь—голова, ступня—ступня, голова—ступня (ступни).

6. Каковы первоочередные действия при оказании помощи пострадавшему при электротравме?

а) Произвести отключение электрического тока. Освободить пострадавшего (за одежду!) от места касания проводом земли или от оборудования, находящегося под напряжением; перенести на расстояние не менее чем 8 м от места контакта. Приступить к реанимации пострадавшего. Вызвать скорую медицинскую помощь.

б) Произвести отключение электрического тока. Освободить пострадавшего (за одежду!) от места касания проводом земли или от оборудования, находящегося под напряжением, перенести на расстояние не менее чем 8 м от места контакта. Оповестить руководителя. Приступить к реанимации пострадавшего. Вызвать скорую медицинскую помощь.

в) Произвести отключение электрического тока. Освободить пострадавшего (за одежду) от места касания проводом земли или от оборудования, находящегося под напряжением, перенести на расстояние не менее чем 8 м от места контакта. Оградить опасное место. Приступить к реанимации пострадавшего. Вызвать скорую медицинскую помощь.

з) Произвести отключение электрического тока. Вызвать скорую медицинскую помощь. Освободить пострадавшего (за одежду) от места касания проводом земли или от оборудования, находящегося под напряжением, перенести на расстояние не менее чем 8 м от места контакта. Приступить к реанимации пострадавшего.

7. Каким безопасным образом следует передвигаться в зоне возникновения шагового напряжения?

- а) Прыжками.
- б) Гусиными (мелкими) шагами.
- в) Быстрым бегом.
- з) Не передвигаться, ждать помощи.

8. Нуждается ли в медицинской помощи человек, находившийся под воздействием электрического тока и чувствующий себя после этого нормально?

- а) Не нуждается.
- б) Нуждается в любом случае.
- в) Определяет медработник.
- з) Нуждаются только женщины.

9. Какую величину электрического переменного тока, протекающего через тело человека продолжительностью до 1 с, следует считать смертельно опасной согласно ГОСТ 12.1.83.-82 (2001)?

- а) 50 мА переменного тока 50 Гц.
- б) 100 мА переменного тока 400 Гц.
- в) 200 мА постоянного тока.
- з) Все указанные значения.

10. На каком максимальном расстоянии (радиусе) от места касания земли упавшего электрического провода можно попасть под опасное шаговое напряжение человеку?

- а) Рядом с местом касания.
- б) В радиусе до 5 м от места касания.
- в) В радиусе 8 м от места касания.
- з) В радиусе 10 м от места касания.

Таблица
правильных ответов на тестовые вопросы

Раздел А: 1 — б; 2 — а; 3 — а; 4 — б; 5 — а; 6 — б; 7 — а; 8 — а;
9 — в; 10 — в.

Раздел Б: 1 — в; 2 — а; 3 — в; 4 — г; 5 — г; 6 — в; 7 — в; 8 — г;
9 — а; 10 — г.

Раздел В: 1 — а; 2 — а; 3 — г; 4 — в; 5 — в; 6 — а; 7 — в; 8 — а;
9 — а; 10 — а.

Раздел Г: 1 — а; 2 — б; 3 — б; 4 — б; 5 — а; 6 — б; 7 — б; 8 — а;
9 — г; 10 — б.

Раздел Д: 1 — а; 2 — в; 3 — б; 4 — б; 5 — а; 6 — в; 7 — б; 8 — а;
9 — г; 10 — г.

Раздел Е: 1 — г; 2 — б; 3 — а; 4 — г; 5 — а; 6 — а; 7 — б; 8 — б;
9 — г; 10 — в.

Рекомендуемая литература

1. *Кузнецов К.Б., Мишарин А.С.* Электробезопасность в электроустановках железнодорожного транспорта. — Екатеринбург: Изд-во УрГАПС, 1999. — 425 с.
2. *Кузнецов К.Б., Мишарин А.С.* Электробезопасность в электроустановках железнодорожного транспорта: учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / под ред. К.Б. Кузнецова. — М.: Маршрут, 2005. — 456 с.
3. *Косарев А.Б., Косарев Б.И.* Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. — М.: Интекст, 2008. — 480 с.
4. *Сидоров А.И., Краинская И.С.* Электромагнитные поля вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения: монография. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. — 204 с.
5. *Косарев Б.И., Зельвянский Я.А., Сибаров Ю.Г.* Электробезопасность в системе электроснабжения железнодорожного транспорта. — М.: Транспорт, 1983. — 200 с.
6. *Манойлов В.Е.* Основы электробезопасности. — 5-е изд. — Ленинград: Энергоатомиздат, 1991. — 480 с.
7. *Белинский С.О.* Электромагнитная совместимость электроустановок тягового электроснабжения и обслуживающего персонала. — Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2008. — 142 с.
8. *Бадер М.П.* Электромагнитная совместимость: учебник для вузов ж.-д. транспорта. — М.: УМК МПС, 2002. — 638 с.

Оглавление

Предисловие.....	3
Введение	8
Глава 1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА.....	20
1.1. Классификация электроустановок по надежности и безопасности электроснабжения потребителей	20
1.2. Практика использования режима нейтрали электрических сетей	29
1.3. Особенности устройства электроснабжения электроподвижного состава	32
1.4. Система «человек—электроустановка—среда» на железнодорожном транспорте	36
Глава 2. ОПАСНЫЕ И ВРЕДНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ	50
2.1. Основные сведения об электромагнитном поле	50
2.2. Электромагнитные волны ЭМП, используемые в электросвязи.....	55
2.3. Электромагнитные поля электроустановок	57
2.4. Общие сведения о вредном воздействии ЭМП на человека.....	59
2.5. Стандарты и нормы вредного воздействия ЭМП на человека.....	62
2.6. Опасное воздействие ЭМП на живые организмы.....	74
2.7. Опасность прикосновения к частям электроустановок в электрических сетях с заземленной нейтралью	80
2.8. Опасность прикосновения в электрических сетях с изолированной нейтралью	87

2.9. Электричество живых клеток, механизм электрической травмы.....	91
2.10. Пороговые значения токов, протекающих по телу человека и характеризующих степень их воздействия на организм.....	98
2.11. Стандарты и нормы по ограничению опасного воздействия ЭМП на человека.....	105
2.12. Расчет уровней ЭМП и основные технические средства защиты от их вредного и опасного воздействия.....	111
Глава 3. ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ И ЗАКОНОДАТЕЛЬНЫЕ МЕРЫ ЗАЩИТЫ ОТ ОПАСНОГО И ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭМП.....	117
3.1. Понятие и оценка риска при эксплуатации электроустановок.....	117
3.2. Основные законодательные акты по охране труда, требования к обслуживающему персоналу.....	140
3.3. Основные сведения об электрических травмах, статистический анализ травматизма, возмещение ущерба здоровью пострадавших, расследование несчастных случаев в электроустановках.....	149
3.4. Организация безопасной эксплуатации электроустановок.....	165
Глава 4. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРСОНАЛА.....	182
4.1. Изоляция и ограждение электроустановок, изолирующие защитные средства, двойная изоляция.....	182
4.2. Защитные заземляющие устройства.....	210
4.3. Зануление и защитное отключение потребителей электроэнергии.....	248
4.4. Применение малых напряжений в условиях повышенной опасности, классы электротехнических изделий по способу защиты человека.....	273
4.5. Защитное выравнивание разности потенциалов при обслуживании электроустановок потребителей.....	277
4.6. Применение блокировок безопасности.....	290
4.7. Использование защитных свойств рельсовой сети.....	296

Глава 5. ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА ПОСТОЯННОГО ТОКА И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	304
5.1. Основные характеристики электрического рельсового транспорта постоянного тока	304
5.2. Параметры тяговой сети постоянного тока.....	309
5.3. Электромагнитное и магнитное поля тяговой сети в окружающем пространстве	316
5.4. Электрическое поле контактной сети.....	323
5.5. Электрическое поле рельсовой сети.....	327
5.6. Воздействие ЭМП электрифицированного рельсового транспорта постоянного тока на окружающую среду и технические меры защиты.....	361
5.7. Оценка электромагнитного поля на рабочих местах персонала тягового электроснабжения	371
Глава 6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	381
6.1. Основные характеристики электрического рельсового транспорта переменного тока	381
6.2. Параметры тяговой сети переменного тока.....	386
6.3. Расчет сложных протяженных неоднородных заземляющих устройств методом цепных схем	393
6.4. Порядок расчета параметров электробезопасности технических средств защиты в устройствах электроснабжения железных дорог методом цепных схем.....	410
6.5. Разработка модели переходного сопротивления «рельсы—земля»	416
6.6. Воздействие ЭМП электрифицированного рельсового транспорта переменного тока на окружающую среду и технические средства защиты.....	428
Глава 7. ЗАЩИТА СООРУЖЕНИЙ И УСТРОЙСТВ ОТ АТМОСФЕРНОГО И СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА.....	439
7.1. Защита сооружений и устройств от атмосферного электричества	439

7.2. Защита устройств электроснабжения от атмосферных перенапряжений	454
7.3. Защита ЭПС от атмосферных перенапряжений.....	464
7.4. Защита от статического электричества	469
Приложение	473
Рекомендуемая литература.....	490

Учебное издание

Кузнецов Константин Борисович

**ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ
В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ**

Учебное пособие

Подписано в печать 25.04.2016 г.

Формат 60×84/16. Печ. л. 31,0.

ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию
на железнодорожном транспорте»

105082, Москва, ул. Бакунинская, д. 71.

Тел.: +7(495) 739-00-30,

e-mail: info@umczdt.ru,

<http://www.umczdt.ru>

Для заметок