**МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ**

Академия Государственной противопожарной службы

В.Н. Черкасов, Н.П. Костарев

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Москва 2002

МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ

Академия Государственной противопожарной службы

В.Н. Черкасов, Н.П. Костарев

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Издание 4-е, переработанное и дополненное

Под редакцией кандидата технических наук, профессора В.Н. Черкасова

Учебник для слушателей и курсантов высших пожарно-технических образовательных учреждений МЧС России

Москва 2002

УДК 628.741:621.312
ББК 38.96:31.26
Ч – 48

Черкасов В.Н., Костарев Н.П.
Пожарная безопасность электроустановок: Учебник.-М.:Академия ГПС МЧС России, 2002.-377 с.

ISBN 5-9229-0020-X

Р е ц е н з е н т ы: Федеральное Государственное учреждение Всероссийский ордена «Знак почёта» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, кафедра противопожарной автоматики и кафедра пожарной безопасности технологических процессов Академии ГПС МЧС России.

В учебнике рассмотрены общая схема электроснабжения потребителей, классификация электроустановок и причины пожаров от них, а также вероятностная оценка пожароопасных отказов в электротехнических изделиях и пожарная безопасность комплектующих элементов. Приведены нормативные обоснования и инженерные решения по обеспечению пожарной безопасности электроустановок и защите зданий и сооружений от молний и статического электричества.

Предназначен для слушателей и курсантов высших пожарно-технических образовательных учреждений МЧС России.

ISBN 5-9229-0020-X

©Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2002

Предисловие

Развитие экономики требует широкого внедрения достижений электротехнической науки. Мы являемся свидетелями все более широкого применения электричества буквально во всех областях деятельности человека: в промышленности и сельском хозяйстве, космонавтике и медицине, в быту и сфере услуг.

В настоящее время практически нет другого вида энергии, способного конкурировать с электрической энергией по доступности, удобству ее использования, преобразования в другие виды энергии и передачи на огромные расстояния без значительных потерь.

Вместе с тем следует помнить, что использование электрической энергии связано с пожарной опасностью, опасностью взрывов при эксплуатации электроустановок во взрывоопасных производствах. Обеспечение пожаро- и взрывобезопасности электроустановок регламентируется нормативными документами, соблюдение которых является обязательным на всех этапах проектирования, монтажа и эксплуатации. В последние годы количество пожаров, возникших при эксплуатации электроустановок, увеличивается. Имеют место пожары также и от разрядов молнии и статического электричества. Поэтому перед работниками пожарной охраны ставятся задачи качественного улучшения надзорных и профилактических функций в области пожаро- и взрывобезопасного применения электроустановок. Одним из главных условий повышения результативности пожарно-профилактической работы в этой области является изучение причин возникновения пожаров и взрывов от электроустановок, а также нормативно-технических требований, обеспечивающих пожаро- и взрывобезопасное применение электроустановок в различных условиях (см. прил. 4), защиту объектов от поражения молнией и статического электричества.

Учебник написан в соответствии с программой курса «Пожарная безопасность электроустановок».

Предисловие, гл. 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 и 10, параграфы 1.1, 1.2, 1.3 написаны канд. техн. наук, проф. В.Н. Черкасовым; параграфы 1.4, 1.5, 3.5 – канд. техн. наук Н.П. Костаревым, параграф 7.2 – совместно.

Оглавление

Предисловие 3
Глава 1. Электроснабжение и пожарная опасность электроустановок 4
1.1. Общие сведения об электроснабжении и электроустановках 4
1.2. Общие сведения по проводам и кабелям 11
1.3. Причины пожароопасных отказов и загораний в электротехнических устройствах 14
1.4. Вероятностная оценка пожароопасных отказов в электротехнических устройствах 20
1.5. Пожарная опасность комплектующих элементов электротехнических устройств 29
Глава 2. Выбор и применение электрооборудования для взрыво- и пожароопасных зон и помещений с нормальной средой 41
2.1. Нормативная и аналитическая оценка классов взрыво- и пожароопасных зон и их размеров 41
2.2. Классификация взрывоопасных смесей по группам и категориям 51
2.3. Взрывозащищенное электрооборудование 59
2.4. Маркировка взрывозащищенного электрооборудования 74
2.5. Зарубежное взрывозащищенное электрооборудование 77
2.6. Особенности выбора, монтажа, эксплуатации и ремонта взрывозащищенного электрооборудования 81
2.7. Особенности выбора, монтажа и эксплуатации электрооборудования пожароопасных зон и помещений с нормальной средой 88
2.8. Контроль за противопожарным состоянием электроустановок 90
Глава 3. Аппараты защиты в электроустановках 93
3.1. Плавкие предохранители 93
3.2. Автоматические выключатели (автоматы) 104
3.3. Тепловые реле 117
3.4. Выбор аппаратов защиты 120
3.5. Устройства защитного отключения (УЗО) 131
Глава 4. Пожарная безопасность и методы расчета электрических сетей 139
4.1. Нагрев проводников электрическим током 139
4.2. Допустимая нагрузка на проводники по нагреву 144
4.3. Пожарная опасность короткого замыкания в электрических сетях 146
4.4. Противопожарная защита электрических сетей при проектировании 148
4.5. Противопожарная защита электрических сетей при монтаже и эксплуатации 163
4.6. Профилактика пожаров на вводах электрических сетей в здания и сооружения объектов агропромышленного комплекса 171
Глава 5. Электродвигатели, трансформаторы и аппараты управления 175
5.1. Общие сведения об электродвигателях 175
5.2. Аварийные пожароопасные режимы работы электродвигателей 186
5.3. Пожарная опасность трансформаторов 192
5.4. Снижение пожароопасности электроизоляции обмоток электродвигателей и трансформаторов 193
5.5. Пожарная опасность электрических аппаратов управления 195

Глава 6. Электроосветительные установки ... 209
6.1. Электрические источники света ... 209
6.2. Осветительные приборы и светильники ... 216
6.3. Системы и виды электрического освещения ... 228
6.4. Расчет электрического освещения ... 229
6.5. Пожарная опасность осветительных приборов ... 232
6.6. Профилактика пожаров от осветительных приборов ... 237
Глава 7. Заземление и зануление в электроустановках напряжением до 1000 В . 240
7.1. Опасность поражения электрическим током ... 240
7.2. Заземление и зануление электроустановок как устройств электро- и пожарной безопасности ... 241
7.3. Устройство заземлений и занулений ... 258
7.4. Расчет заземляющих устройств ... 263
7.5. Защитные заземления и зануления во взрывоопасных зонах ... 267
7.6. Эксплуатация и испытания заземляющих устройств ... 268
Глава 8. Молниезащита ... 274
8.1. Молния и ее характеристики ... 274
8.2. Пожаро- и взрывоопасность воздействия молнии ... 280
8.3. Классификация зданий и сооружений по устройству молниезащиты ... 290
8.4. Молниеотводы ... 296
8.5. Защита зданий и сооружений от прямых ударов молнии ... 315
8.6. Защита зданий и сооружений от вторичных воздействий молнии ... 323
8.7. Эксплуатация устройств молниезащиты ... 325
Глава 9. Защита взрывоопасных производств от разрядов статического электричества ... 328
9.1. Общие представления об электризации ... 328
9.2. Воспламеняющая способность искр статического электричества и его физиологическое воздействие на организм человека ... 330
9.3. Приборы для измерения параметров статического электричества ... 334
9.4. Способы устранения опасности статического электричества ... 336
9.5. Эксплуатация устройств защиты от разрядов статического электричества ... 357
Глава 10. Технико-экономическая эффективность решений противопожарной защиты электроустановок, молниезащиты и защиты от статического электричества ... 359
Приложения ... 362
Литература ... 374

Глава 1

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

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

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ И ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Промышленные электроустановки по функциональному назначению подразделяются на следующие виды:

генераторы – вырабатывающие электрическую энергию;

преобразователи напряжения (трансформаторы), преобразователи частоты – преобразующие электрическую энергию;

провода, кабели – передающие электрическую энергию от пунктов выработки и преобразования до электроприемников;

распределительные подстанции, узлы, щиты, устройства – распределяющие электрическую энергию;

электродвигатели, электротермические, электросварочные, электроосветительные и другие – потребляющие электрическую энергию электроприемники.

Все перечисленные электроустановки, согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) [1], нормируются на напряжение до 1000 В и напряжение выше 1000 В.

Около 75 % всей вырабатываемой в нашей стране электрической энергии потребляется промышленными электроприемниками, которые по виду потребляемого тока делятся на следующие группы:

электроприемники трехфазного тока напряжением до 1000 В частотой 50 Гц;

трехфазного тока свыше 1000 В частотой 50 Гц;

однофазного тока до 1000 В частотой 50 Гц;

работающие с иной частотой, питаемые от преобразовательных подстанций и установок;

постоянного тока, питаемые от преобразовательных подстанций и установок.

Промышленные предприятия работают на переменном трехфазном токе. Группы электроприемников постоянного тока питаются от преобразовательных подстанций с полупроводниковыми выпрямителями, чаще всего с использованием мощных тиристоров. Так как выпрямительные аг-

регаты питаются от сети трехфазного тока, то они, в свою очередь, являются электроприемниками трехфазного тока.

Электроустановки напряжением до 1000 В выполняются как с глухозаземленной, так и с изолированной нейтралью, а установки постоянного тока – с глухозаземленной и изолированной нулевой точками.

Электроустановки с изолированной нейтралью следует применять при повышенных требованиях к безопасности при условии, что в этом случае обеспечивается контроль изоляции сети и целостность изолирующей прокладки пробивных предохранителей, отключение участков с замыканием на землю.

В четырехпроводных сетях переменного тока или трехпроводных сетях постоянного тока глухое заземление нейтрали обязательно.

По требованиям обеспечения надежности электроснабжения электроприемники делятся на три категории. Нарушение электроснабжения электроприемников I категории может вызвать опасность для жизни людей, нанести большой ущерб народному хозяйству, повредить оборудование, привести к массовому браку продукции, а также к трудновосстанавливаемым нарушениям технологического процесса. Электроприемники этой категории должны питаться, по меньшей мере, от двух независимых источников, и обрыв питания допускается только на время автоматического переключения с основного вида на резервный.

В I категорию включена также особая группа электроприемников, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного останова производства в целях предотвращения угрозы жизни людей, взрывов, пожаров и повреждения дорогостоящего основного оборудования.

Примерная схема электроснабжения объекта с электроприемниками особой группы приведена на рис. 1.1. Подстанции глубокого ввода (ПГВ) питаются от двух независимых источников (НИ1) и (НИ2) – трансформаторов Тр1 и Тр2 110/10 кВ. Электроэнергия для дальнейшего распределения между потребителями поступает от указанных источников питания соответственно на распределительные устройства (РУ1) и (РУ2) напряжением 10 кВ. Шины РУ1 и РУ2 электрически могут быть связаны устройством автоматического включения резерва (АВР1) посредством масляного выключателя В1, который в нормальном режиме работы схемы находится в положении «выключено». Распределительные устройства ПГВ питают распределительные пункты РП1, РП2, РП3. РП2 и РП3 имеют секции электроснабжения потребителей особой группы. Для надежного электроснабжения потребителей особой группы в данной схеме применено многоступенчатое резервирование.

При отказе одного из двух независимых источников питания (НИ1 и НИ2) срабатывают устройства электрической защиты, аварийная цепь отключается выключателем $В_п$. Далее срабатывает устройство АВР1 и электрически соединяет шины РУ1 и РУ2 посредством включения выключателя В1. При полной потере питания от двух независимых источников НИ1 и НИ2 подстанцией глубокого ввода аварийное электроснабжение секций особой группы РП2 и РП3 после отключения поврежденных участков осуществляется вводом резервного источника питания Г, который находится в «горячем» резерве (включаются выключатели В2).

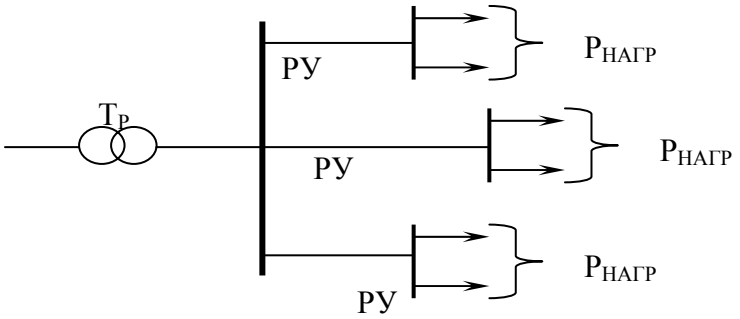
К электроприемникам II категории относятся такие, перерыв питания которых приводит к резкому снижению выпуска продукции, длительным простоям механизмов, транспорта. Категория охватывает многочисленную группу электроприемников, которые допускают перерыв в электроснабжении в течение времени, необходимого дежурному персоналу для обеспечения включения резервного питания. Эти электроприемники можно питать от одной воздушной линии электропередач напряжением 6 кВ и выше, осуществляя резервирование на пониженном напряжении, а также от одного трансформатора, если есть централизованное резервирование трансформаторов на складе внутри объекта или на небольшом расстоянии от него. Для этой категории можно применять автоматическое резервирование, если это не требует больших затрат.

К электроприемникам III категории относятся все остальные потребители.

Электроприемники на взрывоопасных и пожароопасных объектах относятся к I или ко II категории. Это нормативное решение обеспечивает более эффективную эвакуацию людей и имущества при пожаре, большую надежность системы водоснабжения, внутрицехового транспорта и другого оборудования промышленного предприятия.

Основным элементом схемы электроснабжения являются электрические сети, которые по конфигурации разделяются на *разомкнутые* и *замкнутые*. Разомкнутые электрические сети делятся на *радиальные* и *магистральные* (рис. 1.2); замкнутые электрические сети – на *двусторонние, кольцевые, двойные магистральные, сложнозамкнутые* (рис. 1.3).

Магистральной сетью называется схема питания нескольких главных или цеховых подстанций от одной магистрали с общим отключающим аппаратом со стороны питания. Магистральные сети осуществляют дробление подстанций наиболее экономичным образом, особенно при применении в качестве магистралей линий электропередачи или токопроводов.



а

Рис. 1.2. Конфигурация разомкнутых электрических сетей:
а – распределенная радиальная; *б* – сосредоточенная радиальная; *в* – магистральная

Магистральные сети в замкнутых электрических сетях в зависимости от особенностей электроснабжения потребителей могут выполняться в виде одиночных и двойных магистралей с односторонним или двусторонним питанием (см. рис. 1.3). Разновидностью схем с двусторонним питанием являются магистральные кольцевые и сложнозамкнутые схемы (см. рис. 1.3, *б*).

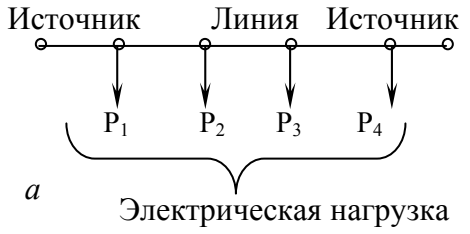
Радиальные сети (см. рис. 1.2, *а*,*б*) могут применяться в случаях, когда магистральные сети не дают экономического эффекта или не удовлетворяют заданным требованиям, например, при питании:

крупных сосредоточенных нагрузок, в частности, если питание производится кабельными линиями или линиями, пропускная способность которых недостаточна для одновременного питания нескольких подстанций;

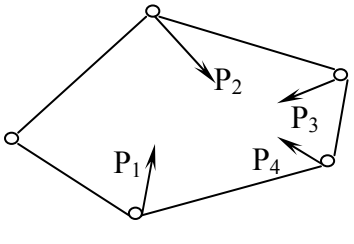
средних и крупных обособленных нагрузок;

ударных и резко колеблющихся нагрузок (электропечных подстанций, прокатных станов и т.п.).

Радиальные сети обладают большей гибкостью и удобством в эксплуатации, поскольку место повреждения может быть обнаружено быстрее и проще.



а



б

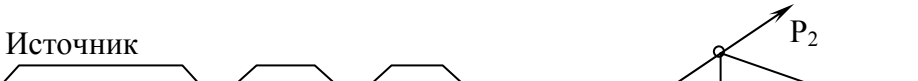


Рис. 1.3. Конфигурация замкнутых электрических сетей:
а - двусторонняя; *б* - кольцевая; *в* - двойная магистральная;
г - сложнозамкнутая

Радиальные сети бывают одноступенчатые, когда территория предприятия невелика и распределяемая мощность также мала, двухступенчатые, когда применяются промежуточные распределительные пункты, питающие радиальные сети другой ступени. В таком случае освобождаются более крупные подстанции, например главные понизительные подстанции (ГПП), от большего числа присоединений.

По конструкции электросети разделяются на *электропроводки, токопроводы, кабельные* и *воздушные линии* электропередач.

Электропроводкой называется совокупность проводов и кабелей с относящимися к ним креплениями, поддерживающими защитными конструкциями и деталями, установленными в соответствии с ПУЭ [1].

Токопроводом называется устройство, предназначенное для передачи и распределения электроэнергии, состоящее из неизолированных или изолированных проводников и относящихся к ним изоляторов, защитных оболочек, ответвительных устройств, поддерживающих и опорных конструкций.

Кабельной линией называется линия для передачи электроэнергии или отдельных ее импульсов, состоящая из одного или нескольких параллельных кабелей с соединительными, стопорными и концевыми муфтами (заделками) и крепежными деталями.

Воздушной линией электропередачи до 1 кВ называется устройство для передачи и распределения электроэнергии по проводам, расположенным на открытом воздухе и прикрепленным при помощи изоляторов и арматуры к

опорам или кронштейнам, стойкам на зданиях и инженерных сооружениях (мостах, путепроводах и т.п.).

Электропроводки в электрических сетях до 1000 В бывают *наружными* и *внутренними*, с защищенными и незащищенными изолированными проводами, *открытые* и *скрытые*. Открытые проводки могут быть стационарными, передвижными и переносными. Во всех случаях необходимо полное соответствие типов проводки свойствам среды, особенно химически агрессивной, пожаро- и взрывоопасной.

Токопроводы очень эффективны при передаче большого количества электроэнергии на сравнительно небольшие расстояния. Они получили широкое распространение, так как позволяют отказаться от большого числа дорогостоящих кабелей и представляют собой устройство из голых проводников (шин, лент, проводов), изоляторов и вспомогательных конструкций, смонтированных в тоннелях, галереях или на эстакадах. Токопроводы любой из этих конструкций могут применяться на первой ступени электроснабжения. При этом возможны следующие варианты питания электроприемников:

Первый вариант. *Первая ступень* – от узлов распределительной подстанции (УРП), главной понизительной подстанции (ГПП), подстанции глубокого ввода (ПГВ) или от электрической системы через ГПП к РП, если распределение электрической энергии идет на напряжении 6–10 кВ.

Второй вариант. *Вторая ступень* – от РП или вторичного распредустройства ПГВ к цеховым трансформаторным подстанциям (ТП) или к отдельным крупным потребителям.

Третий вариант. *Третья ступень* – от цеховых ТП к отдельным электроприемникам на напряжении до 1000 В.

Электроснабжение промышленных предприятий, включая пожаро- и взрывоопасные, характеризуется следующими особенностями:

сосредоточением больших нагрузок на сравнительно небольшой территории;

постоянным и неизбежным увеличением нагрузок и расширением применения электроэнергии в технологических процессах;

возможностью возникновение аварии и перебоев в электроснабжении, отрицательно влияющих на ритмичность работы предприятия и непрерывность технологического процесса;

влиянием производственной среды (повышенной влажности и температуры, вредных агрессивных сред и т.п.) на элементы электрооборудования и др.

1.2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ПРОВОДАМ И КАБЕЛЯМ

Для передачи электрической энергии непосредственно к потребителям широко используются провода и кабели [46].

Провод – кабельное изделие, содержащее одну неизолированную или

одну и более изолированных жил, которые в зависимости от условий прокладки и эксплуатации могут быть покрыты неметаллической оболочкой и (или) оплеткой, либо одну изолированную или несколько изолированных друг от друга проволок, имеющих общую обмотку и (или) оплетку из изолирующего материала.

Кабель – кабельное изделие, содержащее одну или несколько изолированных жил (проводников), заключенных в металлическую или неметаллическую оболочку, поверх которой в зависимости от условий прокладки и эксплуатации накладывается защитный покров.

Провода и кабели маркируются в зависимости от того, из каких материалов выполнены токоведущие жилы. В обозначении маркировки провода первая буква «А» означает, что провод имеет алюминиевую жилу. Если обозначение маркировки провода начинается с другой буквы (например, ППВ, ПР, ПРП и др.), то это означает, что данный провод имеет медную жилу. Провода с резиновой изоляцией имеют в условном обозначении букву «Р», стоящую, как правило, после буквы «П» (провод). Провода с полихлорвиниловой изоляцией имеют в условном обозначении букву «В». Медные гибкие провода в своем условном обозначении имеют букву «Г» (гибкие).

Жилы проводов имеют стандартные сечения. Наиболее распространенными из них являются сечения: 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 185; 240; 300; 400 мм^2. Назовем наиболее распространенные марки проводов. Провода и шнуры с резиновой изоляцией в оплетке из волокнистых материалов: ПР, ПРГ, ПРПГ, ПРПГУ, АПР, ПРТО, АПРТО, ПРГН; провода с полихлорвиниловой изоляцией: ПВ, АППВ, ППВ, ПГВ, АПВ, ППГВ, ППВС, АППВС; провода, имеющие металлическую или иную оболочку, которая защищает изоляцию от механических повреждений: ПРП, ПРРП, ПРПВ, ПРВ, АПРВ, ПРВД, ШРПЛ, ШРПС, ПРШП. Провода теплостойкие: ПРКС, ПРБС, ПТГ, ПРКТ, ПРКА с температурой нагрева изоляции от 108 до 250 °С и др.

Для питания электроэнергией мощных потребителей в «тяжелых» условиях и средах, как правило, используются кабели. В зависимости от назначения и конструкции кабели маркируются буквенными символами, расшифровка которых приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Конструкция кабеля	Место символа в обозначении марки кабеля			Значение символа	Примечание
	в начале	в середине	в конце		

Токопроводящая жила	А			Алюминий	Медная жила символа не имеет
Изоляция жил		$Р_т$		Резина повышенной теплостойкости	Бумажная изоляция символа не имеет
		В		Полихлорвинил	
		П		Полиэтилен	
Защитная герметичная оболочка	А			Алюминий	
	С			Свинец	
	В			Полихлорвинил	
	Н			Найрит (резина, не распространяющая горение)	
Броня			Б	Стальная лента	
			П	Проволока	
			Г	Без джутового покрова поверх брони (кабель голый)	
Отдельно освинцованные жилы	О		Т	Для прокладки в трубах	

Контрольные кабели имеют в маркировке букву «К», например, КАБГ – контрольный кабель с медной жилой, алюминиевой оболочкой, бумажной изоляцией и голой броней.

На рис. 1.4 приведен пример конструкции силового кабеля. Наиболее распространены кабели с резиновой изоляцией в свинцовой оболочке: СРГ, СРБ, САРБ, СРБГ, АСПГ, СРПГ; в полихлорвиниловой или найритовой оболочке: ВРГ, ВРБ, АВРГ, НРГ, АНРБ; с пластмассовой изоляцией: ВВГД, АВВГД, ВБВ, АВБВ, АВВ, АВтВ, ВВ, ВБВнг (оболочка пониженной горючести), ЦСБУ, АЦСБУ; с бумажной пропитанной изоляцией в свинцовой оболочке: СГ, АСГ, АСГТ, СБ, СП, СПГ; в алюминиевой оболочке: АГ, ААГ, АБГ, АП, АПГ, ААПГ.

При выборе марок проводов, шнуров и кабелей руководствуются назначением и рабочим напряжением; характером окружающей среды, в том числе такими ее свойствами, как пожаро- и взрывоопасность и агрессивность; способом прокладки; ценностью сооружения и его архитектурными особенностями; условиями электробезопасности и пожарной безопасности при эксплуатации сети. Так, по условиям пожаро- и взрывобезопасности [1] во взрывоопасных зонах В-I и В-Iа должны использоваться провода и кабели только с медными жилами. Во взрывоопасных зонах остальных классов допускается применять провода и кабели с алюминиевыми жилами в том случае, если соединения и оконцевания производятся пайкой, сваркой или опрессовкой и если у машин, аппаратов и приборов есть вводные устройства и контактные зажимы, предназначенные для присоединения

проводов и кабелей с алюминиевыми жилами.

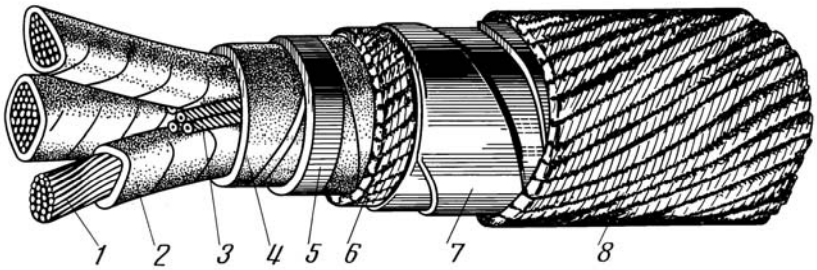


Рис. 1.4. Силовой кабель:
1 - токоведущие жилы; *2* - фазная изоляция (бумага, пропитанная маслом или теплостойкая резина); *3* - джутовый заполнитель; *4* - поясная изоляция (бумага, пропитанная маслом, или теплостойкая резина); *5* - защитная оболочка (свинцовая или алюминиевая); *6* - джутовая прослойка; *7* - стальная ленточная броня; *8* - джутовый покров

Провода и кабели должны иметь изоляцию, соответствующую напряжению сети, а защитные оболочки – условиям и способу прокладки. В пожаро- и взрывоопасных зонах изоляция провода и кабеля должна соответствовать номинальному напряжению сети, но быть не ниже 500 В.

Во взрывоопасных зонах всех классов допускается применение проводов и кабелей с резиновой, полихлорвиниловой и бумажной изоляцией. В пожароопасных зонах для электропроводок рекомендуется применять провода и кабели (бронированные и небронированные) с алюминиевыми и медными жилами, оболочками и покровами из материалов, не поддерживающих горения. Применение проводов и кабелей с полиэтиленовой изоляцией и оболочкой запрещается в пожаро- и взрывоопасных зонах всех классов.

Кабели, прокладываемые во взрывоопасных зонах всех классов открыто (на конструкциях, стенах, в каналах, туннелях и т.п.), не должны иметь наружных покровов и покрытий из горючих материалов (джута, битума, хлопчатобумажной оплетки и т.п.), а кабели для напряжения выше 1000 В, кроме того, должны быть бронированными. Применение кабелей с алюминиевой оболочкой в зонах В-I и В-Iа запрещается.

Допустимые способы прокладки кабелей и проводов во взрывоопасных зонах приводятся в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Кабели	Способ прокладки	Зоны

и провода		Сети напряжением выше 1000 В	Силовые сети и вторичные цепи напряжением до 1000 В	Осветительные сети до 380 В
Бронированные кабели	Открыто – по стенам и строительным конструкциям на скобах и кабельных конструкциях; в коробах, лотках, на тросах, кабельных и технологических эстакадах; в каналах; скрыто – в земле (в траншеях), в блоках	В зонах любого класса		
Небронированные кабели в резиновой, полихлорвиниловой и металлической оболочках	Открыто – при отсутствии механических и химических воздействий: по стенам и строительным конструкциям на скобах и кабельных конструкциях; в лотках, на тросах.	В-Iб, В-IIа, В-Iг	В-1б, В-IIа, В-Iг	В-Iа, В-1б, В-IIа, В-Iг
	В каналах пылеуплотненных (например, покрытого асфальтом) или заполненных песком	В-II, В-IIа	В-II, В-IIа	В-II, В-IIа
	Открыто – в коробах	В-1б, В-Iг	В-Iа, В-1б, В-Iг	В-Iа, В-1б, В-Iг
Изолированные провода	Открыто и скрыто – в стальных водогазопроводных трубах	В зонах любого класса		

Для искробезопасных цепей во взрывоопасных зонах любого класса допускается перечисленные в табл. 1.2 способы прокладки кабелей и проводов.

1.3. ПРИЧИНЫ ПОЖАРООПАСНЫХ ОТКАЗОВ И ЗАГОРАНИЙ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

Электротехнические устройства можно объединить в группы по наиболее существенным признакам: конструктивному исполнению, электрическим характеристикам, функциональному назначению. Шесть основных групп электроустановок охватывают практически все многообразие применяемых на практике электротехнических устройств. Это провода и кабели, электродвигатели, генераторы и трансформаторы, осветительная аппаратура, распределительные устройства, электрические аппараты пуска, переключения, управления, защиты, электронагревательные приборы, аппа-

раты, установки, электронная аппаратура, ЭВМ.

Причины загораний проводов и кабелей

1. Перегрев от короткого замыкания между жилами провода и жилами кабеля, их жилами и землей в результате:

пробоя изоляции повышенным напряжением, в том числе от грозовых перенапряжений;

пробоя изоляции в месте образования микротрещин как заводского дефекта;

пробоя изоляции в месте механического повреждения при эксплуатации;

пробоя изоляции от старения;

пробоя изоляции в месте локального внешнего или внутреннего перегрева;

пробоя изоляции в месте локального повышения влажности или агрессивности среды;

случайного соединения токопроводящих жил кабелей и проводов между собой или соединения токопроводящих жил на землю;

умышленного соединения токопроводящих жил кабеля и проводников между собой или соединения их на землю.

2. Перегрев от токовой перегрузки в результате:

подключения потребителя завышенной мощности;

появления значительных токов утечки между токоведущими проводами, токоведущими проводами и землей (корпусом), в том числе на распределительных устройствах за счет снижения величины электроизоляции;

увеличения окружающей температуры на участке или в одном месте, ухудшения теплоотвода, вентиляции.

3. Перегрев мест переходных соединений в результате:

ослабления контактного давления в месте существующего соединения двух или более токопроводящих жил, приводящего к значительному увеличению переходного сопротивления;

окисления в месте существующего соединения двух и более проводников, приводящего к значительному увеличению переходного сопротивления.

Анализ этих причин показывает, что, например, короткое замыкание в электропроводниках не является первопричиной загораний, тем более пожаров. Оно является следствием не менее восьми первичных физических явлений, приводящих к мгновенному снижению сопротивления изоляции между токопроводящими жилами разных потенциалов. Именно эти явления следует считать первичными причинами пожара, исследование которых представляет научный и практический интерес.

Ниже приводится классификация причин загораний в других электро-

технических устройствах.

Причины загораний электродвигателей, генераторов и трансформаторов

1. Перегрев от коротких замыканий в обмотках в результате межвиткового пробоя электроизоляции:

в одной обмотке повышенным напряжением;

в месте образования микротрещин как заводского дефекта;

от старения;

от воздействия влаги или агрессивной среды;

от воздействия локального внешнего или внутреннего перегрева;

от механического повреждения;

2. Перегрев от коротких замыканий на корпус в результате пробоя электроизоляции обмоток:

повышенным напряжением;

от старения электроизоляции;

пробоя электроизоляции обмоток на корпус от механического повреждения электроизоляции;

от воздействия влаги или агрессивной среды;

от внешнего или внутреннего перегрева.

3. Перегрев от токовой перегрузки обмоток возможен в результате:

завышения механической нагрузки на валу;

работы трехфазного двигателя на двух фазах;

торможения ротора в подшипниках от механического износа и отсутствия смазки;

повышенного напряжения питания;

длительной непрерывной работы под максимальной нагрузкой;

нарушения вентиляции (охлаждения);

завышенной частоты включения под нагрузку и выключения;

завышенной частоты реверсирования электродвигателей;

нарушения режима пуска (отсутствие пусковых гасящих сопротивлений).

4. Перегрев от искрения в контактных кольцах и коллекторе в результате:

износа контактных колец, коллектора и щеток, приводящего к ослаблению контактного давления;

загрязнения, окисления контактных колец, коллектора;

механического повреждения контактных колец, коллектора и щеток;

нарушения мест установки токосъемных элементов на коллекторе;

перегрузки на валу (для электродвигателей);

токовой перегрузки в цепи генератора;

замыкания пластин коллектора из-за образования токопроводящих

мостиков на угольной и медной пыли.

Причины загораний осветительной аппаратуры

1. Перегрев от электрического пробоя, образования слабого контактного соединения, искрения между токопроводящими элементами и местами с разными потенциалами, токоведущими элементами и корпусами в результате:

механического смещения токопроводящих элементов до взаимного сопротивления разными потенциалами;

снижения электроизоляционных качеств конструктивных элементов и образования в связи с этим цепей утечки тока от старения, загрязнения поверхностей, от агрессивных воздействий;

ослабления контактного давления и в связи с этим увеличения переходного сопротивления в местах подсоединения проводов;

ослабления контактного давления и увеличения переходного сопротивления в местах подсоединения источников света (в цоколе, патроне) к питающему напряжению;

окисления контактируемых поверхностей и увеличения переходного сопротивления в местах подсоединения источника света (ламп в цоколе, патроне, ламподержателе) к питающему напряжению;

использования источников света завышенной мощности, приводящего к перегреву патрона и рассеивающей арматуры.

2. Перегрев в элементах пускорегулирующей аппаратуры люминесцентных ламп и ламп типа ДРЛ в результате:

«залипания» стартера, приводящего к токовой перегрузке дросселя;

ухудшения естественного охлаждения (теплоотвода) конструктивных элементов, в частности дросселя при сильной запыленности, неправильной установке по месту;

электрического пробоя конденсатора, приводящего к токовой перегрузке дросселя;

«залипания» стартера, приводящего к расплавлению электродов, перегреву цоколя лампы и ламподержателя;

повышенного рассеяния мощности в дросселе из-за расслабления крепления магнитного сердечка;

межвиткового замыкания в трансформаторе для бесстартерных схем пуска и питания;

электрического пробоя сетевого конденсатора в бесстартерной схеме пуска и питания, приводящего к токовой перегрузке дросселя и трансформатора;

обрыва (перегорания) нити накала одного из электродов лампы (от чего лампа работает как выпрямитель), приводящего к токовой перегруз-

ке первичной обмотки трансформатора для бесстартерной схемы пуска и питания.

Причины загораний в распределительных устройствах, электрических аппаратах пуска, переключения, управления, защиты

1. Перегрев обмотки электромагнита от межвиткового замыкания в результате пробоя изоляции:

повышенным напряжением;

в месте образования микротрещин как заводского дефекта;

в месте механического повреждения при эксплуатации;

от старения;

в месте локального внешнего перегрева от искрящих контактов;

при воздействии повышенной влажности или агрессивности среды.

2. Перегрев от токовой перегрузки в обмотке электромагнита в результате:

повышенного напряжения питания обмотки электромагнита;

длительного разомкнутого состояния магнитной системы при включении под напряжением обмотки;

периодического недотягивания подвижной части сердечника до замыкания магнитной системы при механических повреждениях конструктивных элементов устройств;

повышенной частоты (количества) включений – выключений.

3. Перегрев конструктивных элементов в результате:

ослабления контактного давления в местах подключения токопроводящих проводников, приводящего к значительному увеличению переходного сопротивления;

окисления в местах подсоединения токопроводящих проводников и элементов, приводящего к значительному увеличению переходного сопротивления;

искрения рабочих контактов при износе контактных поверхностей, приводящего к увеличению контактного переходного сопротивления;

искрения рабочих контактов при окислении контактных поверхностей и увеличения переходного контактного сопротивления;

искрения рабочих контактов при перекосах контактных поверхностей, приводящих к увеличению контактного сопротивления в местах контактирования;

сильного искрения нормальных рабочих контактов при удалении искрогасительных или дугогасительных устройств;

искрения при электрическом пробое проводов на корпус, снижении электроизоляционных качеств конструктивных элементов от локального

воздействия влаги, загрязнений, старения.

4. Загорания от предохранителей в результате:

нагрева в местах рабочих контактов от снижения контактного давления и возрастания переходного сопротивления;

нагрева в местах рабочих контактов от окисления контактных поверхностей и возрастания переходного сопротивления;

разлетания частиц расплавленного металла плавкой вставки при разрушении корпуса предохранителя, вызванного применением нестандартных плавких вставок («жучков»);

разлетания частиц расплавленного металла нестандартных открытых плавких вставок.

Причины загораний в электронагревательных приборах, аппаратах, установках

1. Перегрев приборов, аппаратов, установок от замыкания электронагревательных элементов в результате:

разрушения электроизоляции конструктивных элементов от старения;

разрушения электроизоляционных элементов от внешнего механического воздействия;

наслаивания токопроводящего загрязнения между токоведущими конструктивными элементами;

случайного попадания токопроводящих предметов и замыкания токоведущих электронагревательных элементов;

ослабления контактного давления в местах подключения токопроводящих проводников, элементов, приводящего к значительному увеличению переходного сопротивления;

окисления в местах подсоединения токопроводящих проводников элементов, приводящего к значительному увеличению переходного сопротивления;

пробоя электроизоляции конструктивных элементов повышенным напряжением питания;

выкипания нагреваемой воды (жидкости), приводящего к деформации конструктивных элементов, электрическому замыканию и разрушению конструкции нагревателя в целом.

2. Загорания от электронагревательных приборов, аппаратов, установок в результате:

соприкосновения горючих материалов (предметов) с нагревательными поверхностями электронагревательных приборов, аппаратов, установок;

теплового облучения горючих материалов (предметов) от электронагревательных приборов, аппаратов, установок.

Причины загораний комплектующих элементов

Перегрев от коротких замыканий в результате:

электрического пробоя диэлектрика в конструкции комплектующего элемента, приводящего к перегрузке по току;

снижения электроизоляционных свойств конструкционных материалов от старения;

ухудшения теплоотвода при неправильной установке и (или) эксплуатации;

повышенного рассеяния мощности из-за изменения электрического режима при отказе «прилегающих» комплектующих элементов;

образования электрических цепей, не предусмотренных конструкцией.

1.4. ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ПОЖАРООПАСНЫХ ОТКАЗОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

В ГОСТ 12.1.004-91 условие пожаробезопасности электротехнического изделия оценивается в соответствии с выражением:

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{п.р}} Q_{\text{п.з}} Q_{\text{н.з}} Q_{\text{в}} \le 10^{-6}, \qquad (1.1)$$

где $Q_{\text{п.р}}$ - вероятность возникновения характерного пожароопасного режима в составной части изделия (возникновения короткого замыкания (КЗ), перегрузки, повышения переходного сопротивления и т.п.), 1/год; $Q_{\text{п.з}}$ - вероятность того, что значение характерного электротехнического параметра (тока, переходного сопротивления и др.) лежит в диапазоне пожароопасных значений; $Q_{\text{н.з}}$ - вероятность несрабатывания аппарата защиты (электрической, тепловой и т.п.); $Q_{\text{в}}$ - вероятность достижения горючим материалом критической температуры или его воспламенения.

Полученные данные о фактических вероятностях возникновения пожаров сравнивают с нормативной величиной 10^{-6} в год (в расчёте на одно изделие). Изделие считается пожаробезопасным, если фактическая или расчётная (для новых изделий) вероятность возникновения пожара не превышает нормативной.

Объективным показателем оценки пожарной опасности электрических изделий является вероятность возникновения пожара, учитывающая как возникшие пожары, так и количество изделий данного вида, находящихся в эксплуатации. Как было отмечено выше, в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.004-91 эта вероятность для одного изделия не должна превышать 10^{-6} пожаров в год. Фактическая веро-

ятность возникновения пожаров от электротехнических изделий определяется по формуле

$$Q = \frac{n}{N}, \qquad (1.2)$$

где n - количество пожаров в год от изделий определённого вида; N - количество изделий определённого вида, находящихся в эксплуатации.

Вероятностные показатели пожарной опасности электротехнических изделий на основе статистических данных приведены в табл.1.3.

Таблица 1.3

Изделие	Вероятность возникновения		Вероятность перехода загорания в пожар
	пожара	загорания	
Электроплитка	$7{,}5\cdot10^{-5}$	$1{,}35\cdot10^{-4}$	0,56
Телевизор	$7{,}5\cdot10^{-5}$	$1{,}08\cdot10^{-4}$	0,53
Электрокамин	$7{,}5\cdot10^{-5}$	$5{,}2\cdot10^{-5}$	0,58
Холодильник	$8{,}25\cdot10^{-6}$	$1{,}54\cdot10^{-5}$	0,53
Трансформатор регулировочный; стабилизатор напряжения	$7{,}86\cdot10^{-6}$	$1{,}47\cdot10^{-5}$	0,53
Электроутюг	$7{,}80\cdot10^{-6}$	$1{,}43\cdot10^{-5}$	0,54
Светильник с лампой накаливания	$5{,}39\cdot10^{-6}$	$9{,}96\cdot10^{-6}$	0,54
Магнитофон	$4{,}15\cdot10^{-6}$	$7{,}77\cdot10^{-6}$	0,53
Радиоприёмник	$3{,}86\cdot10^{-6}$	$7{,}08\cdot10^{-6}$	0,55
Электровентилятор	$3{,}77\cdot10^{-6}$	$6{,}62\cdot10^{-6}$	0,57
Электродвигатель	$1{,}18\cdot10^{-6}$	$1{,}94\cdot10^{-6}$	0,61
Электропаяльник	$1{,}07\cdot10^{-6}$	$1{,}76\cdot10^{-6}$	0,61
Магнитный пускатель	$9{,}70\cdot10^{-7}$	$1{,}70\cdot10^{-6}$	0,57

Для того чтобы электротехнические изделия не представляли пожарной опасности, необходимо при разработке иметь информацию о пожарной опасности их составных частей. Перечень методов оценки пожарной опасности электротехнических изделий и последовательность действий для принятия решения о соответствии изделия требованиям пожарной безопасности приведён на рис. 1.5.

При оценке пожарной опасности электротехнических изделий используются характеристики надёжности комплектующих элементов и данные об аварийных пожароопасных режимах. В табл. 1.4 приведены значения пожароопасных режимов для комплектующих элементов электротехнических изделий.

Аварийные пожароопасные режимы определяются при имитации неисправностей комплектующих элементов в функциональных узлах электрооборудования. Выявляются комплектующие, отказ которых приводит к воспламенению материалов, находящихся в непосредственной близости, либо самих комплектующих.

Таблица 1.4

Наименование пожароопасных показателей	Транзисторы в пластмассовых корпусах (без радиаторов) мощностью, Вт			Микросхемы в пластмассовых корпусах с числом выводов	Резисторы мощностью, Вт	
	до 0,3	от 0,3 до 1,5	свыше 1,5	до 16	1	2
Мощность, Вт	4	7	10	12	8	16
Ток, А	0,8	2,8	4	4	-	-

Вероятность воспламенения электротехнического изделия определяется следующим выражением:

$$Q_{\text{в.э}} = \left[1 - (1 - Q_{\text{э}})(1 - Q_{\text{м}})\right] Q_{\text{н.з}} \ , \qquad (1.3)$$

где $Q_{\text{э}}$ - вероятность возникновения пожара, определяемая комплектующими элементами электротехнического изделия; $Q_{\text{м}}$ - вероятность возникновения источника зажигания, обусловленная конструктивными особенностями и технологией изготовления электротехнического изделия; $Q_{\text{н.з}}$ - вероятность несрабатывания аппарата защиты электротехнического изделия.

Величина $Q_{\text{э}}$ определяется по формуле

$$Q_{\text{э}} = 1 - \prod_{i=1}^{n} \left[1 - P^{*}_{i\,\text{к.э}}\right] \approx \sum_{i=1}^{n} P^{*}_{i\,\text{к.э}} \ , \qquad (1.4)$$

где $P^{*}_{i\,\text{к.э}}$ - вероятность воспламенения электротехнического изделия от пожароопасного комплектующего элемента *i*-го типа; *n* - число типов элементов. Тогда вероятность воспламенения электротехнического изделия от транзисторов можно обозначить как $P^{*}_{1\,\text{к.э}}$, от диодов - как $P^{*}_{2\,\text{к.э}}$, от конденсаторов - как $P^{*}_{3\,\text{к.э}}$, от трансформаторов - как $P^{*}_{4\,\text{к.э}}$ и т. д.

Величина $P^{*}_{i\ к.э}$ определяется выражением:

$$P^{*}_{i\ к.э} = 1 - \prod_{j=1}^{m}\left(1 - P_j\right) \approx \sum_{j=1}^{m} P_j \ , \qquad (1.5)$$

где P_j - вероятность возникновения источника зажигания пожароопасного элемента *i*-го типа; *m* - число пожароопасных элементов определённого вида в электротехническом изделии (табл. 1.5).

Таблица 1.5

Группа комплектующих элементов	Распределение вероятностей отказов комплектующих элементов по видам							
	Параметрические	Обрыв	Короткое замыкание	Пробой	Отсутствие контакта	Мех. повреждение, обрыв вывода	Элементы хим. повреждения	Нарушение технологии изготовления
Полупроводниковые диоды	0,412	0,264	0,047	0,047	-	-	-	0,23
Транзисторы	0,499	0,227	0,077	0,023	-	0,056	-	0,113
Конденсаторы	0,43	-	0,13	0,075	-	0,075	0,043	0,247
Резисторы	0,412	0,192	0,027	-	0,082	0,096	0,027	0,164
Трансформаторы, дроссели линии задержки	0,324	0,353	0,058	-	-	0,147	-	0,118
Переключатели	0,045	-	-	-	0,505	0,315	-	0,135
Разъёмы	0,038	-	0,095	-	-	0,448	-	0,419
Приборы электронно–лучевые	0,25	0,031	-	0,094	-	0,494	-	0,131
Приборы газоразрядные	0,715	-	0,095	0,19	-	-	-	-

Величина P_j определяется в соответствии с выражением

$$P_j = \lambda_j T P_{кз/отк} Q_{j\ к.э} Q_{j\ к.м} \ , \qquad (1.6)$$

где λ_j - интенсивность отказов *j*-го комплектующего элемента электротех-

нического изделия, 1/ч (табл. 1.6); T - средняя продолжительность работы электротехнического изделия, ч; $P_{\text{КЗ/отк}}$ - вероятность появления короткого замыкания в пожароопасном комплектующем элементе при отказе (см. табл. 1.6); $Q_{j\ \text{к.э}}$ - вероятность воспламенения j-го комплектующего элемента (табл. 1.7); $Q_{j\ \text{к.м}}$ - вероятность воспламенения конструкционных материалов, находящихся в непосредственной близости от пожароопасных комплектующих элементов (табл. 1.8).

Для оценки интенсивности отказов пожароопасных элементов электрооборудования используются данные отраслевого стандарта ОСТ 4.202.00-78.

При оценке $P_{\text{КЗ/отк}}$ учитывается наиболее опасный вид отказа - короткое замыкание.

Таблица 1.6

Комплектующие элементы	λ_j, 1/ч	$P_{\text{КЗ/отк}}$
Диоды	$1\cdot10^{-7}\div1\cdot10^{-10}$	0,05÷0,19
Транзисторы	$1\cdot10^{-6}\div1\cdot10^{-8}$	0,02÷0,13
Конденсаторы	$1\cdot10^{-6}\div1\cdot10^{-9}$	0,13÷0,39
Трансформаторы	$1\cdot10^{-4}\div1\cdot10^{-9}$	0,06÷0,25
Интегральные микросхемы	$1\cdot10^{-6}\div1\cdot10^{-10}$	0,047÷0,19

Таблица 1.7

Резисторы 2 Вт	Конденсаторы К73-17	Транзисторы КТ-315	ИМС К155	Трансформаторы	Диоды
$1\cdot10^{-1}$	$1\cdot10^{-2}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-4}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-5}$

Таблица 1.8

Резисторы 2 Вт	Конденсаторы К73-17	Транзисторы КТ-315	ИМС К155	Трансформаторы	Диоды
$1\cdot10^{-1}$	$1\cdot10^{-1}$	$1\cdot10^{-4}$	$1\cdot10^{-2}$	$1\cdot10^{-2}$	$1\cdot10^{-3}$

Определим $Q_{\text{м}}$ - вероятность возникновения источника зажигания электротехнического изделия, связанную с технологией изготовления:

$$Q_{\text{м}} = 1 - \prod_{k=1}^{L}\left[1 - P^{*}_{k\ \text{к.м}}\right] \approx \sum_{k=1}^{L} P^{*}_{k\ \text{к.м}}\ , \qquad (1.7)$$

где $P^{*}_{k\ \text{к.м}}$ - вероятность возникновения источника зажигания электротехнического изделия от k-го типа производственных отказов; L - число типов отказов. Тогда вероятность возникновения источника зажигания электротехнического изделия от некачественных паяных соединений можно обозначить как $P^{*}_{1\ \text{к.м}}$, от замыканий проводников - как $P^{*}_{2\ \text{к.м}}$, от обрывов проводника - как $P^{*}_{3\ \text{к.м}}$, от нарушений контактов в разъёмах - как $P^{*}_{4\ \text{к.м}}$ и т.д.

Величина $P^{*}_{k\ \text{к.м}}$ определяется по формуле

$$P^*_{k\ \text{к.м}} = 1 - \prod_{s=1}^{r}(1 - P_s) \approx \sum_{s=1}^{r} P_s \ , \qquad (1.8)$$

где P_s - вероятность возникновения источника зажигания электротехнического изделия от s-го отказа по k-му типу отказа; r - число пожароопасных отказов по типу k.

Вероятностные показатели возникновения пожароопасных производственных отказов приведены в табл. 1.9.

Таблица 1.9

Причины возникновения отказов	Вероятность возникновения источника зажигания по различным видам отказов $P^*_{k\ \text{к.м}}$
Некачественные паяные соединения	$4{,}0 \cdot 10^{-2}$
Замыкания проводников	$0{,}19 \cdot 10^{-2}$
Обрыв проводника	$0{,}08 \cdot 10^{-2}$
Нарушение контактов	$0{,}7 \cdot 10^{-2}$
Прочие отказы	$0{,}03 \cdot 10^{-2}$
Суммарная вероятность отказа	$5{,}02 \cdot 10^{-2}$

Величина P_s определяется зависимостью

$$P_s = \frac{n}{N}, \qquad (1.9)$$

где n - число пожароопасных отказов технологических элементов, определяется при имитации отказов; N - общее количество технологических элементов в электротехническом изделии.

Вероятность несрабатывания защиты электротехнического изделия вычисляется по следующей формуле:

$$Q_{\text{н.з}} = k_1 k_2, \qquad (1.10)$$

где k_1 - коэффициент, характеризующий защищённость электротехнического изделия от пожароопасных режимов; k_2 - коэффициент, учитывающий наличие или отсутствие в электротехническом изделии специальной системы пожаротушения. При наличии такой системы значение $k_2 = 0{,}05$, при её отсутствии $k_2 = 1$.

Величина k_1 рассчитывается по формуле

$$k_1 = 1 - \frac{Z}{N},$$

где N - число пожароопасных режимов (определяется в процессе имитации неисправностей); Z - число режимов, при которых срабатывает защита электротехнического изделия (определяется в процессе имитации неисправностей).

В качестве иллюстрации изложенного материала приведён расчёт вероятности возникновения пожара от телевизора модели 3УСЦТ.

Вероятность возникновения источника зажигания от транзистора:

$$P_1 = m\lambda_1 T P_{\text{кз/отк}} Q_{j\ \text{к.э}} Q_{j\ \text{к.м}} =$$

$$= 1 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}5 \cdot 10^{3} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 3 \cdot 10^{-12},$$

где $P_{\text{КЗ/отк}} = 2 \cdot 10^{-2}$ вероятность, характеризующая отказ транзистора в результате внутренних коротких замыканий (справочные данные); T=1,5·10^{-3} ч - средняя продолжительность работы телевизора в год; m = 1 - количество пожароопасных транзисторов (см. табл. 1.6). Для модели 3УСЦТ таким транзистором является КТ-829Б.

Аналогично вычислена вероятность возникновения источника зажигания от других пожароопасных комплектующих элементов телевизора (табл. 1.10).

Таблица 1.10

Элемент	Вероятность отказа
Транзистор P_1	$3 \cdot 10^{-12}$
Диод P_2	$2{,}82 \cdot 10^{-12}$
Трансформатор P_3	$1{,}74 \cdot 10^{-9}$
Конденсатор P_4	$9{,}0 \cdot 10^{-8}$
Интегральная микросхема P_5	$4{,}0 \cdot 10^{-12}$
Суммарная вероятность отказа	$9{,}2 \cdot 10^{-8}$

Величина $Q_э$ составит

$$Q_э = \sum_{i=1}^{n} P^*_{i\ \text{к.э}} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 9{,}2 \cdot 10^{-8}.$$

Вероятность возникновения источника зажигания в результате пожароопасного отказа технологического элемента:

$$Q_м = \sum_{k=1}^{L} P^*_{k\ \text{к.м}} = 5{,}02 \cdot 10^{-2}.$$

Определим величину коэффициента k_1.

Роль специальной защиты выполняет противопожарный резистор R_{26}. При имитации возможных пожароопасных неисправностей резистор сработал в четырёх случаях из 18 (согласно перечню неисправностей, приведённых в методике). Таким образом, $k_1 = 4/18 = 2{,}2 \cdot 10^{-1}$.

Коэффициент k_2 = 1, так как в телевизоре 3УСЦТ отсутствует специальная система пожаротушения. Следовательно, $Q_{\text{н.з}} = k_1\, k_2 = 2{,}2 \cdot 10^{-1}$.

Вероятность возникновения пожара в телевизоре:

$$Q_{\text{в.э}} = \left[1 - (1 - Q_э)(1 - Q_м)\right] Q_{\text{н.з}} =$$

$$= \left[1 - \left(1 - 9{,}2 \cdot 10^{-8}\right)\left(1 - 5{,}02 \cdot 10^{-2}\right)\right] 2{,}2 \cdot 10^{-1} \approx 1{,}1 \cdot 10^{-2}.$$

Расчёт показал, что модель телевизора 3УСЦТ не удовлетворяет требованиям пожарной безопасности в соответствии с ГОСТ 12.1.004-91, так как

$$Q_{\text{в.э}} = 1{,}1 \cdot 10^{-2} > 1 \cdot 10^{-6}.$$

Для оценки пожарной опасности электротехнического изделия (электроустановки) необходимо разрабатывать индивидуальную программу и методику испытаний, учитывающую типы применяемых комплектующих элементов, материалов, конструкцию изделия. Алгоритм оценки пожарной опасности электротехнических изделий (электроустановок) приведён на рис. 1.6.

Испытания электротехнических изделий (электроустановок) на пожарную опасность проводят специализированные лаборатории.

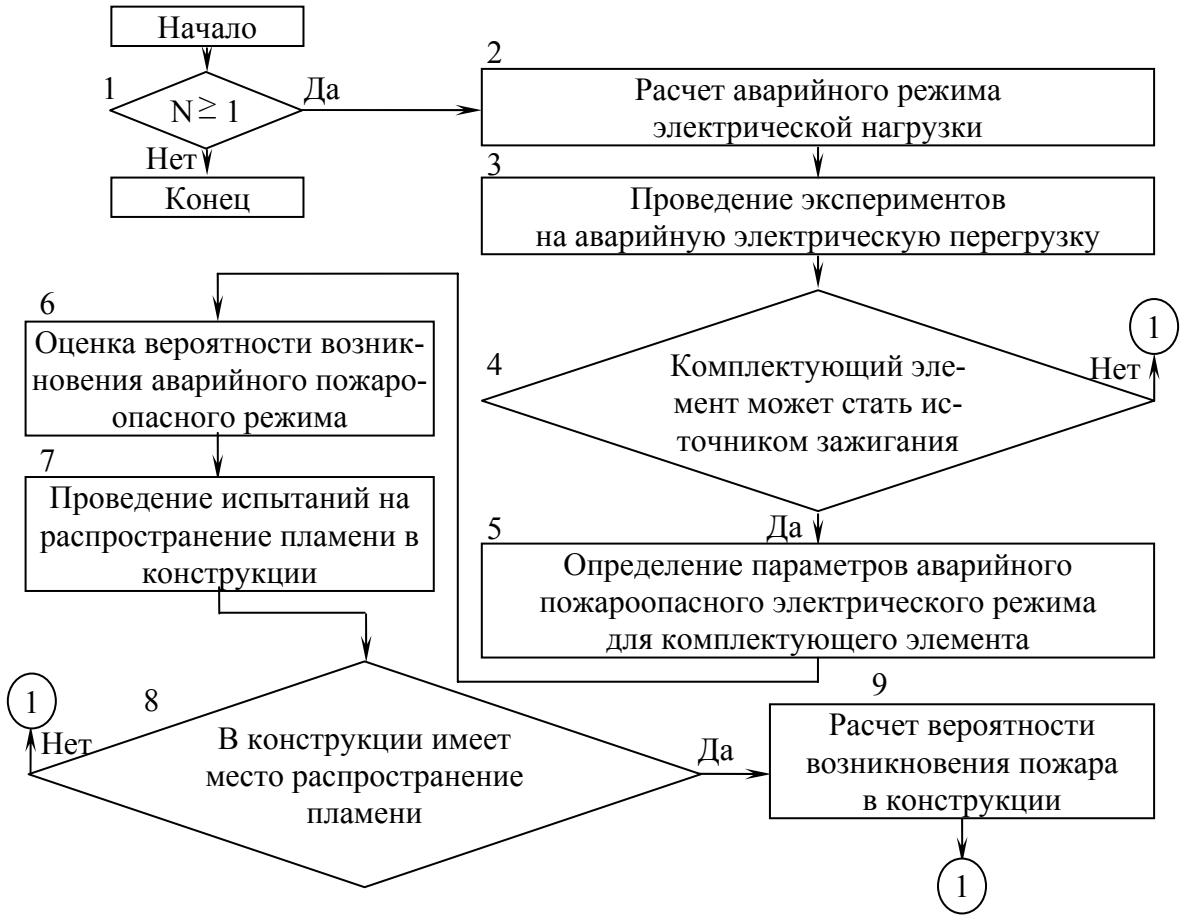


Рис. 1.6. Алгоритм определения пожарной опасности электротехнических изделий (электроустановок):
N – число комплектующих элементов в электротехническом изделии электротехнических устройств

1.5. ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ КОМПЛЕКТУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Пожарная безопасность электротехнических устройств может быть

обеспечена при условии, если ко всей номенклатуре комплектующих элементов предъявляются требования пожарной безопасности. Проверка этих требований должна осуществляться объективными и достоверными методами.

Показатели пожарной опасности для электротехнических устройств в настоящее время приведены в стандартах. Например, согласно ГОСТ 20.57.406-81 [47], изделия электронной техники и их комплектующие элементы должны испытываться на пожарную безопасность с помощью двух методов.

Первый метод в соответствии с ГОСТ 20.57.406 (409-1) [47] – это испытание на воздействие пламени. Метод характеризует пожарную безопасность комплектующих элементов при внешнем воздействии источника зажигания, в качестве которого используется пламя газовой горелки, выполненной из металлической трубки диаметром (0,5 ± 0,1) мм. Время приложения пламени устанавливается в ТУ на изделие или в программе испытаний в зависимости от теплофизических характеристик изделия. Комплектующий элемент считается выдержавшим испытание, если время его горения после удаления горелки не превышает 30 с. Этим же методом испытываются материалы, из которых изготавливается конструкция электротехнического устройства.

Второй метод – испытание на воздействие аварийных электрических перегрузок по ГОСТ 20.57.406 (409-2) [47] – применяется только для комплектующих элементов. Уровень электрической перегрузки устанавливается с помощью опытов, исходя из условий возможного пожароопасного режима работы комплектующего элемента. Оценивается возможность зажигания окружающих элементов и (или) конструкционных материалов электротехнического (электронного) устройства.

Представленные методы испытаний позволяют определить показатели пожарной опасности отдельных комплектующих элементов: резисторов, транзисторов, интегральных микросхем, конденсаторов, моточных изделий и т.д.

Пожарная опасность резисторов. Резистор является самым распространенным комплектующим элементом в электротехнических устройствах. В зависимости от назначения и условий эксплуатации отечественная промышленность производит типовой ряд резисторов, корпус которых изготовлен из металла, керамики или полимерного материала. Источником зажигания резистор может стать при отказе «прилегающих» к нему комплектующих элементов. На рис. 1.7 приведен фрагмент электрической схемы блока питания электротехнического устройства. Пожарную опасность в рассматриваемой электрической схеме представляют резисторы *R*1-*R*3 типа С5, номинальная мощность которых составляет 5 Вт и корпус которых изготовлен из полимерного материала. Резисторы стоят в цепи эмиттеров транзисторов VT1-VT3. При отказе типа «короткое замыка-

ние» одного из транзисторов, например VT1, к резистору *R*1 в электрической цепи отказавшего транзистора прикладывается 10 В, в результате на резисторе выделяется мощность около 1 кВт. При таком режиме работы резистор нагревается и становится источником зажигания. Температура корпуса резистора в аварийном режиме работы может превышать в течение длительного времени температуру воспламенения окружающих конструкционных материалов. У керамических резисторов в аварийном режиме работы происходит вспышка при выгорании краски с поверхности их корпуса. Если конструкция электротехнического устройства не является пылезащищенной, то создаются условия для поджигания пыли и возникновения вторичных источников зажигания через открытое пламя. Температура выводов резистора в аварийном пожароопасном режиме работы превышает температуру плавления припоя. Контакты разрушаются и создаются дополнительные переходные сопротивления, которые также могут стать источниками зажигания конструкционных материалов.

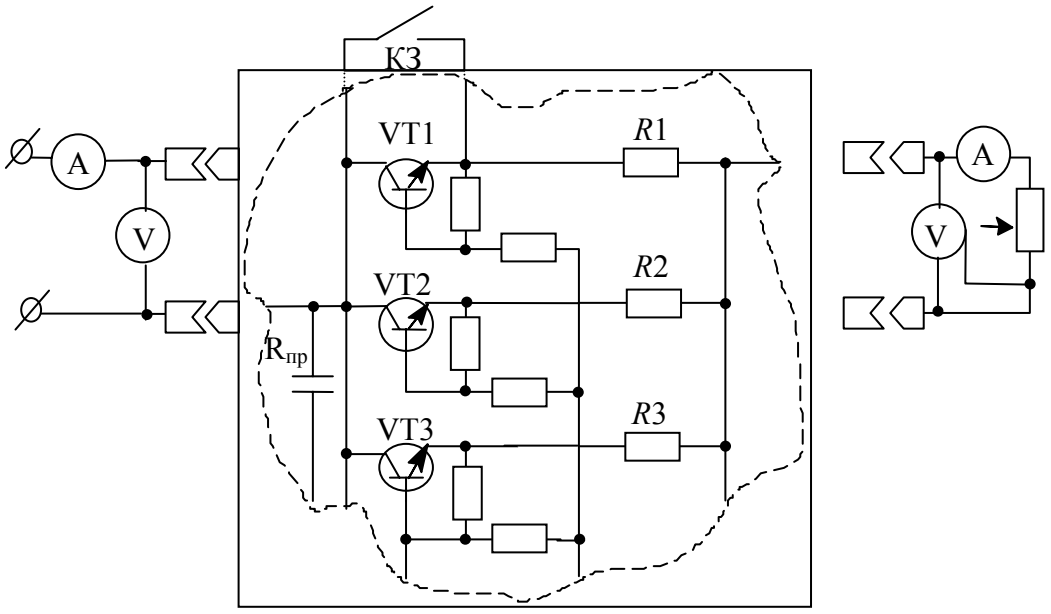


Рис. 1.7. Фрагмент схемы платы ПСТ– 01 в блоке ВВП–01

Наибольшую пожарную опасность в аварийном режиме работы представляют резисторы типа С5, которые конструктивно могут быть выполнены в разных вариантах. Корпус резистора первого варианта выполнен из полимерного материала. В аварийном режиме работы такой корпус горит и обладает эффектом сильного дымообразования. Второй вариант корпуса резистора С5 представляет собой металлическую оболочку. В течение длительного времени он может работать в аварийном режиме при температуре 600-800 °С. Зависимость температуры нагрева керамического корпуса резистора типа МЛТ2-20 от времени в аварийном режиме работы приведена на рис. 1.8. Зависимость времени зажигания материала печатной платы из

фольгированного стеклотекстолита СТФ2-35-1,5 от мощности, выделяющейся на резисторе С5 в аварийном режиме работы, приведена на рис. 1.9.

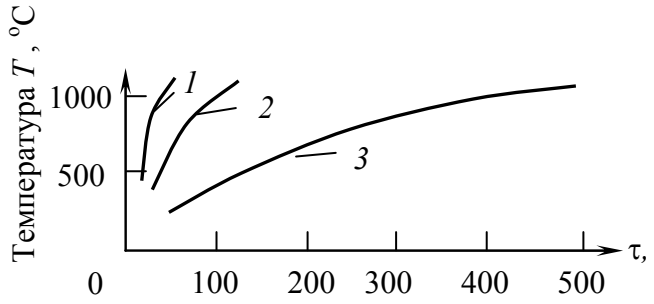


Рис. 1.8. Зависимость температуры нагрева поверхности корпуса резистора МЛТ2-20 от времени в аварийном режиме:
1 - мощность 50 Вт; *2* - мощность 45 Вт; *3* - мощность 20 Вт

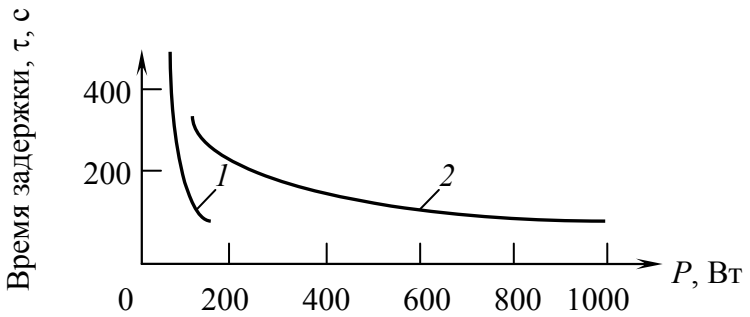


Рис. 1.9. Зависимость времени зажигания материала печатной платы от мощности, выделяющейся на резисторе в аварийном режиме:
1 - МЛТ2-20 Ом; *2* - С5-5-120 Ом

При электрической перегрузке резисторов возникают также отказы типа «обрыв», при этом температура корпуса резистора не достигает пожароопасных значений. Пожароопасный аварийный режим работы резистора - событие вероятное.

Резисторы, имеющие номинальную мощность 0,125-0,5 Вт, пожарной опасности для конструкционных материалов не представляют.

При возникновении на них аварийных электрических режимов происходит разогрев корпуса резистора в центральной части с образованием трещины, после чего электрическая цепь «обрывается». Резисторы 0,125-0,5 Вт при разогреве корпуса в аварийном режиме работы «выходят» в обрыв, в сущности, выполняя роль предохранителей. Резисторы с номинальной мощностью 2 Вт и более в условиях аварийного электрического режима работы могут стать источниками зажигания в электротехнических устройствах.

Пожарная опасность транзисторов. Один из режимов работы полупроводниковых приборов характеризуется максимально допустимой температурой перехода *T*, °С, лимитируемой критической температурой, при

которой наступает вырождение полупроводника и электронно-дырочный переход не выполняет своих функций. При этом можно наблюдать два «крайних» варианта отказов полупроводниковых комплектующих элементов. К первому варианту отказа можно отнести «обрыв» электрической цепи, а ко второму варианту отказа - возникновение «короткого замыкания» по цепи анод-катод для полупроводниковых диодов, либо «короткого замыкания» по цепи эмиттер-коллектор для полупроводниковых транзисторов. Отказ типа «обрыв» для полупроводниковых элементов пожарной опасности не представляет, так как прекращается прохождение электрического тока. При отказе полупроводникового комплектующего элемента типа «короткое замыкание» возникает, как правило, переходное сопротивление, на котором может выделяться значительная мощность. Отказ полупроводникового комплектующего элемента, как и любого другого комплектующего элемента, является событием случайным. Отказ типа «короткое замыкание» – более редкое событие. При отказе типа «короткое замыкание» полупроводниковые комплектующие элементы, находясь в аварийном режиме работы, могут воспроизводить источники тепла в виде «нагретой поверхности» или «открытого пламени». Источник тепла типа «нагретая поверхность» представляет собой корпус полупроводникового прибора, выполненный из керамического материала. Источник тепла типа «открытое пламя» возникает при отказе типа «короткое замыкание» у полупроводниковых приборов, корпус которых изготовлен из полимерного материала.

Определение температуры нагрева корпуса полупроводникового комплектующего элемента и электрического режима, при котором может возникнуть источник зажигания, является важным условием обеспечения пожарной безопасности комплектующих элементов электротехнических устройств.

В качестве примера рассматриваются аварийные режимы работы транзистора типа КТ-315, корпус которого выполнен из полимерного материала. Возможны различные варианты изменения температуры корпуса транзистора для образовавшихся случайным образом переходных сопротивлений в результате отказа типа «короткое замыкание».

Пламя горящего корпуса транзистора может достигать высоты 60-70 мм, а продолжительность горения может составлять 15-40 с.

Образовавшееся переходное сопротивление при отказе типа «короткое замыкание» и номинальная мощность переходного сопротивления имеют значительный разброс. Например, минимальная мощность, при которой начинает выделяться дым из корпуса транзистора типа КТ-315, равна 2 Вт.

Ток аварийного пожароопасного режима, при котором происходит воспламенение корпуса транзистора, равен 0,8 А. Электрический режим,

при котором транзистор может стать источником зажигания, значительно превышает номинальные параметры. Поэтому в электрических цепях пожароопасных полупроводниковых комплектующих элементов необходимо ставить дополнительно защиту от аварийного электрического режима.

Время зажигания корпуса транзистора зависит от тока потребления в аварийном режиме и находится в интервале 5-30 с.

При аварийном режиме работы корпус транзистора выделяет токсичные газы и обладает сильным дымообразованием.

Пожароопасный отказ полупроводникового комплектующего элемента является событием вероятным.

Пожарная опасность интегральных микросхем. Отечественная промышленность производит большую номенклатуру интегральных микросхем. Для изготовления корпуса интегральных микросхем применяются полимерные материалы или керамика. Интегральные микросхемы могут быть малой, средней или большой интеграции, поэтому они отличаются размерами, массой, топологией электрической схемы, быстродействием и т.д. Отказ интегральной микросхемы так же, как и дискретного комплектующего элемента электротехнического устройства, может быть многовариантным.

Отказ интегральной микросхемы может сопровождаться образованием «новых» электрических цепей, не предусмотренных конструкцией. Уменьшение сопротивления интегральной микросхемы по цепи питания приводит к увеличению тока потребления.

Отказ, при котором температура корпуса интегральной микросхемы достигает значения, равного или большего температуры воспламенения, представляет пожарную опасность. Зафиксированы отказы интегральных микросхем, при которых температура корпуса достигает 150-400 °С. Такая температура представляет пожарную опасность как для материала корпуса интегральной микросхемы, так и для окружающих конструкционных материалов. Испытание интегральных микросхем на пожарную опасность проводят методом электрической перегрузки в соответствии с ГОСТ 20.57.406 (409-2). Зависимость, показывающая изменение температуры корпуса интегральной микросхемы от времени в аварийном электрическом режиме, представлена на рис. 1.10. Кривая *1* показывает изменение температуры корпуса интегральной микросхемы в аварийном режиме, значение которой превышает пожароопасный уровень. Кривая *2* показывает, что температура корпуса интегральной микросхемы в аварийном режиме достигла 430 °С, после чего произошло увеличение переходного сопротивления по цепи питания. Ток стал меньше, вследствие чего температура тоже уменьшилась. Кривая *3* показывает, что при аварийном режиме работы интегральной микросхемы может произойти вторичный отказ типа «короткое

замыкание». При уменьшении переходного сопротивления интегральной микросхемы по цепи питания происходит резкое увеличение температуры корпуса. Кривые *4*, *5* и *6* показывают, что после возникшего аварийного режима в интегральной микросхеме температура корпуса увеличивается незначительно, после чего происходит обрыв электрической цепи.

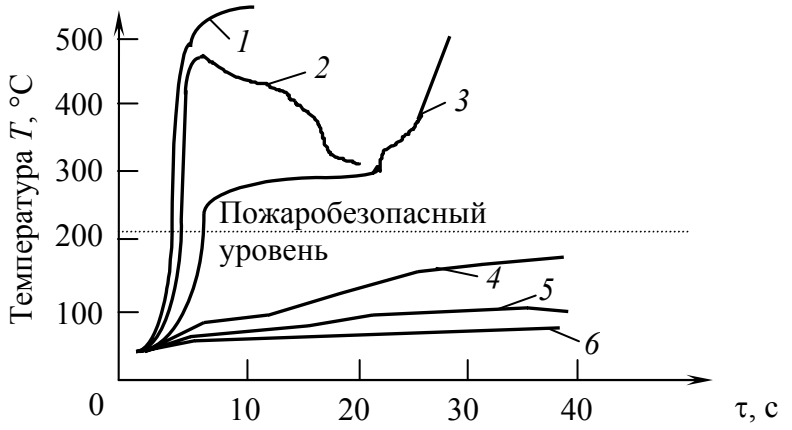


Рис. 1.10. Зависимость температуры корпуса интегральной микросхемы от времени в аварийном режиме

Механизм возникновения пожароопасного отказа интегральной микросхемы в реальных условиях эксплуатации может иметь следующую модель. Интегральная микросхема представляет собой совокупность транзисторных ключей, часть которых находится в «открытом», а другая в «закрытом» состоянии. Условно транзистор в открытом состоянии можно сравнить с выключателем, который находится в состоянии «включено». В открытом состоянии транзистор представляет собой проводник, обладающий небольшим сопротивлением для протекающего тока по цепи эмиттер-коллектор. В закрытом состоянии транзистор можно сравнить с выключателем, который находится в состоянии «отключено». В закрытом состоянии ток через транзистор по цепи эмиттер - коллектор не протекает. При повышенном напряжении питания в интегральной микросхеме увеличивается потребляемый от источника ток и мощность. Если напряжение питания больше предельного, происходит пробой переходов транзисторов по цепи эмиттер – база – коллектор. При этом скачкообразно нарастает ток, потребляемый интегральной микросхемой, что приводит к нагреву кристалла. Функциональные характеристики переходов вырождаются. Ток, потребляемый интегральной микросхемой в аварийном пожароопасном режиме, может достигать 1-6 А.

Зависимость времени зажигания корпуса интегральной микросхемы типа К-155 от рассеиваемой мощности в аварийном пожароопасном режиме представлена на рис. 1.11.

При разогревании проводников кристалла до температуры пиролиза материала корпуса интегральной микросхемы продукты задымления обогащают углеродом окружающее пространство, и ток начинает протекать по углеродным «мостикам» к внешним выводам. В интегральных микросхемах могут быть дефектные переходы с уменьшенным значением пробивного напряжения. Такие переходы при нормальном напряжении питания ведут себя аналогично рассмотренным выше режимам.

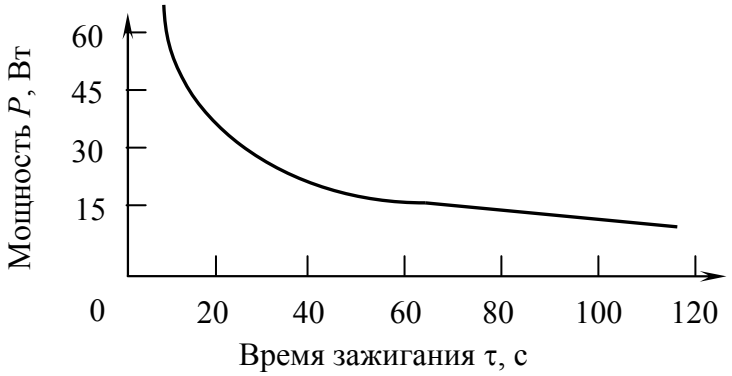


Рис. 1.11. Зависимость времени зажигания корпуса интегральной микросхемы от потребляемой мощности в аварийном режиме

Из 12 классификационных видов дефектов, приводящих к отказам полупроводниковых интегральных микросхем, 9 дефектов приводят к отказам типа «короткое замыкание» переходов транзисторов или диодов при нормальном значении напряжения питания.

Время зажигания корпуса интегральной микросхемы зависит от тока потребления в аварийном пожароопасном электрическом режиме и может составлять 30-120 с. В раскаленном состоянии интегральная микросхема, аналогично резистору, может стать источником зажигания для окружающих комплектующих элементов и конструкционных материалов.

Пламя горящей интегральной микросхемы под действием электрического тока может достигать высоты 10-60 мм. При аварийном режиме работы из интегральной микросхемы выделяются ядовитые газы и дым.

Минимальная мощность аварийного электрического режима, при которой начинает выделяться дым из корпуса интегральной микросхемы типа К-155, равна 2,5 Вт, что соответствует температуре нагрева 250-300 °С. Активный пиролиз корпуса интегральной микросхемы начинается при токе потребления 4-4,5 А. Ток потребления горящей микросхемы типа К-155 составляет не менее 5 А. Ток аварийного пожароопасного электрического режима интегральной микросхемы значительно превышает значение номинального тока потребления. Время горения корпуса микросхемы при пожароопасном отказе может составлять от 5 до 120 с.

Пожарную безопасность интегральных микросхем можно обеспечить аппаратами защиты либо источниками питания с ограничением по току.

Пожарная опасность конденсаторов. Конденсаторы, корпус которых изготовлен из полимерного материала, при аварийных электрических режимах работы могут воспламеняться. Из курса физики известно, что конденсатор представляет собой два проводника, разделенных слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводников. Практически все электрическое поле сосредоточено внутри конденсатора. При эксплуатации комплектующие элементы, в том числе и конденсаторы, подвергаются воздействию различных внешних факторов, например перегрузке по напряжению. В результате воздействия внешних факторов появляются деградационные процессы, ухудшающие параметры комплектующих элементов. Наступает момент, когда происходит отказ комплектующего элемента, т.е. выход одного или нескольких параметров за пределы допуска, либо возникает полное прекращение функционирования комплектующего элемента. Из-за изменения величины проводимости утечки у конденсаторов изменяется емкость и снижается электрическая прочность. Электрические нагрузки, в случае недопустимого их изменения, приводят к нарушению температурного режима и электрическим пробоям.

При пробое в конденсаторе может возникнуть отказ типа «обрыв» или «короткое замыкание». Пожарную опасность представляет отказ типа «короткое замыкание», так как конденсатор «вырождается» в переходное сопротивление. Аварийный пожароопасный режим у конденсаторов развивается за считанные секунды. Возникновение аварийного пожароопасного электрического режима у конденсаторов сопровождается потрескиванием и локальным разогревом корпуса до температуры воспламенения.

Горение конденсаторов сопровождается обильным выделением дыма, сажи и отравляющих веществ. Пламя горящего конденсатора под действием электрического тока имеет высоту 30-50 мм. Корпус каждого второго загоревшегося конденсатора под действием электрической перегрузки вследствие размягчения материала отделяется от выводов. Упавшая масса корпуса конденсатора продолжает самостоятельно гореть в течение 5-60 с. Максимальное время горения корпуса конденсатора типа К73-17-63В-1,0 мкФ под действием электрической перегрузки достигает 140 с. Зависимость температуры поверхности корпуса конденсатора от времени в аварийном электрическом режиме приведена на рис. 1.12. Угол наклона характеристики определяется образовавшимся переходным сопротивлением в результате отказа типа «короткое замыкание».

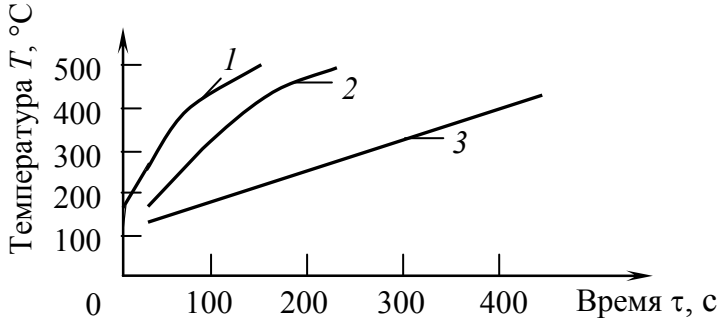


Рис. 1.12. Зависимость температуры поверхности корпуса конденсатора от времени в аварийном режиме:
1 - К53-19-6,3В-330 пФ; *2* - К53-19-6,3В-330 пФ; *3* - К73-17-250В-0,68 мкФ

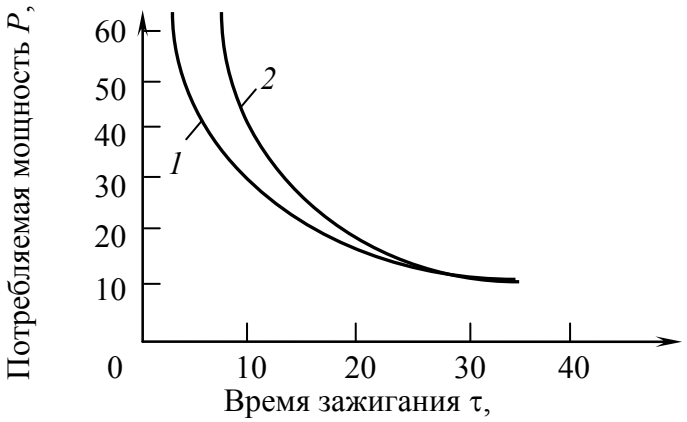


Рис. 1.13. Зависимость времени зажигания материала корпуса конденсатора от потребляемой мощности при аварийном режиме:
1 - К53-19-6,3-330 пФ; *2* - К73-17-6,3-0,68 мкФ

Зависимость времени зажигания корпуса конденсатора от потребляемой мощности при аварийном электрическом режиме приведена на рис. 1.13. Вероятность возникновения образовавшегося переходного сопротивления в конденсаторе при аварийном режиме работы приведена на рис. 1.14. Вероятность возникновения отказа типа «короткое замыкание» для конденсаторов типа К73-17-1,0 мкФ от номинального напряжения приведена на рис. 1.15. Воспламенение возникает у каждого четвертого конденсатора типа К73-17-63В-1,0 мкФ и у каждого десятого конденсатора типа К73-17-250В-1,0 мкФ, находящихся в состоянии «короткое замыкание». Электрические режимы, при которых возникают пожароопасные отказы, нестабильны. Номинальная мощность образовавшегося переходного сопротивления и номинальное значение образовавшегося переходного сопротивления изменяются под воздействием аварийного электрического режима. Конденсаторы типа К73-17, К78-2, К53-19 могут стать источниками зажигания в электротехнических устройствах, если электрическая цепь обеспечивает мощность в нагрузке больше 15 Вт. Пожарную безопасность электротехнических устройств, в конструкции которых применяются конденсаторы, корпус которых изготовлен из полимерного материала, можно обеспечить наличием устройств защиты и экранированием.

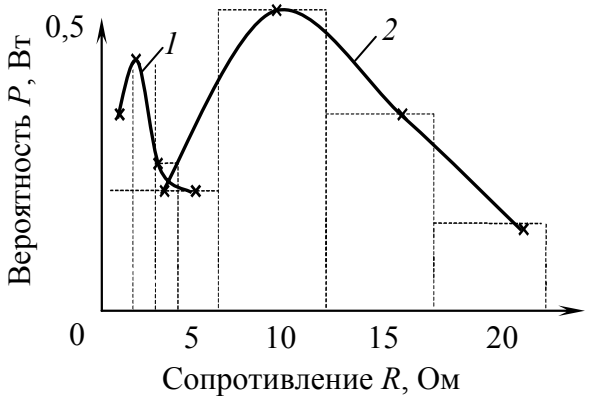


Рис. 1.14. Вероятность возникновения отказа типа «КЗ» (короткое замыкание) конденсаторов типа К53-19-6,3В-330 пФ (*1*), К73-17-250В-0,66 мкФ (*2*)

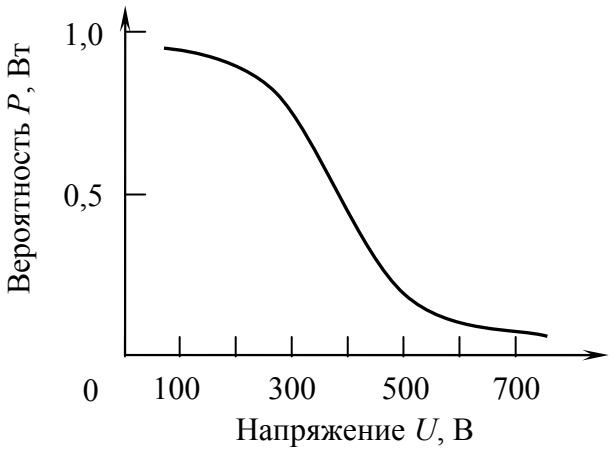


Рис. 1.15. Вероятность возникновения отказа типа «короткое замыкание» для конденсаторов типа К73-17-1,0 мкФ от номинального напряжения

Пожарная опасность моточных комплектующих элементов. В электротехнических изделиях, в автоматических коммутационных и защитных электрических аппаратах применяют электромагнитные механизмы, благодаря которым электрическая энергия, получаемая от источника тока, превращается в механическую, используемую для размыкания контактов. Электромагнитный механизм состоит из двух главных частей: магнитопровода и катушки. Большая роль в обеспечении пожарной безопасности принадлежит катушке, являющейся составной частью многих электротехнических изделий. Катушка состоит из каркаса, на который намотана обмотка. Для придания бескаркасной катушке монолитности витки обмотки стягивают хлопчатобумажной лентой (бандажирование) или между рядами витков применяют электроизоляционные прокладки, обмотку пропитывают электроизоляционной жидкостью, а затем сушат.

В зависимости от назначения электротехнического изделия в них применяют токовые катушки или катушки напряжения. Токовые катушки

рассчитаны на большую силу тока. Токовые катушки изготавливают из обмоточных проводов или голых проводов (шин) сравнительно большой площади сечения.

Катушки напряжения рассчитаны на работу при сравнительно высоком напряжении и небольшой силе тока. Их изготавливают, наматывая обмоточные провода на каркас (каркасные катушки) или на шаблон (бескаркасные катушки). Аналогичная технология изготовления у трансформаторов, дросселей, катушек индуктивности, обмоток двигателя и т.д.

После сушки проверяют, нет ли обрыва в обмотке катушки и соответствует ли ее электрическое сопротивление заданным требованиям. Обмотки катушек проверяют также на отсутствие замыкания между витками. После этого катушки покрывают лаком и (или) эмалями и сушат на воздухе или в печах.

Пожарную опасность в моточных изделиях представляют горючие конструкционные материалы каркасов моточных изделий, пропиточные материалы, изоляционные материалы, применяемые для бандажа обмоток. Источником зажигания в моточных изделиях является обмоточный провод. При возникновении межвитковых замыканий температура обмоточного провода может достигать значений, достаточных для воспламенения горючих конструкционных материалов. Межвитковые замыкания возникают в результате имеющихся дефектов у обмоточного провода. Основными дефектами, при которых возникают межвитковые замыкания, являются: некалиброванное сечение обмоточного провода, некачественное покрытие обмоточного провода лаком, разрушение изоляционного покрытия обмоточного провода при механическом воздействии, перегрузка по току и (или) напряжению обмоточного провода при эксплуатации. В результате возникновения межвиткового замыкания ток в обмоточном проводе протекает, минуя короткозамкнутый виток. Из курса электротехники известно, что сопротивление проводника зависит от его длины, сечения и удельного сопротивления провода. При межвитковом замыкании длина проводника уменьшается, при этом уменьшается и сопротивление обмоточного провода. В результате уменьшения сопротивления обмоточного провода увеличивается ток, протекающий по нему. При увеличении тока происходит дополнительный разогрев обмоточного провода, особенно в месте замыкания витков, так как появляются переходные сопротивления в местах замыкания. Далее процесс развивается аналогично рассмотренному, при этом число короткозамкнутых витков увеличивается, а длина обмоточного провода уменьшается. В результате аварийного электрического режима нагрев обмоточного провода может достигать температуры воспламенения конструкционных материалов. При развивающемся тепловом режиме происходит деформация каркасов моточных изделий, в результате чего возникают

вторичные замыкания по цепи питания. Пожароопасный отказ моточных комплектующих элементов является событием случайным, так как при межвитковых замыканиях в обмоточном проводе могут развиваться электрические режимы, приводящие к обрыву электрической цепи.

Пожарную опасность моточных изделий определяют в соответствии с ГОСТ 20.57.406 (409-2). Уровень электрической перегрузки устанавливается исходя из условий работы конкретного моточного комплектующего элемента.

Если режим аварийной электрической перегрузки (уровень перегрузки и время ее приложения) заранее неизвестен, то для его установления электрическую перегрузку, прикладываемую к моточному комплектующему элементу, постепенно повышают от предельно допустимого значения, установленного в техническом задании на моточный комплектующий элемент, до значения, при котором выполняется одно из следующих условий:

реализуется наибольшая перегрузка моточного комплектующего элемента, задаваемая из условий возможного пожароопасного аварийного режима работы изделия в аппаратуре;

уровень перегрузки стабилизируется (например, дальнейшее увеличение мощности будет практически невозможно);

наступает отказ изделия, при котором устраняются условия перегрузки изделия (например, обрыв электрической цепи).

Пожароопасный отказ моточного комплектующего элемента – событие вероятное.

Глава 2

ВЫБОР И ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЗРЫВО- И ПОЖАРООПАСНЫХ ЗОН И ПОМЕЩЕНИЙ С НОРМАЛЬНОЙ СРЕДОЙ

2.1. НОРМАТИВНАЯ И АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КЛАССОВ ВЗРЫВО- И ПОЖАРООПАСНЫХ ЗОН И ИХ РАЗМЕРОВ

Взрывоопасность горючих смесей

Многие предприятия химической, газовой, нефтяной и других отраслей промышленности связаны с использованием в технологических процессах различных горючих веществ: жидких (бензин, дизельное топливо, масло, спирт), газообразных (аммиак, водород, ацетилен, пропан, метан), твердых (уголь, сера, фосфор). Часто технологический процесс производства протекает при высоких температурах и давлении. Все это создает повышенную опасность возникновения пожаров и взрывов.

Горючие газы и пары легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, смешиваясь с воздухом, кислородом или другими окислителями, при определенной температуре и концентрации могут образовывать горючие смеси. Критериями сравнительной оценки степени их пожаро- и взрывоопасности являются температура вспышки, воспламенения, самовоспламенения, концентрационные пределы распространения пламени (воспламенения) и др.

Горючий газ (ГГ) - газ, способный образовывать с воздухом воспламеняющиеся и взрывоопасные смеси.

Легковоспламеняющаяся жидкость (ЛВЖ) - горючая жидкость, способная воспламеняться от кратковременного (до 30 с) воздействия источника зажигания с низкой энергией (пламя спички, искра, тлеющая сигарета и т.п.), имеющая температуру вспышки 61 °С в закрытом тигле или 66 °С в открытом тигле.

Горючая жидкость (ГЖ) – жидкость, способная возгораться от источника зажигания, самостоятельно гореть после его удаления и имеющая температуру вспышки более 61 °С в закрытом или 66 °С в открытом тигле.

Температура вспышки - самая низкая (в условиях специальных испытаний) температура горючего вещества, при которой над его поверхностью образуются пары и газы, способные вспыхивать от источника зажигания, но скорость их образования еще недостаточна для устойчивого горения.

Температура воспламенения - наименьшая температура вещества, при которой в условиях специальных испытаний вещество выделяет горючие пары и газы с такой скоростью, что после их зажигания возникает устойчивое пламенное горение.

Температура самовоспламенения - самая низкая температура вещества, при которой в условиях специальных испытаний происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, заканчивающихся пламенным горением.

Нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени (воспламенения) - минимальное и максимальное содержание горючего в смеси (пара, газа или тумана), при котором возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания.

Как видно из табл. 2.1, многие ЛВЖ могут образовывать взрывоопасные смеси с воздухом уже при температуре в производственном помещении 10-35 °С, т.е. без дополнительного подогрева, так как эта температура превышает температуру вспышки. Некоторые ЛВЖ образуют взрывоопасные смеси при температуре ниже 0 °С, например сероуглерод, ацетон, бензин. Естественно, более опасными являются жидкости, образующие взрывоопасные смеси паров с воздухом при обычных условиях без дополнительного подогрева.

Таблица 2.1

Горючее вещество	Температура, °С		Концентрационный предел воспламенения, % (об.)	
	вспышки	самовоспламенения	нижний	верхний
Горючие газы				
Аммиак	-	650	15,0	28
Метан	-	537	5,28	14,1
Водород	-	510	4,12	75
Пропан	-	500	2,31	9,5
Ацетилен	-	335	2,5	81
Сероводород	-	246	4,3	46
Легковоспламеняющиеся жидкости				
Бензин А-76	- 35	375	0,79	5,16
Ацетон	- 18	465	2,2	13,0
Спирт метиловый	13	404	3,6	19
Сероуглерод	- 43	95	1,0	50
Скипидар	-34	300	0,8	-

Горючие жидкости с температурой вспышки выше 61 °С относятся к пожароопасным. В обычных производственных условиях горючие жидкости не достигают этой температуры, и поэтому их пары не могут образовывать взрывоопасные смеси. Однако, если ГЖ в условиях производства будет нагрета до температуры вспышки и выше, пары могут образовывать взрывоопасные смеси.

Горючие газы относятся к взрывоопасным при любых температурах окружающей среды. Смесь горючих газов и паров ЛВЖ с воздухом становится опасной только при определенной концентрации, т.е. в диапазоне

нижнего и верхнего концентрационных пределов воспламенения. В этом случае при наличии источника зажигания может произойти взрыв.

Взрывоопасные смеси с воздухом могут образовывать пыль и волокна некоторых горючих веществ.

Горючая пыль - дисперсная система, состоящая из твердых частиц размером менее 850 мкм, находящихся во взвешенном или осевшем состоянии, которая в смеси с воздухом в определенной пропорции образует пылевоздушную взрывоопасную смесь при нормальных атмосферных условиях.

Характерным показателем пожароопасной характеристики пыли или волокон является также температура тления.

Температура тления - температура вещества, при которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций окисления, заканчивающихся возникновением тления.

В табл. 2.2 приводятся параметры, характеризующие пожаро- и взрывоопасность пыли некоторых горючих веществ.

Таблица 2.2

Горючее вещество	Взвешенная пыль		Осевшая пыль; температура, °С,		
	Нижний концентрационный предел воспламенения, г/м^3	Температура воспламенения, °С	тления	воспламенения	самовоспламенения
Мука пробковая	15	460	325	-	-
Пыли мучные	20-30	410	-	-	205
Крахмал картофельный	40,3	430	Не тлеет, обугливается	-	-
Белок подсолнечный пищевой	26,3	-	193	212	458
Сахар свекловичный	8,9	360	Не тлеет, плавится	-	350
Мука древесная	11,2	430	-	-	255

Взрывоопасные смеси воспламеняются в случае, если в электроустановках находится источник зажигания в виде нагретого тела или пламени (электрическая дуга КЗ, искра, возникающая при замыкании или размыкании контактов, чрезмерно высокая температура на поверхности электрооборудования, превышающая температуру самовоспламенения взрывоопасных смесей, и т.п.).

Нормативная оценка классов взрыво- и пожароопасных зон и их размеров

Основополагающей задачей по обеспечению оптимальных вариантов

пожарной безопасности при применении электроустановок, молниезащиты зданий и сооружений, а также средств и мер защиты взрыво- и пожароопасных производств от разрядов статического электричества является объективная оценка взрывоопасной и пожароопасной зоны и ее размеров.

От класса взрывоопасной или пожароопасной зоны зависят требования к электроустановкам [1], необходимость выполнения молниезащиты и ее категория [2, 3], а также средства и меры защиты производств от искр статического электричества [4].

В настоящее время нормативная и аналитическая оценка класса взрывоопасной и пожароопасной зоны производится по гл. 7.3 и 7.4 ПУЭ-86 [1] с использованием указаний СН 463-74 (см. п. 7.3.39 [1]) по величине относительного объема взрывоопасной смеси (менее или равное 5%, более 5%), а также времени испарения ЛВЖ (менее или равное 1ч, более 1ч) в количестве, достаточном для образования взрывоопасной смеси в 5%-ном объеме помещения.

С принятием НПБ 105-95 [5] и отменой СН 463-74 для оценки класса взрыво- и пожароопасной зоны и ее размеров в соответствии с гл.7.3 и 7.4 ПУЭ принят исходный критерий - расчетное избыточное давление взрыва смеси ΔP, менее или равное 5 кПа или более 5 кПа.

Взрывоопасная зона – зона, в которой имеется или может образоваться взрывоопасная газовая смесь в объеме, требующем специальных мер защиты при конструировании, изготовлении и эксплуатации электроустановок [49].

Пожароопасная зона – зона внутри и вне помещений, в пределах которой постоянно или периодически имеются (обращаются) горючие материалы, вещества при нормальном технологическом процессе или при его нарушениях (гл. 7.4 [1]).

Определение границ класса взрывоопасной или пожароопасной зоны производится технологами совместно с электриками проектной или эксплуатирующей организации.

Классы взрывоопасных и пожароопасных зон характерных производств обычно содержатся в нормах технологического проектирования или в отраслевых перечнях производств по взрывопожароопасности.

В проекте редакции гл. 7.3 ПУЭ седьмого издания [3] парогазовые взрывоопасные смеси образуют взрывоопасные зоны классов 0, 1 и 2 (см. также [49]), пылевоздушные взрывоопасные смеси – взрывоопасные зоны классов 20, 21 и 22 (см. также прил. 4 п/п 22). Указанные классы взрывоопасных зон соответствуют (примерно) принятым в гл. 7.3 [1] классам: 0 – В – I; 1 – В – I; В – Iг; 2 – В – Iа; В – Iг и В – Iд (с учетом прил. Г [49]); 20 и 21 – В – II; 22 – В – IIа. Обозначения классов пожароопасных зон П-I, П-II, П-IIа и П-III не изменились (гл. 7.4 [1]).

Взрывоопасная зона класса 0 – зона, в которой газовая взрывоопасная среда присутствует постоянно или в течение длительного периода времени (она может быть только в пределах корпусов технологического оборудования).

Взрывоопасная зона класса 1 – зона, в которой газовая взрывоопасная среда может образоваться при нормальной работе (здесь и далее нормальная работа – это ситуация, когда установка работает согласно расчетным параметрам).

Взрывоопасная зона класса 2 – зона, в которой газовая взрывоопасная среда не может образоваться при нормальной работе (а если и образуется, то она присутствует лишь кратковременно в результате аварий и неисправностей, за исключением катастроф). По прил. Г [49], к зонам, характеризующимся как взрывоопасная зона класса 2, но отличающаяся одной из следующих особенностей:

1) горючие газы имеют высокий нижний концентрационный предел распространения пламени (15 % и более) и обладают резким запахом и предельно допустимыми концентрациями по ГОСТ 12.1.005-76 (например, производства с обращением аммиака, кроме установок с аммиаком при высоком давлении и без обслуживающего персонала);

2) горючие газы, ЛВЖ имеются в таких количествах, что их воспламенение в нормальном и аварийном режимах не может развить расчетное избыточное давление взрыва, превышающее 5 кПа.

Зоны не относятся к взрывоопасным в следующих случаях: работа с горючими газами и ЛВЖ производится в вытяжных шкафах или под вытяжными зонтами; при расчетном избыточном давлении взрыва, не превышающем 0,5 кПа.

Взрывоопасная зона класса 20 – пространство, в котором взрывоопасная пылевоздушная смесь присутствует постоянно (она может быть только в пределах корпусов технологического оборудования).

Взрывоопасная зона класса 21 - зона в помещении, в которой пылевоздушная взрывоопасная смесь может образоваться при нормальной работе.

Взрывоопасная зона класса 22 - зона в помещении, в которой опасные состояния, указанные в зоне 21, маловероятны при нормальной работе и возможны в результате аварий и неисправностей.

Пожароопасная зона П-I - зона в помещении, в которой имеются горючие жидкости.

Пожароопасная зона П-II - зона в помещении, в которой имеются горючие пыли или волокна, при воспламенении которых развивается избыточное давление взрыва, равное или менее 5 кПа.

Пожароопасная зона класса П-IIа - зона в помещении, в которой

имеются твердые или волокнистые не переходящие во взвешенное состояние горючие вещества, материалы.

Пожароопасная зона класса П-III - зона вне помещения, в которой имеются горючие жидкости, пыли, волокна, твердые, в том числе волокнистые, горючие материалы.

При определении размеров взрывоопасных и пожароопасных зон в помещениях необходимо учитывать:

1) взрывоопасные зоны классов 0 и 20 не должны, как правило, быть за пределами корпусов технологического оборудования;

2) при расчетном избыточном давлении взрыва газовой взрывоопасной смеси, превышающем 5 кПа, взрывоопасная зона занимает весь объем помещения;

3) взрывоопасная зона классов 21 и 22 занимает весь объем помещения;

4) при расчетном избыточном давлении взрыва газовой взрывоопасной смеси, равном или менее 5 кПа, взрывоопасная зона занимает часть объема помещения и представляет собой цилиндр с радиусом и высотой, рассчитываемыми технологами согласно ГОСТ 12.1.004-91 [6]. При отсутствии исходных данных зону принимают в виде цилиндра с радиусом, равным 5 м. Высоту отсчитывают от пола помещения - для тяжелых газов и паров, от потолка помещения - для легких газов;

5) при расчетном избыточном давлении взрыва пылевоздушной взрывоопасной смеси, паров перегретых горючих жидкостей, равном или менее 5 кПа, взрывоопасная зона соответственно будет 21, 22 или 2;

6) пространство за пределами ограниченных взрывоопасных зон считается невзрывоопасным, если нет других факторов, создающих в нем взрывоопасность.

В табл. 2.3 приведена классификация рассматриваемых взрыво- и пожароопасных зон, их размеры и индексы обозначений (над чертой - по редакции проекта гл. 7.3 седьмого издания, а под чертой - по гл. 7.3 шестого издания ПУЭ [1]).

Таблица 2.3

Вещества и материалы	Расчетное избыточное давление взрыва, кПа	Категория помещения по НПБ 105-95	Класс взрыво- или пожароопасной зоны	Размеры взрыво- или пожароопасной зоны
Взрывоопасные установки в помещениях				
Горючие газы, ЛВЖ с $t_{всп} \le 28$ °С	Более 5	А	1, 2 B-I, B-Ia	Весь объем помещения

ЛВЖ с $t_{всп} > 28$ °С	Более 5	Б	1, 2 В-1, В-Ia	Весь объем помещения
Горючие газы, ЛВЖ	Равно или менее 5	В1 ÷ В3	1, 2 В-Iб	Часть объема помещения
Горючие пыли, волокна	Более 5	Б	21, 22 В-II, В-IIa	Весь объем помещения
Горючие пыли, волокна	Равно или менее 5	В1 ÷ В3	21, 22 В-II, В-IIa	Часть объема помещения
Горючие газы с НКП > 15 % и резким запахом (аммиак)	Более 5	А	2 В – Ia	Весь объем помещения
То же	Равно или менее 5	В1 ÷ В3	2 В – Iб	Часть объема помещения
Вещества и материалы, способные образовывать взрывоопасные смеси при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом	Более 5	А	2 В-Ia	Весь объем помещения
То же	Равно или менее 5	В1 ÷ В3	2 В – Iб	Часть объема помещения
Перегретые ГЖ	Более 5	Б	2 В –Ia	Весь объем помещения
Перегретые ГЖ	Равно или менее 5	В1 ÷ В3	2 В – Iб	Часть объема помещения
Газообразный водород	Равно или менее 5	В1 ÷ В3	2 В – Iб	Верхняя часть помещения (гл. 7.3 ПУЭ)
Наружные взрывоопасные установки				
Горючие газы, ЛВЖ	-	-	1, 2 В-I, В-Iг	Согласно гл.7.3 ПУЭ
Горючие пыли, волокна	-	-	21, 22 В-II, В-IIa	Согласно гл.7.3 ПУЭ седьмого изд.

Аналитическая оценка классов взрыво- и пожароопасных зон и их размеров

Выше указывалось, что в основу аналитической оценки класса взрывоопасной и пожароопасной зоны и ее размеров положен количественный показатель ΔP, т.е. расчетное избыточное давление взрыва взрывоопасной смеси.

Расчет избыточного давления взрыва ΔP. Порядок расчета заключается в следующем.

Массу вещества m, кг, участвующего в образовании реактивных зон

взрывоопасных концентраций, определяют по формуле

$$m = m^* Z, \qquad (2.1)$$

где m^* - масса вещества, которая может быть аккумулирована в объеме помещения, кг; Z - коэффициент участия горючего во взрыве, который может быть рассчитан на основе характера распределения газов и паров в объеме помещения согласно приложению НПБ 105-95 [5].

Согласно табл. 2 [5], допускается принимать следующие значения Z: 0,5 - для горючих газов и пылей; 0,3 – для ЛВЖ и ГЖ, нагретых до температуры вспышки и выше или ниже температуры вспышки, при наличии возможности образования аэрозоля; 1 – для водорода.

Избыточное давление взрыва ΔP для веществ подгруппы А (индивидуальные горючие вещества, состоящие из атомов углерода С, водорода Н, кислорода О, азота N и галогенов: хлора Cl, брома Br, йода I, фтора F) рассчитывают по формуле

$$\Delta P = (P_{max} - P_0)((m \cdot 100) / (V_{св}\, \rho_{г.п}\, C_{ст}\, K_н)), \qquad (2.2)$$

где P_{max} - максимальное давление взрыва стехиометрической газовоздушной или паровоздушной смеси в замкнутом объеме, кПа. Определяется экспериментально или по справочным данным (например, см. прил. 5[3]), при отсутствии данных допускается принимать P_{max} равным 900 кПа; P_0 - начальное давление, кПа, допускается принимать равным 101 кПа; m - масса горючего газа (ГГ) или паров легковоспламеняющихся (ЛВЖ) и горючих жидкостей (ГЖ), вышедших в результате расчетной аварии в помещение, и определяемая по формулам (2.1), (6) и (11) [5], кг; $V_{св}$ - свободный объем помещения, м^3 , допускается принимать 0,8 $V_{геом}$; $\rho_{г.п}$ - плотность газа или пара при расчетной температуре, кг·м$^{-3}$; $C_{ст}$ - стехиометрическая концентрация ГГ или паров ЛВЖ и ГЖ, % (об); $K_н$ - коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения. Допускается принимать равным 3.

Стехиометрическую концентрацию горючего вещества определяют по формуле

$$C_{ст} = 100 / (1+4{,}84\beta), \qquad (2.3)$$

где β – стехиометрический коэффициент кислорода в реакции горения, определяемый по формуле

$$\beta = n_C + (n_H - n_O) / 4 - n / 2, \qquad (2.4)$$

n_C, n_H, n_O и n - число атомов С, Н, О и галогенов в молекуле горючего.

Плотность пара или газа определяют по формуле

$$\rho_{г.п} = 12{,}15\, M / (t_в + 273), \qquad (2.5)$$

где M - молекулярная масса вещества; $t_в$ - расчетная температура воздуха, °С. В качестве расчетной температуры следует принимать максимально возможную температуру воздуха в данном помещении в соответствующей климатической зоне или максимально возможную температуру воздуха по технологическому регламенту с учетом возможного повышения температуры в аварийной ситуации (при невозможности оценить этот показатель допускается принимать ее равной 61 °С).

Избыточное давление взрыва ΔP для веществ подгруппы В (смеси и индивидуальные вещества, за исключением подгруппы А) рассчитывают по формуле

$$\Delta P = mQ_т P_о / (V_{св}\rho_в C_в(t_в + 273)K_н), \qquad (2.6)$$

где $Q_т$ - теплота сгорания вещества, кДж· кг$^{-1}$ (для некоторых веществ ее значения приведены в прил. 5 [3]); $\rho_в$ - плотность воздуха до взрыва при начальной температуре, кг·м$^{-3}$, определяется по формуле

$$\rho = 352 / (t_в + 273); \qquad (2.7)$$

$C_в$ - теплоемкость воздуха, Дж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$ (допускается принимать равной 1,01· 10^3 кДж· кг$^{-1}$ ·К$^{-1}$.

Расчет размеров взрывоопасной зоны. Как было сказано, размеры (объем) взрывоопасных зон нормативно оцениваются в зависимости от величины ΔP, т.е. если $\Delta P > 5$ кПа, то взрывоопасная зона занимает весь объем помещения, а если $\Delta P \le 5$ кПа, то ее размеры (в виде цилиндра) следует рассчитывать, используя литературу (см. гл. 3, п. 3.2 [3] или [6]).

Примеры расчетов величины ΔP для различных случаев технологических процессов с применением ГГ, ЛВЖ и горючих пылей и выводы о классах взрывоопасных зон и их размеров приводятся в гл.3, п. 3.3 работы [3].

При проведении пожарно-технической экспертизы необходимо правильно решить вопрос о том, к зоне какого класса относится проектируемое помещение или наружная установка. Для этого процесс анализа параметров помещения или открытого объекта можно представить в виде алгоритма. Общая схема алгоритма приведена на рис. 2.1.

2.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ВЗРЫВООПАСНЫХ СМЕСЕЙ ПО ГРУППАМ И КАТЕГОРИЯМ

До введения стандартов на взрывозащищенное оборудование оно разрабатывалось и маркировалось по ПИВРЭ [7]. Кроме того, в эксплуатации находится электрооборудование, разработанное и маркированное по ПИВЭ [8].

При решении задач пожарно-технической экспертизы электротехнической части проектов или при противопожарном обследовании электроустановок объектов приходится пользоваться ПУЭ [1].

Терминология и маркировка взрывозащищенного электрооборудования здесь приведены согласно стандартам на взрывозащищенное электрооборудование (см. также прил. 4). Следовательно, чтобы сделать выводы о соответствии взрывозащищенного электрооборудования требованиям ПУЭ, но изготовленного и маркированного по ПИВРЭ и ПИВЭ, необходимо знать перевод этой маркировки в маркировку по ПУЭ. Поэтому здесь и далее наряду с терминологией и маркировкой взрывозащищенного электрооборудования по стандартам или ПУЭ приводится маркировка по ПИВРЭ и ПИВЭ.

В настоящее время в различных отраслях промышленности количество взрывоопасных веществ (горючих газов, паров и пыли) стало резко возрастать. Разрабатывать и изготавливать взрывозащищенное электрооборудование применительно к каждому из таких веществ невозможно, а с другой стороны, экономически нецелесообразно использовать во всех случаях дорогостоящее взрывозащищенное электрооборудование, рассчитанное на применение в наиболее тяжелых условиях. Все это обусловило необходимость группировки взрывоопасных смесей по классам. Объединение газо- и паровоздушных смесей в классы с общими взрывоопасными свойствами позволяет выделить представительную смесь, характерную для данного класса смесей. Испытанное на этой смеси взрывозащищенное электрооборудование считалось бы безопасным и пригодным для использования в среде с любой смесью, относящейся к данному классу. Это дает возможность максимально унифицировать конструкцию взрывозащищенного электрооборудования, сделать общими принципы его маркировки.

Все взрывоопасные смеси газов и паров с воздухом принято разделять на *группы* и *категории*.

В основу классификации по группам положена температура самовоспламенения смеси. Чем ниже эта температура, тем вероятнее воспламенение смеси при всех прочих равных условиях по сравнению со смесью, у которой температура самовоспламенения выше. Так, сероуглерод воспламеняется при температуре 100 °С, а метиловый спирт - при 427 °С. Следовательно,

сероуглерод более опасен и в его среде допустимая температура оболочки взрывозащищенного электрооборудования должна быть ниже, чем в среде метилового спирта, если нагретую поверхность оболочки рассматривать как возможный источник зажигания.

В зависимости от температуры самовоспламенения по ПИВЭ было установлено четыре группы взрывоопасных смесей: А, Б, Г, Д; по ПИВРЭ - пять групп: Т1, Т2, Т3, Т4, Т5; по ПУЭ или ГОСТ 12.1.011 - 78 [9] - шесть групп: Т1, Т2, Т3, Т4,Т5,Т6 (см. также соответствующий ГОСТ в прил. 4).

Температуру самовоспламенения взрывоопасной смеси определяют на специальной установке (ГОСТ 12.1.011-78), а ее группу - по табл. 2.4.

Таблица 2.4

Группа взрывоопасной смеси	Температура самовоспламенения, °С	Группа взрывоопасной смеси	Температура самовоспламенения, °С	Группа взрывоопасной смеси	Температура самовоспламенения, °С
по ПИВЭ [8]		по ПИВРЭ [7]		по ПУЭ или ГОСТ 12.1.011-78 [9]	
А	Свыше 450	Т1	Свыше 450	Т1	Свыше 450
Б	« 300 до 450	Т2	« 300 до 450	Т2	« 300 до 450
Г	« 175 до 300	Т3	« 200 до 300	Т3	« 200 до 300
Д	« 120 до 175	Т4	« 135 до 200	Т4	« 135 до 200
		Т5	« 100 до 135	Т5	« 100 до 135
				Т6	« 85 до 100

Взрывоопасные смеси принято разделять на категории в зависимости от величины для данного вещества так называемого безопасного экспериментального зазора (БЭМЗ) между плоскими фланцами у стандартной оболочки (рис. 2.2). Ранее, по правилам [7 и 8] взрывоопасные смеси таких веществ разделялись на категории, исходя из величины критического зазора. Понятие критического зазора связано с одним из основных видов взрывозащиты электрооборудования - взрывонепроницаемой оболочкой.

Достаточно длинные l и узкие δ зазоры в местах соединения различных частей этих оболочек исключают наружное воспламенение, например, в камере *4*. За критический зазор принимали такой, при котором число передач из стандартной оболочки *2* объемом 2,5 л во взрывную камеру *4* составляет 50 % общего количества поджиганий смеси в оболочке. Чем меньше значение критического зазора имеет вещество, тем большими взрывопроникающими свойствами оно обладает, т.е. является по этому свойству более опасным.

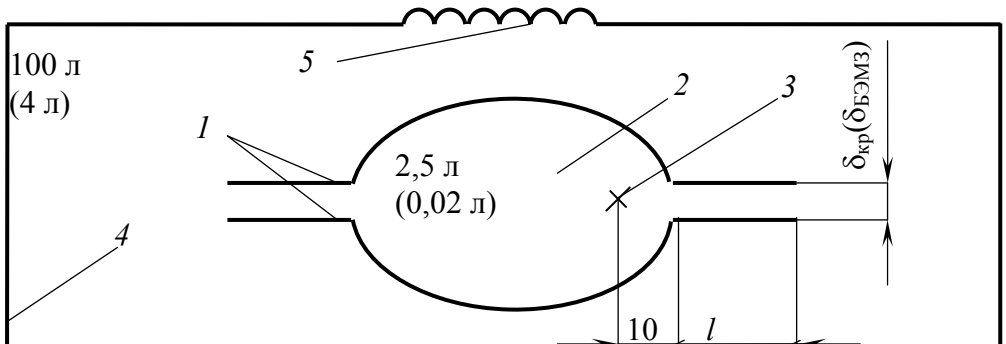


Рис. 2.2. Схема установки для определения категорий взрывоопасных смесей:
1 – плоские фланцы с регулируемым зазором; *2* – оболочка (реакционный сосуд); *3* – источник зажигания (искра магнето); *4* – цилиндрическая камера; *5* – взрывной клапан

В связи с возросшими требованиями к точности проведения эксперимента, необходимостью сокращения времени на определение категории вещества по ГОСТ 12.1.011-78 [9] осуществлен переход на другой классификационный параметр – безопасный экспериментальный максимальный зазор, при котором не наблюдается передача взрыва из стандартной оболочки наружу. Установка (см. рис. 2.2) для определения БЭМЗ взрывоопасной газо- и паровоздушной смеси состоит из сферической оболочки *2* объемом 0,02 л с фланцами длиной 25 мм. Ширина зазора (щели) между фланцами полусфер регулируется с помощью микрометрического винта. Для зажигания смеси внутри оболочки установлены два электрода с искровым промежутком (3±0,5) мм так, что между ними проскакивает искра от высоковольтного индуктора. Сферическая оболочка помещена во взрывную камеру *4* объемом 4 л. Посредством системы кранов камера и оболочка могут быть соединены с вакуум-насосом, вакуумметром и атмосферой.

Для определения БЭМЗ камеру *4* с оболочкой *2* наполняют взрывоопасной смесью. Смесь приготавливается либо в отдельном газгольдере, откуда она поступает в камеру и оболочку, либо создается в них непосредственно по парциальному давлению (для газов) или же впрыскиванием рассчитанного и отмеренного количества вещества (для жидкостей). После перемешивания смесь поджигают искрой в оболочке. Если взрыв из оболочки не передается, смесь в камере воспламеняют с помощью контрольного зажигания. По наиболее взрывоопасной (стехиометрической) концентрации определяют то наибольшее значение зазора (БЭМЗ), при котором отсутствует передача взрыва из оболочки в камеру.

В табл. 2.5 приведены условные обозначения категорий взрывоопасных смесей согласно ПИВЭ, ПИВРЭ, ПУЭ и ГОСТ 12.1.011-78 [9] и соответствующие этим категориям величины $\delta_{кр}$ и $\delta_{БЭМЗ}$.

Приведенные в табл. 2.5 величины зазоров служат только для установления категории взрывоопасной смеси и не являются основанием для контроля зазоров взрывонепроницаемого электрооборудования в условиях эксплуатации.

Таблица 2.5

Категория взрывоопасной смеси	Критический зазор $\delta_{кр}$, мм	Категория взрывоопасной смеси	$\delta_{БЭМЗ\ max}$, мм
по ПИВЭ и ПИВРЭ		по ПУЭ или ГОСТ 12.1.011-78 [9]	
1	Свыше 1,0	I[1]	Свыше 1,0
2	« 0,65 до 1,0	IIA	« 0,9 до 1,0
3	« 0,35 до 0,65	IIB	« 0,5 до 0,9
4	Менее 0,35	IIC	До 0,5

[1] Категорией I обозначен рудничный газ.

Контроль параметров взрывозащиты взрывонепроницаемого электрооборудования производится по чертежам средств взрывозащиты, имеющимся в эксплуатационных документах на конкретное взрывозащищенное электрооборудование. При их отсутствии следует руководствоваться гл. 3.4 «Электроустановки во взрывоопасных зонах» ПЭЭП [10].

Распределение взрывоопасных смесей по группам и категориям приводится в табл. 2.6 [1].

Категории и группы взрывоопасных смесей газов и паров с воздухом, не включенных в табл. 2.6, определяются испытательными организациями в соответствии с их перечнем по ГОСТ 12.2.021-76 [11].

В технологических процессах производств обращается обычно несколько горючих веществ, взрывоопасные смеси которых могут отличаться по категории и группе. В таких случаях категория и группа устанавливаются по наиболее опасной смеси. Категории и группы взрывоопасных смесей указываются обычно в пояснительной записке к проекту и на планах расположения силового и осветительного электрооборудования. Знать категорию и группу взрывоопасной смеси нужно для проверки соответствия запроектированного электрооборудования тем нормам, которые необходимо соблюсти, чтобы предотвратить пожар или взрыв от электрооборудования на данном производстве.

В табл. 2.7 и 2.8 приводятся сопоставления обозначений категорий и групп взрывоопасных смесей по ПИВРЭ и ПИВЭ с обозначениями по ПУЭ и ГОСТ 12.1.011-78. Такое сопоставление необходимо при пожарно-технической экспертизе, когда в проектных материалах (или на действующем объекте в условиях эксплуатации) взрывозащищенное электрооборудование имеет знаки взрывозащиты по ПИВРЭ или ПИВЭ.

Таблица 2.6

Категория смеси	Группа смеси	Вещества, образующие с воздухом взрывоопасную смесь
I	Т1	Метан (рудничный)*
IIA	Т1	Аммиак, аллил хлоридный, ацетон, ацетонитрил, бензол, бензотрифторид, винил хлористый, винилиден хлористый, 1,2 – дихлорпропан, дихлорэтан, диэтиламин, дизопропиловый эфир, доменный газ, изобутилен, изобутан, изопропилбензол, кислота уксусная, ксилол, метан (промышленный)**, метилацетат, α-метилстирол, метил хлористый, метилизоцинат, метилхлорформиат метилциклопропилкетон, метилэтилкетон, окись углерода, пропан, пиридин, растворители Р-4, Р-5 и РС-1, разбавитель РЭ-1, сольвент нефтяной, стирол, спирт диацетоновый, толуол, трифторхлорпропан, трифторпропен, трифторэтан, трифторхлорэтилен, триэтиламин, хлорбензол, циклопентадиен, этан, этил хлористый
IIA	Т2	Алкилбензол, амилацетат, ангидрид уксусный, ацетилацетон, ацетил хлористый, ацетопропилхлорид, бензин Б95/130, бутан, бутилацетат, бутилпропионат, винилацетат, винилиден фтористый, диатол, диизопропиламин, диметиламин, диметилформамид, изопентан, изопрен, изопропиламин, изооктан, кислота пропионовая, метиламин, метилизобутил кетон, метилметакрилат, метилмеркаптан, метилтрихлорсилан, 2-метилтиофен, метилфуран, моноизобутиламин, метилхлорметилдихлорсилан, окись мезитила, пентадиен-1,3, пропиламин, пропилен. Растворители: № 646, 647, 648, 649, БЭФ и АЭ. Разбавители: РДВ, РКБ-1, РКБ-2. Спирты: бутиловый нормальный, бутиловый третичный, изоамиловый, изобутиловый, изопропиловый, метиловый, этиловый. Трифторпропилметилдихлорсилан, трифторэтилен, изобутил хлористый, этиламин, этилацетат, этилбутират, этилендиамин, этиленхлоргидрин, этилизобутират, этилбензол, циклогексанол, циклогексанон
IIA	Т3	Бензины: А-66, А-72, А-76, «галоша», Б-70, экстракционный по ТУ 38.101.303-72, экстракционный по МРТУ 12Н-20-63. Бутилметакрилат, гексан, гептан, динзобутиламин, дипропил- амин, альдегид изовалериановый, изооктилен, камфен, керосин, морфолин, нефть, эфир петролейный, полиэфир ТГМ-3, пентан, растворитель № 651, скипидар, спирт амиловый, триметиламин, топливо Т-1 и ТС-1, уайт-спирит, циклогексан, циклогексиламин, этилдихлортиофосфат, этилмеркаптан

Окончание табл. 2.6

Категория смеси	Группа смеси	Вещества, образующие с воздухом взрывоопасную смесь
IIA	Т4	Ацетальдегид, альдегид изомасляный, альдегид масляный,

		альдегид пропионовый, декан, тетраметилдиаминометан, 1,1,3 - триэтоксибутан
IIA	T5	———
IIA	T6	———
IIB	T1	Коксовый газ, синильная кислота
IIB	T2	Дивинил, 4,4-диметилдиоксан, диметилдихлорсилан, диоксан, диэтилдихлорсилан, камфорное масло, кислота акриловая, метилакрилат, метилвинилдихлорсилан, нитрил акриловой кислоты, нитроциклогексан, окись пропилена, окись 2-метилбутена-2, окись этилена, растворители АМР-3 и АКР, триметилхлорсилан, формальдегид, фуран, фурфурол, этилхлоргидрин, этилтрихлорсилан, этилен
IIB	T3	———
IIB	T4	Акролеин, винилтрихлорсилан, сероводород, тетрагидрофуран, тетраэтоксисилан, триэтоксисилан, топливо дизельное, формальгликоль, этилдихлорсилан, этилцеллозольв, дибутиловый эфир, диэтиловый эфир, диэтиловый эфир этиленгликоля
IIB	T5	———
IIB	T6	———
IIC	T1	Водород, водяной газ, светильный газ, смесь (водород 75% + азот 25 %)
IIC	T2	Ацетилен
IIC	T3	Метилдихлорсилан, трихлорсилан
IIC	T4	———
IIC	T5	Сероуглерод
IIC	T6	———

* Под рудничным метаном следует понимать рудничный газ, в котором кроме метана содержание газообразных углеводородов – гомологов метана $C_2 – C_5$ – не более 0,1 объемной доли, а водорода в пробах газов из шпуров сразу после бурения – не более 0,002 объемной доли от общего объема горючих газов.

** В промышленном метане содержание водорода может составлять до 0,15 объемной доли.

Таблица 2.7

Обозначение групп взрывоопасных смесей	
ПИВРЭ и ПИВЭ	ПУЭ и ГОСТ 12.1.011-78
1	IIA
2	IIA
3	IIA, IIB
4	IIA, IIB, IIC

Таблица 2.8

Обозначение групп взрывоопасных смесей		
ПИВРЭ	ПИВЭ	ПУЭ и ГОСТ 12.1.011-78
T1	А	T1
T2	Б	T1, T2

Т3	-	Т1-Т3
Т4	Г	Т1-Т4
Т5	Д	Т1-Т5
–	–	Т1-Т6

Следует отметить, что взрывозащищенное электрооборудование, выполненное по ПИВРЭ и ПИВЭ для 2-й категории, допускается применять там, где имеются взрывоопасные смеси категории IIB, за исключением взрывоопасных смесей с воздухом коксового газа (IIBT1), окиси пропилена (IIBT2), формальдегида (IIBT2), этилтрихлорсилана (IIBT2), этилена (IIBT2), винилтрихлорсилана (IIBT3) и этилдихлорсилана (IIBT3).

Электрооборудование, изготовленное по ПИВЭ и имеющее в маркировке по взрывозащите обозначение А (группа), является также взрывозащищенным и для взрывоопасных смесей группы Т2, температура самовоспламенения которых выше 360 °С.

Электрооборудование, имеющее в маркировке по взрывозащите обозначение Б (группа), является взрывозащищенным и для взрывоопасных смесей группы Т3, температура самовоспламенения которых выше 240 °С.

Классификация и распределение взрывоопасных смесей по категориям и группам имеется и в ряде зарубежных стран и международных организаций [13]. Для оценки возможности применения зарубежного взрывозащищенного электрооборудования в среде той или иной категории в большинстве случаев достаточно сопоставить зарубежные классификации взрывоопасных смесей по категориям с действующей классификацией по ПУЭ [1] или по ГОСТ 12.1.011-78 [9].

В табл. 2.9 сопоставлены категории взрывоопасных смесей согласно действующим стандартам.

Классификация взрывоопасных смесей в зарубежных странах по группам производится также по температуре самовоспламенения. В табл. 2.10 сопоставлены группы взрывоопасных смесей согласно действующим стандартам.

В ряде случаев данных, представленных в табл. 2.9 и 2.10, может быть недостаточно для сопоставления категорий и групп взрывоопасных смесей и решения вопросов применения зарубежного взрывозащищенного электрооборудования в конкретных взрывоопасных смесях. В этих случаях необходимо знать распределение конкретных взрывоопасных смесей по категориям и группам в соответствии с национальными стандартами [13] и сравнить это распределение с табл. 7.3.3 [1] или прил. 3[9].

Таблица 2.9

Россия (ПУЭ, ГОСТ12.1.11-78) Англия (BS 4683-1971) Франция (NF C 23-514, 1977) CENELEC (EN 50014, 1977) ФРГ (VDE 0170/0171, Teil/12.70) Бельгия (NBN 286, 1965) Италия (Norme 31-1/x-1969) МЭК (Pudlication 79-1, 1971)	Югославия (TEHNICKI PROPISI 1968)	Венгрия (MSZ4814/1-72) CPP (STAS 6877-68)		Япония (JIS C0903, 1972)		Швеция (SEN-210800 1969)	США (NES-500-1975) Канада (C222 630-1970)	Чехия (CSN 341480, 1969)
II A	II A	I		1		1	D	P
		II						
II B	II B	III		2		2	C	S
II C	II C	IV/a	IV/x	3 a	3 n	3	B	H
		IV/в		3 в				
	II D	IV/c		3 c			A	

Примечание. В ряде стран, например в США, Канаде, по терминологии вместо категории взрывоопасной смеси принята группа, в Японии – класс взрыва и т.д. Категории взрывоопасной смеси с индексами IID, IV/c, IIC, 3c и A соответствуют критическому зазору взрывоопасной смеси ацетилена, а с индексами IV/x и 3n – всех веществ категорий.

Таблица 2.10

Температура самовоспламенения, °С	Россия (ПУЭ, ГОСТ 12.1.011-78) Югославия (TEHNICKI PROPISI 1968) Англия (Ex-Memo 1; 1972) Германия (VDE 0170/0171, Teil/12.70) Италия (Norme 31-1/x-1989) Франция (NF C 23-514, 1977) CENELEC (EN 50014, 1977) МЭК (Publication 79-1, 1971)	Чехия (CSN 341480, 1969)	Венгрия (MSZ4814/1-72) Япония (JIS C0903, 1972) Бельгия (NBN 717/1976 – для защиты видов «е»)	Швеция (SEN-210800 1969)	Бельгия (NBN 286, 1965 – для взрывозащиты «взрывонепроницаемая оболочка»)
Свыше 450	T1	A	G1	T1	N
« 300	T2	B	G2	T2	O
« 200	T3	C	G3	T3	P
« 175	T4	D	G4	T4	
« 135					Q
« 120	T5	E	G5	T5	
« 100					–
« 85	T6	F	–	-	–

Примечание. Классификация взрывоопасных смесей по группам действующими стандартами NES (США) и C 22.2. No 30–1970 (Канада) не предусмотрена.

2.3. ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Классификация взрывозащищенного электрооборудования

Электрооборудование, выполненное без учета специфических требо-

ваний, характерных для определенной отрасли производства, является электрооборудованием общего назначения. Применение его во взрывоопасных зонах, как правило, недопустимо, так как электрооборудование может искрить или нагреваться до опасных температур и явиться причиной пожара или взрыва. Поэтому во взрывоопасных зонах (за небольшим исключением) следует применять специальное взрывозащищенное электрооборудование.

Взрывозащищенное электрооборудование - электрооборудование, в котором предусмотрены конструктивные меры по устранению (или затруднению) возможности воспламенения окружающей взрывоопасной среды. Согласно ГОСТ 12.2.020[14] и ГОСТ Р 51330.0-99 (см. прил. 4), взрывозащищенное электрооборудование подразделяется по уровням и видам взрывозащиты, группам и температурным классам.

Уровень взрывозащиты электрооборудования – это степень его взрывозащиты (надежности) при установленных нормативными документами условиях.

Существует три уровня взрывозащиты электрооборудования: повышенной надежности против взрыва, взрывобезопасное, особовзрывоопасное.

1. Уровень «электрооборудование повышенной надежности против взрыва» – взрывозащита электрооборудования обеспечивается только в признанном нормальном режиме работы. Признанный нормальный режим работы приведен в стандартах на виды взрывозащиты электрооборудования.

2. Уровень «взрывобезопасное электрооборудование» – взрывозащита электрооборудования обеспечивается как при нормальном режиме работы, так и при признанных вероятных повреждениях, определяемых условиями эксплуатации, кроме повреждений средств взрывозащиты. Признанные вероятные повреждения электрооборудования приведены в стандартах на виды взрывозащиты электрооборудования.

3. Уровень «особовзрывобезопасное электрооборудование» - дополнительные средства взрывозащиты, предусмотренные стандартами на виды взрывозащиты. Знаки обозначения уровней взрывозащиты приводятся в табл. 2.11.

Если в состав взрывозащищенного электрооборудования входят элементы с различными уровнями взрывозащиты, общий уровень взрывозащиты устанавливается по элементу, имеющему наиболее низкий уровень.

Таблица 2.11

Наименование уровней взрывозащиты электрооборудования	Знаки уровня взрывозащиты по	
	ГОСТ 12.2.020 –76 ГОСТ Р 51330.0-99, ПУЭ	ПИВРЭ
Электрооборудование повышенной надежности	2	Н

против взрыва Взрывобезопасное электрооборудование Особовзрывобезопасное электрооборудование	 1 0 (цифра)	 В О (буква)

Вид взрывозащиты электрооборудования – совокупность средств его взрывозащиты, установленная нормативными документами. Под средством взрывозащиты электрооборудования понимается конструктивное (или схемное) решение для обеспечения его взрывозащиты.

Виды взрывозащиты, обеспечивающие различные ее уровни, отличаются средствами и мерами обеспечения взрывобезопасности. Установлено девять видов взрывозащиты (табл. 2.12).

Таблица 2.12

Наименование видов взрывозащиты электрооборудования	Знаки вида взрывозащиты по	
	ГОСТ 12.2.020 – 76 ГОСТ Р 51330.0-99, ПУЭ	ПИВРЭ, ПИВЭ
Взрывонепроницаемая оболочка	*d*	В
Защита вида «е» (повышенной надежности против взрыва)	*e*	Н
Искробезопасная электрическая цепь	*i*	И
Масляное заполнение оболочки	*o*	М
Заполнение или продувка оболочки под избыточным давлением	*p*	П
Кварцевое заполнение оболочки	*q*	К
Специальный вид взрывозащиты	*s*	С
Герметизация компаундом	*m*	-
Защита вида «*n*»	*n*	-

Взрывозащищенное электрооборудование в зависимости от области применения подразделяется на две группы:

группа I – рудничное взрывозащищенное электрооборудование, предназначенное для применения в подземных выработках шахт и в их наземных строениях, рудников, опасных по газу или горючей пыли;

группа II – взрывозащищенное электрооборудование (кроме рудничного взрывозащищенного) для внутренней и наружной установки, предназначенное для потенциально взрывоопасных сред. Электрооборудование группы II, имеющее виды взрывозащиты «взрывонепроницаемая оболочка» и (или) «искробезопасная электрическая цепь», подразделяется на три подгруппы, соответствующие категориям взрывоопасных смесей, - IIA, IIB и IIC (см. табл. 2.7).

Для электрооборудования группы II (в зависимости от значения максимальной температуры поверхности) устанавливаются температурные классы, обозначаемые так же, как и группы взрывоопасных смесей (табл. 2.13).

Таблица 2.13

Температурный класс	Максимальная температура поверхности взрывозащищенного электрооборудования, °С	Группы взрывоопасной смеси, для которой электрооборудование является взрывозащищенным
Т1	450	Т1
Т2	300	Т1, Т2
Т3	200	Т1…Т3
Т4	135	Т1…Т4
Т5	100	Т1…Т5
Т6	85	Т1…Т6

Максимальная температура поверхности электрооборудования – наибольшая температура, возникающая в процессе эксплуатации при наиболее неблагоприятных условиях (но в пределах регламентированных отклонений) на любой части или поверхности электрооборудования, которая может привести к воспламенению окружающей взрывоопасной газовой среды (см. табл. 2.13).

Электрооборудование должно выбираться таким образом, чтобы максимальная температура его поверхности не превышала температуры самовоспламенения любого газа или пара, которые могут присутствовать в атмосфере взрывоопасной зоны.

Рассмотренная классификация взрывозащищенного электрооборудования и знаки обозначения его уровней, видов, групп и подгрупп, а также температурных классов позволяют выполнять и правильно понимать маркировку взрывозащиты.

Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «взрывонепроницаемая оболочка»

Сущность взрывонепроницаемости электрооборудования состоит в том, что все электрические части машин или аппаратов заключаются во взрывонепроницаемую оболочку. Она представляет собой прочную закрытую конструкцию, состоящую из одной или нескольких полостей и имеющую в местах сочленения элементов фланцы и зазоры. Иногда взрывонепроницаемая оболочка органически входит в конструкцию электрооборудования, например, в электродвигателях. В большинстве же случаев она представляет собой отдельный элемент электрооборудования, применяемый только для обеспечения взрывонепроницаемости (например, у магнитных пускателей, кнопок управления и т.п.). Назначение оболочки – исключить возможность воспламенения окружающей взрывоопасной среды от электрооборудования при любых режимах его работы: в пределах но-

минальной нагрузки, перегрузки, пробоя изоляции, КЗ. Это достигается благодаря сочетанию трех факторов: взрывонепроникновения, взрывоустойчивости и температурного режима оболочки.

Взрывонепроникновение. Если образуемые фланцами зазоры (см. рис.2.2), через которые внутренняя полость оболочки сообщается с внешней средой, имеют достаточно малую высоту $\delta_{кр}$ ($\delta_{БЭМЗ}$) при сравнительно большой ширине l, через них взрыв не будет передаваться наружу. Гашение пламени в узких зазорах фланцев в основном достигается значительной теплоотдачей стенками фланцев и отводом тепла из зоны реакции продуктами горения. Продукты сгорания, образующиеся во время взрыва внутри оболочки, при прохождении через зазор охлаждаются фланцами. Еще большее охлаждение они получают при расширении на выходе. Пламенного горения в узком зазоре малого объема, но большой площади охлаждения, не происходит, однако продукты взрыва, выходящие через зазор, охлаждаются до температуры ниже температуры самовоспламенения окружающей взрывоопасной среды.

Взрывоопасная среда, в которой находится взрывонепроницаемое электрооборудование, может проникнуть в оболочку при ее вскрытии или через места соединения (особенно когда происходит периодическое нагревание и охлаждение электрооборудования). Время проникновения взрывоопасной среды внутрь оболочки различно и зависит от физических свойств среды – плотности и диффузной способности. Например, для водородовоздушных и ацетиленовоздушных смесей оно составляет несколько минут, для пропановоздушной смеси – около часа.

Сопряжения между отдельными частями взрывонепроницаемой оболочки могут быть плоские, лабиринтные, барьерные, резьбовые, цилиндрические, конические или комбинированные (рис. 2.3).

Взрывонепроницаемое электрооборудование конструируется со щелевой защитой, имеющей допустимые (конструктивные) зазоры. Ширина щели должна быть не более указанной в инструкциях заводов-изготовителей, а при отсутствии инструкций должна соответствовать данным, приведенным в табл. 3.1 – 3.3 [10].

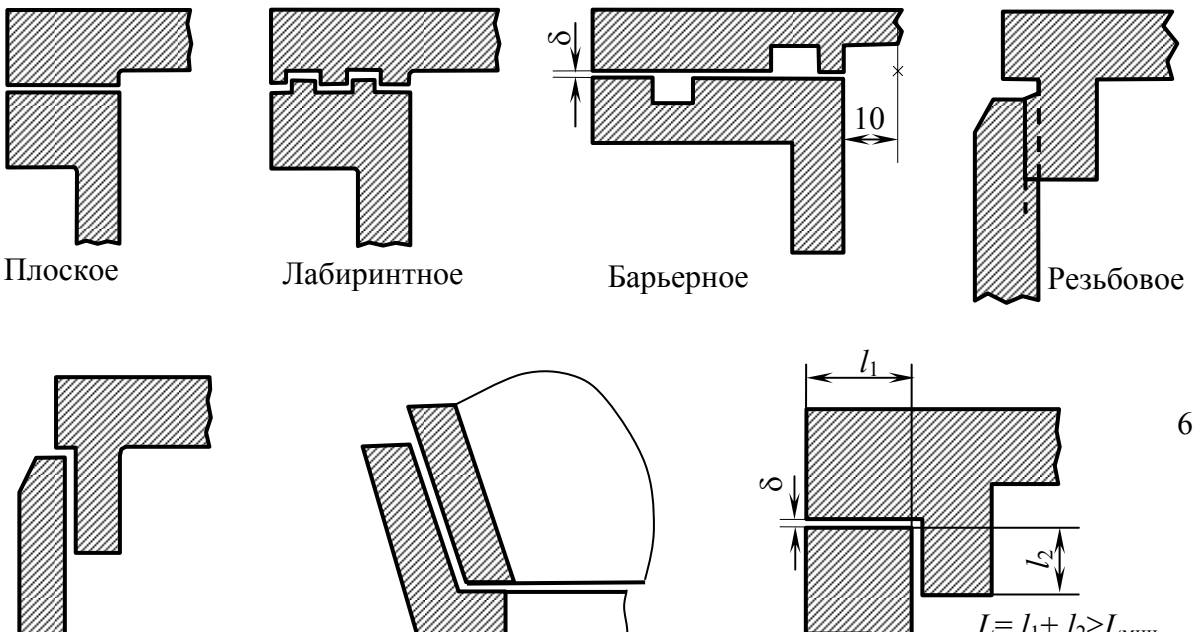


Рис. 2.3. Виды сопряжений отдельных частей взрывонепроницаемого электрооборудования

На высоту зазоров щелевой защиты влияют ширина фланцев, физико-химические свойства взрывоопасной смеси (скорость реакции горения, температура самовоспламенения, время запаздывания взрыва), расположение и мощность источника воспламенения взрывоопасной смеси и др. Раскаленные дугой при КЗ газы и металлические частицы (при выбросе из оболочки через фланцевые зазоры) представляют значительно большую опасность для передачи взрыва наружу, чем продукты взрыва газо- или паровоздушных смесей, воспламеняемых искрой от магнето. Опыты с метановоздушной смесью показали, что для обеспечения одинаковой вероятности передачи взрыва через фланцевые зазоры при воспламенении смеси электрической дугой и электрической искрой от магнето высота зазора в первом случае должна быть в два раза меньше, чем во втором. Вероятность передачи взрыва при одной и той же величине зазора зависит также от материала проводников (электродов), между которыми может возникнуть дуга КЗ внутри оболочки. Так, при дуге между медными проводниками вероятность передачи взрыва, равная 0,5, возникает при высоте зазора 0,35 мм, при дуге между алюминиевыми проводниками – при высоте зазора 0,05 мм. Столь высокая воспламеняющая способность алюминиевых частиц, выбрасываемых через зазоры, объясняется их более высокой температурой горения в окружающей среде.

Большая потребность промышленности во взрывонепроницаемом электрооборудовании, пригодном для наиболее взрывоопасных смесей категории IIC (4) (водород, сероуглерод и др.), влияние на высоту зазора КЗ, особенно между алюминиевыми проводниками, привели к необходимости применения лабиринтного и барьерного сопряжений взрывонепроницаемой оболочки (см. рис. 2.3). Исследования показали, что лабиринтные сопряжения взрывонепроницаемой оболочки позволяют увеличить высоту допустимых зазоров и особенно целесообразны для неподвижных взрывозащитных соединений в средах водорода и сероуглерода. Положительные

свойства барьерного сопряжения, состоящего из узких щелей, между которыми находятся один, два или три расширителя, заключаются в том, что при движении из оболочки продукты взрыва отдают больше тепла, чем в обычных фланцевых зазорах. Наиболее заметно влияет на теплопередачу расширитель, в котором происходит расширение продуктов взрыва и значительное их турбулентное движение. Это приводит к потере тепла за счет адиабатного расширения и отдаче тепла стенкам расширителя.

При испытаниях барьерного, лабиринтного и резьбового сопряжений было установлено, что наиболее опасно расположение источника воспламенения в центре объема оболочки. Особенно это заметно при испытаниях оболочек с быстросгорающими смесями (водородом, сероуглеродом и др.). Так, при объеме оболочки, заполненной 1,2 л водородовоздушной взрывоопасной смеси, и барьерном сопряжении фланцев вероятность передачи взрыва равна 0,43 при $\delta_{кр}$ = 0,3 мм, если источник воспламенения располагается на расстоянии 10 мм от щели. При тех же условиях, но если $\delta_{кр}$ = 0,15 мм и источник воспламенения расположен в центре оболочки, вероятность передачи взрыва равна уже 1,0.

Взрывоустойчивость. Чтобы исключить передачу взрыва из оболочки взрывонепроницаемого электрооборудования в окружающую среду, оболочка должна не только иметь соответствующие взрывозащитные сопряжения частей, но и быть механически прочной. Прочность оболочки в эксплуатации при любых режимах работы электрооборудования определяется расчетом и должна соответствовать максимальному давлению взрыва смеси при воспламенении не только от маломощного источника воспламенения (искра магнето), но и от мощного (дуговое КЗ).

На величину давления при взрыве внутри оболочки влияют ее объем и форма, месторасположение и мощность источника воспламенения, состав и концентрация горючей взрывоопасной смеси, а также размер удельного сечения отверстий в оболочке. Так, в герметичной оболочке давление при взрыве мало зависит от ее объема. В негерметичной оболочке, имеющей отверстия (например, зазоры во фланцевых соединениях), давление при взрыве уже заметно зависит от суммарной площади сечения сквозных отверстий и объема оболочки. Например, при взрыве метановоздушной смеси в оболочке с высотой зазора δ = 0,8 мм давление достигает 100 кПа, при δ = 0,2 мм давление превышает 400 кПа. Максимальное давление при взрыве возникает, когда источник воспламенения помещается в центре сферической оболочки. Это объясняется тем, что фронт пламени имеет сферическую форму и достигает стенки оболочки в кратчайшее время, практически одновременно с окончанием процесса горения.

Взрывоустойчивость оболочек взрывонепроницаемого электрооборудования определяется контрольными гидравлическими испытаниями

на заводах-изготовителях. Величина избыточного давления зависит и от категории взрывоопасной смеси, для которой оболочка предназначается. Согласно ПИВРЭ, при объеме оболочки свыше 2 л величина избыточного давления при гидравлическом испытании принимается равной 800 кПа для взрывоопасных смесей категории IIA, 1000 кПа – для смесей категории IIB и IIC.

Температурный режим оболочки. Все наружные части взрывонепроницаемого электрооборудования, соприкасающиеся со взрывоопасной средой, не должны нагреваться выше максимальной температуры как при нормальном режиме, так и при возможных перегрузках или каких-либо повреждениях. Поэтому параметры некоторых режимов, например мощность и продолжительность КЗ, которые учитываются при конструировании и испытании взрывонепроницаемого электрооборудования, заранее обусловливаются.

По ГОСТ 12.2.020-76 [14] и ГОСТ Р 51330.13-99 (прил. 4) температура наружных частей оболочки взрывонепроницаемого (и других видов взрывозащиты) электрооборудования при длительном и кратковременном перегреве не должна превышать максимальной величины, указанной в табл. 2.13.

Если электрооборудование предназначено для определенной взрывоопасной смеси, максимальная температура его поверхности не должна превышать температуры самовоспламенения этой смеси.

Для взрывонепроницаемого электрооборудования и всех других видов взрывозащиты [18] объектов с выделением взрывоопасных пылей (зона класса B-II (21)) температура оболочки должна быть не менее чем на 50 °С ниже температуры тления для тлеющих пылей и составлять не более $^{2}/_{3}$ температуры самовоспламенения (для нетлеющих пылей). Этот вид взрывозащиты может обеспечить уровни взрывозащиты электрооборудования 2(H) и 1(B) (см. табл. 2.11).

Электрооборудование взрывозащищенное с защитой вида «е» (повышенной надежности против взрыва)

Взрывозащищенное электрооборудование с защитой вида «е» от аналогичного электрооборудования общего (невзрывозащищенного) назначения отличается лишь некоторыми дополнительными защитными средствами и мерами. Конструкция такого оборудования препятствует возникновению искр, электрической дуги и опасных температур в тех местах, где их не должно быть при нормальной работе и пусковом режиме. Нормально искрящиеся части должны быть заключены в оболочки любого другого вида: взрывонепроницаемые, продуваемые под избыточным давлением, с масляным заполнением и др.

К средствам и мерам, обеспечивающим защиту вида «е», относятся:

применение электроизоляционных материалов высокого качества, т.е. стойких к влаге, воздействию химически активных веществ, а также к скользящим разрядам (твердые диэлектрики), исключающих образование дуги и последующие КЗ;

снижение температур нагрева изоляционных обмоток (по сравнению с допустимыми по ГОСТу для данного класса изоляции) не менее чем на 10 °С;

установление максимальных температур нагрева поверхности любых частей электрооборудования, более низких, чем температура самовоспламенения смеси горючих газов, паров или пыли с воздухом или чем температура тления пыли, оседающей на деталях электрооборудования (эти температуры не должны превышать значений, приведенных в табл. 2.13);

обеспечение размеров, расстояния и электрических зазоров между металлическими частями разного потенциала, при которых исключается возможность поверхностного пробоя изоляции и возникновения искрения или электрической дуги;

выполнение стабильных соединений токоведущих частей, способных длительное время сохранять надежность контакта без искрения и нагрева выше допустимых норм;

использование защитных устройств, предотвращающих прикосновение к токоведущим частям и соприкасание с ними, а также соприкосновение с электрической изоляцией воды и пыли;

применение для оболочек конструкционных материалов повышенной механической прочности, противостоящих вибрации и ударам, возникающим при транспортировке, монтаже или работе.

Оболочка электрооборудования повышенной надежности против взрыва, содержащая изолированные токоведущие части, должна иметь степень защиты от наружных воздействий (см. далее табл. 2.18) не ниже *IP*54.

Повышенную надежность против взрыва электрооборудования обусловливают также предельная температура и время $\tau_{E,}$ в течение которого электрооборудование (например, асинхронные двигатели, электромагниты постоянного тока) нагревается пусковым током от температуры, достигнутой при длительной работе в номинальном режиме, до максимальной температуры.

Предельная температура обмоток взрывозащищенного электрооборудования вида «е» не должна превосходить значений, приведенных в табл. 2.14.

Таблица 2.14

Класс изоляции по ГОСТ 8865 - 70	Предельная температура обмоток, °С	
	при номинальном режиме	в конце времени *t*

A	105	160
E	120	175
B	130	185
F	155	210
H	180	235

Этот вид взрывозащиты позволяет обеспечить два уровня взрывозащиты 2 (H) и 1 (B). Уровень 1 (B) обеспечивается при условии заключения электрооборудования вида «e» в оболочку вида «P» или «d».

Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь»

Взрывонепроницаемость электрооборудования во взрывоопасных средах не всегда достаточно оправдана для систем автоматизации, телеконтроля, связи, сигнализации и дистанционного управления. Обычно эти системы состоят из комплекса малогабаритных приборов и датчиков небольшой мощности и имеют разветвленную электрическую цепь. Поэтому применение взрывонепроницаемой оболочки и герметизации труб электрических проводов связано с большими затратами и неудобством монтажа, а опыт эксплуатации показывает, что взрывозащита таких многоэлементных разветвленных схем очень часто нарушается из-за корродирующего действия окружающей среды, нарушения зазоров и др.

Наиболее прогрессивным методом обеспечения взрывозащиты такой аппаратуры является искробезопасность ее электрической цепи. Взрывозащищенное электрооборудование с искробезопасной цепью характеризуется тем, что искры, возникающие при нормальной работе или при повреждениях (обрыв, КЗ и т.п.), не могут воспламенять взрывоопасную среду. Безопасность такого электрооборудования не может быть нарушена в процессе эксплуатации ни по ошибке, ни по небрежности. Такое электрооборудование конструктивно мало отличается от электрооборудования общего назначения, а затраты на аппаратуру и средства автоматизации с искробезопасной цепью снижаются на 25-30 % по сравнению с затратами на такую же аппаратуру во взрывонепроницаемой оболочке.

Установлено, что искробезопасность электрической цепи зависит от тока, напряжения, индуктивности, емкости электрической цепи, энергии искрового или дугового разряда, времени и скорости размыкания цепи, а также от формы и материала контакта искрообразующего устройства, концентрации взрывоопасных смесей.

Электрические искробезопасные цепи принято условно разделять на безындуктивные, индуктивные, емкостные и комбинированные.

Электрическая искра как источник воспламенения считается безопас-

ной, если она не обладает энергией, достаточной для воспламенения взрывоопасной смеси. Для каждой взрывоопасной смеси в данных условиях существует минимальная энергия искры $W_{\text{мин.и}}$, ниже которой воспламенение не происходит. Кроме того, энергия искрового разряда не полностью расходуется на воспламенение смеси, значительная часть ее затрачивается на нагрев контактов, излучение, теплопотери и др.

Различают следующие виды разрядов в газе: искровой, тлеющий и дуговой. Искровые разряды могут возникнуть только между контактами электрических цепей, в которых напряжение достигает примерно 250 В и выше, обеспечивая пробой в газах. Тлеющий разряд возникает при напряжениях в несколько сот вольт преимущественно у заостренного или тонкого проводника. В большинстве случаев тлеющий разряд является первоначальной стадией в формировании искрового или дугового разряда и не в состоянии воспламенить взрывоопасную смесь. Чаще в электрических цепях происходит дуговой разряд, характеризующийся малым падением напряжения и высокой температурой в капле дуги. Опытами установлено, что энергия, рассеиваемая на дуговой стадии разряда при размыкании, является основным параметром, по которому можно определить воспламеняющую способность электрических разрядов этого вида. Эта энергия составляет примерно от половины до трети общей энергии, рассеиваемой в искре.

При оценке искробезопасности электрической цепи исходят из понятий минимального воспламеняющего и искробезопасного тока, напряжения, мощности или энергии.

Минимальный воспламеняющий ток (напряжение, мощность или энергия) – ток (напряжение, мощность или энергия), вызывающий воспламенение взрывоопасной смеси с вероятностью 10^{-3}.

Искробезопасный ток - наибольший ток (напряжение, мощность или энергия) в электрической цепи, образующий разряды, который не вызывает воспламенения взрывоопасной смеси в предписанных ГОСТ Р 51330.10-99 (прил. 4) и ГОСТ 22782.5 – 78 [15] условиях испытаний.

Искробезопасные цепи должны иметь коэффициент искробезопасности не ниже 1,5 в нормальном режиме работы электрооборудования, а также в аварийных состояниях его при искусственно создаваемых повреждениях элементов и соединений. Под *коэффициентом искробезопасности* понимается отношение минимальных воспламеняющихся параметров к соответствующим искробезопасным.

Искробезопасные электрические цепи разделяются на три уровня i_a, i_b, i_c (табл. 2.15) и в зависимости от группы или подгруппы взрывозащищенного электрооборудования должны рассчитываться для использования в

соответствующей представительной взрывоопасной смеси, как это указывается в табл. 2.16.

Таблица 2.15

Знак уровня искробезопасной электрической цепи для электрооборудования группы II	Уровень взрывозащиты по ГОСТ Р 51330.10-99 и ПУЭ
i_a	Особовзрывобезопасный
i_b	Взрывобезопасный
i_c	Повышенной надежности против взрыва

Таблица 2.16

Группа и подгруппа взрывозащищенного оборудования по ГОСТ 12.2.020 -76 ГОСТ Р 51330.10-99	Представительная взрывоопасная смесь	Состав смеси с наибольшей воспламеняющей способностью, % об.
I	Метановоздушная	8,3 ± 0,3
IIA	Пропановоздушная	5,3 ± 0,3
	Пентановоздушная	4,6 ± 0,3
IIB	Этиленовоздушная	7,3 ± 0,5
IIC	Водородовоздушная	21,0 ± 2,0

Для электрооборудования группы II температура поверхности элементов цепи, которые нагреваются под действием протекающего по ним тока и соприкасаются со взрывоопасной смесью, не снабжены средствами взрывозащиты по ГОСТ 12.2.020 – 76, не должна превышать 85 °С.

Искробезопасная цепь, как правило, не должна заземляться, если этого не требуют условия работы электрооборудования. При заземлении искробезопасных цепей соединение с землей рекомендуется выполнять в одной точке. Если электрооборудование устанавливается во взрывоопасных зонах, наружные оболочки должны обеспечивать защиту внутренних элементов от повреждений со степенью защиты не ниже *IP*54 по ГОСТ 14254 – 96 [16]. Если же электрооборудование устанавливается за пределами взрывоопасных зон в закрытых шкафах или щитах, оболочка должна иметь степень защиты не ниже *IP*20. Этот вид взрывозащиты может обеспечить любой уровень взрывозащиты (см. табл. 2.11).

Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «масляное заполнение оболочки с токоведущими частями»

Во взрывозащищенном электрооборудовании с видом «масляное заполнение оболочки» электрические части должны находиться под защитным слоем масла. Если части оборудования, температура которых на поверхности не превышает допустимых величин, невозможно погрузить в масло, их следует заключить во взрывонепроницаемую оболочку или оболочку с другим видом взрывозащиты. Основной элемент взрывозащиты

такого электрооборудования во взрывоопасных средах – минимально допустимый защитный слой холодного масла над любой точкой, в которой может произойти искрение. Толщина слоя определяется расчетом, но во всех случаях он должен быть минимум на 25 мм выше всех токоведущих и находящихся под напряжением частей. Это необходимо, чтобы выделившаяся при искрении или дугообразовании смесь горючих газов (водород, ацетилен и др.) и углекислого газа, поднимаясь вверх через слой масла, успела охладиться не только ниже температуры самовоспламенения, но и ниже температуры самовоспламенения тех газов, которые могут проникать внутрь кожуха из атмосферы.

В конструкции маслонаполненного взрывозащищенного электрооборудования в качестве дополнительных средств взрывозащиты применяют защитные экраны типа I (закрепленная газопроницаемая сетка или пластина из прочного материала) и II (закрепленное в оболочке устройство в виде перфорированных листов из прочного материала, между которыми размещен слой сыпучего материала в виде шариков или гранул). Защитные экраны позволяют уменьшить высоту защитного слоя масла.

Значения толщины защитного неэкранированного $H_{и}$ и экранированного $H_{э.и}$ (в мм) слоя масла для взрывоопасных сред всех категорий и групп по условиям искрового разряда определяются по формулам:

$$H_{и} = 0{,}15\ N, \tag{2.8}$$

$$H_{э.и} = 0{,}08\ N, \tag{2.9}$$

где $N = 1{,}73\ IU$ – расчетная разрывная мощность аппарата (при скоростях движения контактов 0,12-0,69 см/с), кВ·А; здесь I – разрывной ток аппарата, к·А; U – напряжение в сети, В.

В маслонаполненном электрооборудовании применяется трансформаторное масло, обладающее высокими дугогасящими свойствами. Для контроля за уровнем масла в процессе эксплуатации в кожухе электрооборудования устанавливают маслоуказатель. Наблюдают за уровнем масла через смотровые окна из негорючего материала.

Температура масла в верхнем слое, а также температура частей аппарата, соприкасающихся со взрывоопасными смесями, не должна превышать в процессе эксплуатации соответствующих значений для групп взрывоопасных смесей: Т1, Т2 и Т3 – 115 °С; Т4, Т5 – 100 °С; Т6 – 80 °С.

Оболочки электрооборудования в собранном виде, включая вводные устройства, должны иметь степень защиты не ниже *IP*54 по ГОСТ 14254 – 86. Этот вид взрывозащиты может обеспечивать только уровень взрывозащиты 2(Н) (см. табл. 2.11).

Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «заполнение или продувка оболочки под избыточным давлением»

Токоведущие или находящиеся под напряжением части этого электрооборудования, в том числе электрооборудования общего назначения, встраиваются в оболочку, заполняемую или продуваемую под избыточным давлением защитным газом.

Защитный газ - негорючий газ, который находится в оболочке электрооборудования под избыточным давлением и предотвращает проникновение внутрь оболочки окружающей взрывоопасной среды. В качестве защитного газа для заполнения или продувки оболочки под избыточным давлением применяется атмосферный воздух или азот. Избыточное давление защитного газа у стенок оболочки и газопроводов, находящихся в пределах взрывоопасной зоны, должно быть не менее 100 Па, а выброс его из оболочки осуществляется за пределы взрывоопасной зоны. Допускается производить выбрасывание защитного газа во взрывоопасную зону при предпусковой продувке оболочки, т.е. перед включением электрооборудования в электрическую цепь для удаления из оболочки первоначальной среды с возможным наличием взрывоопасных смесей.

Устройства подачи атмосферного воздуха, имеющие зоны с разряжением (например, вентиляторы), устанавливаются за пределами взрывоопасной зоны и при необходимости должны иметь защиту от атмосферных воздействий, воздухоочистители и воздухоподогреватели (рис. 2.4). Электрооборудование этого вида взрывозащиты должно иметь блокировку:

допускающую включение электрооборудования в электрическую цепь только по истечении времени предпусковой продувки оболочки и газопроводов защитным газом в количестве, достаточном для удаления из них первоначальной среды, но не менее пятикратного объема оболочки и всех газопроводов;

включающую сигнал или отключающую электрооборудование от всех электрических цепей при падении избыточного давления ниже допустимой величины.

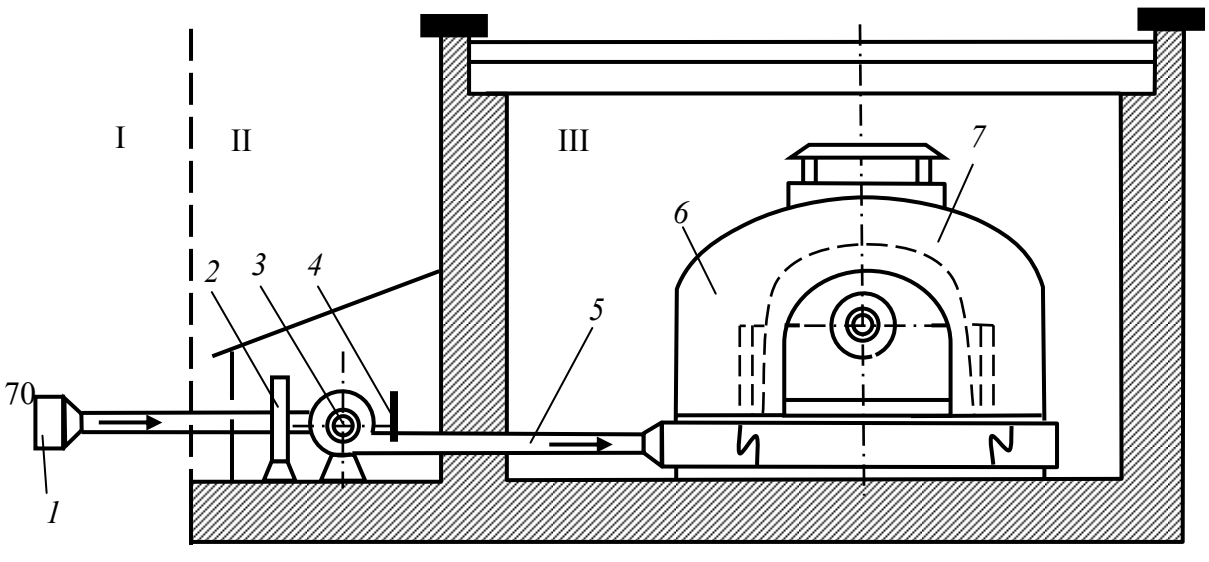


Рис. 2.4. Принципиальная схема обеспечения электродвигателя защитным газом:
I– пространство в невзрывоопасной зоне, из которого забирается атмосферный воздух для применения в качестве защитного газа; II– невзрывоопасная зона; III– взрывоопасная зона; *1*– фильтр; *2*– нагреватель; *3*– вентилятор подачи защитного газа; *4*– заслонка для регулирования количества защитного газа; *5*– выходящий газопровод; *6*– электродвигатель; *7*– продувочный клапан

В последнем случае время срабатывания приборов блокировки допускается таким, чтобы подача сигнала (для электрооборудования с уровнем «повышенная надежность против взрыва») или отключение электрооборудования от электрической цепи (для взрывобезопасного по уровню взрывозащиты) происходило бы раньше, чем величина избыточного давления в оболочке снизится до 50 Па.

Степени защиты оболочки и газопроводов принимаются не ниже *IP*40, а максимальная температура наружных поверхностей оболочки по условиям взрывобезопасности не должна превышать максимальных температур (см. табл. 2.13) для соответствующего температурного класса электрооборудования. Этот вид взрывозащиты может обеспечить два уровня взрывозащиты - 2(Н) и 1(В) (см. табл. 2.11).

Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «кварцевое заполнение оболочки»

Кварцевый песок определенной кондиции обладает рядом ценных свойств: достаточно высокой электрической прочностью, способностью понижать давление при взрыве парогазовоздушной смеси в оболочке, большой взрывонепроницаемостью.

Взрывозащита электрооборудования с токоведущими или находящимися под напряжением частями, погруженными в такой песок, достигается не только исключением прямого соприкосновения со взрывоопасной средой, но и тем, что взрывоопасная смесь, находящаяся между песчинками, в этих условиях не горит, а электрическая дуга, раскаленные металлические частицы и раскаленная стекловидная масса, образующаяся при действии дуги на песок, не прорываются наружу через защитный слой песка. Толщина защитного слоя песка зависит от номинального напряжения, мощности и времени действия дугового КЗ и определяется расчетом [17].

В оболочку, заполненную кварцевым песком, можно помещать элек-

трооборудование значительной мощности: трансформаторы до 320 кВА, дроссельные катушки и другое электрооборудование, не имеющее подвижных частей.

Использование электрооборудования с кварцевым заполнением допускается во взрывоопасных зонах всех классов, которые могут содержать взрывоопасные смеси всех категорий и групп. Максимальная температура частей электрооборудования, соприкасающихся со взрывоопасными смесями, не должна превышать величин, указанных в табл. 2.13. Оболочка электрооборудования с кварцевым заполнением должна иметь защиту от внешних воздействий не ниже *IP*54 и выдерживать гидравлические испытания избыточным давлением 50 кПа. Этот вид взрывозащиты может обеспечивать уровень взрывозащиты 2(Н) (см. табл. 2.11).

Электрооборудование взрывозащищенное со специальным видом взрывозащиты

Взрывозащищенное электрооборудование может иметь специальный вид взрывозащиты, основанный на средствах, отличающихся от рассмотренных выше, но эффективность и достаточность которых признана испытательными организациями и согласована с Главгосэнергонадзором. Например, токоведущие части электрооборудования могут быть заключены в оболочку с заливкой эпоксидным компаундом, герметиком и другими веществами, обладающими электроизоляционными свойствами. Для обеспечения такого вида взрывозащиты на взрывоопасную смесь, проникающую в оболочку электрооборудования, воздействуют специальными устройствами или веществами для поглощения, флегматизации или снижения ее концентрации до значений, не превышающих 50 % нижнего предела взрывоопасности. Можно также ограничить время действия источника инициирования взрыва или снизить воспламеняющую способность источника взрыва до таких значений, при которых исключалось бы воспламенение взрывоопасной среды.

Защитная оболочка с заливкой эпоксидными смолами используется пока для защиты маломощного электрооборудования, трансформаторов малой мощности, катушек, блоков конденсаторов или сопротивлений и другого электрооборудования, не имеющего подвижных частей.

Предельная температура нагрева электрооборудования специального вида не должна превышать значений, указанных в табл. 2.13.

Этот вид взрывозащиты может обеспечить любой уровень взрывозащиты.

2.4. МАРКИРОВКА ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

В зависимости от класса взрывоопасной зоны может применяться то или иное по уровню и виду взрывозащищенное электрооборудование, а в отдельных случаях (например, в зонах В-Iб(2) и В-IIа(22)) и электрооборудование общего назначения, но с определенной степенью защиты оболочки по ГОСТ 14254 - 96.

Маркировка электрооборудования по взрывозащите является характеристикой особенностей национальных правил изготовления взрывозащищенного электрооборудования и служит для оперативной оценки области его применения во взрывоопасных зонах. Опыт применения отечественного и зарубежного взрывозащищенного электрооборудования показал, что наличие индивидуальной для каждого национального стандарта маркировки по взрывозащищенности создавало некоторые затруднения и являлось нежелательным в проектной и эксплуатационной практике. В связи с этим был разработан ГОСТ 12.2.020 - 76 [14], в котором установлена новая маркировка взрывозащищенного электрооборудования с учетом рекомендаций СЭВ и МЭК (Международная электротехническая комиссия) и предусмотрена унифицированная маркировка электрооборудования по взрывозащите. Согласно этому стандарту, в маркировку по взрывозащите электрооборудования группы II в указанной ниже последовательности входят:

знак уровня взрывозащиты электрооборудования (2,1,0 - табл. 2.11);

общий знак Ex (Explosionprof - взрывозащищенный), указывающий на соответствие электрооборудования стандартам на взрывозащищенное электрооборудование [11, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23];

знак вида взрывозащиты (*d, p, i, o, s, e,* min - табл. 2.12), электрооборудование с видом взрывозащиты «*i*» может быть обеспечено тремя уровнями (i_a, i_b, i_c - табл. 2.15);

знак группы или подгруппы электрооборудования и категории взрывоопасной смеси (II, IIA, IIB, IIC - табл. 2.7);

знак температурного класса электрооборудования (T1, T2, T3, T4, T5, T6 - табл. 2.13).

В маркировке по взрывозащите могут быть дополнительные знаки и надписи в соответствии с требованиями ГОСТ 51330.0-99 и стандартами на электрооборудование с отдельными видами взрывозащиты (прил. 4). Так, в маркировке взрывозащиты электрооборудования группы II, предназначенной только для определенной взрывоопасной смеси, вместо знака температурного класса может быть указана предельно допустимая температура для этой смеси, например 630 °С. Если значение предельной температуры для конкретной смеси менее 450 °С, в скобках дополнительно может быть указан и температурный класс электрооборудования, например 350 °С (T2).

Маркировка взрывозащиты должна выполняться в виде целого, не разделенного на части знака, заключенного в прямоугольник.

Примеры маркировки взрывозащиты электрооборудования группы II приведены в табл. 2.17.

Маркировка электрооборудования по взрывозащите согласно ПИВРЭ [7] содержит условные знаки, которые в указанной ниже последовательности обозначают:

уровень взрывозащиты (Н, В, О - табл. 2.11);

наивысшую категорию взрывоопасной смеси (1, 2, 3, 4 - табл. 2.5); уровень взрывозащиты (Н, В, О - табл. 2.11);

наивысшую группу взрывоопасной смеси (Т1, Т2, Т3, Т4, Т5 – табл. 2.4); вид взрывозащиты (В, Н, М, И, П, К, С - табл. 2.12).

Согласно ПИВРЭ, маркировка электрооборудования по взрывозащите состоит из основного знака, расположенного в прямоугольнике и отражающего уровень взрывозащиты, категорию и группу взрывоопасной смеси. Вид взрывозащиты электрооборудования помещается в кружке отдельно или вместе с основным знаком (под ним). Допускается выполнение знака вида взрывозащиты на одной стороне (справа) с основным знаком через пропуск или косую черту. В случае, если электрооборудование состоит из элементов, имеющих разные виды взрывозащиты, в маркировке указываются все виды, обеспечивающие взрывозащищенность электрооборудования. Уровень взрывозащиты в этом случае указывается наинизший.

Электрооборудование, изготовленное по ПИВЭ, на уровни взрывозащиты не подразделяется. Виды взрывозащиты электрооборудования в маркировке обозначаются теми же буквами, что и по ПИВРЭ.

Таким образом, в маркировку взрывозащиты электрооборудования по ПИВЭ в указанной ниже последовательности входят:

вид взрывозащиты (см. табл. 2.12);

наивысшая категория взрывоопасной смеси, для которой электрооборудование является взрывозащищенным (см. табл. 2.5), если взрывозащита электрооборудования или отдельных ее частей обеспечивается взрывонепроницаемой оболочкой. На электрооборудовании с другими видами взрывозащиты, являющемся взрывозащищенным для взрывоопасных смесей всех категорий, вместо обозначения категории взрывоопасной смеси ставится ноль;

наивысшая группа взрывоопасной смеси (см. табл. 2.4), для которой электрооборудование является взрывозащищенным.

Для электрооборудования с защитой вида «е» (повышенная надежность против взрыва) с искрящими частями, заключенными во взрывонепроницаемую оболочку, заполненную маслом или продуваемую под избыточным давлением, вместо нуля ставится обозначение соответствующего вида взрывозащиты: В, М или П.

Для электрооборудования с искробезопасными электрическими цепями указывается наименование горючего вещества, на котором оно испытано. Обозначение категории и группы для такого электрооборудования не проставляется.

При оценке уровней взрывозащиты электрооборудования, изготовленного по ПИВЭ, следует исходить из того, что к уровню «электрооборудование повышенной надежности против взрыва» относится электрооборудование, имеющее в маркировке по взрывозащите букву Н, а также цифру 2 перед буквой И, например НМБ, НОГ, Н2А, НПД, НОА и т.д. Электрооборудование с другими маркировками по взрывозащите, выполненными по ПИВЭ, следует относить к уровню «взрывобезопасное электрооборудование» [1].

2.5. ЗАРУБЕЖНОЕ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Проблема безопасности при использовании электрооборудования во взрывоопасных производствах приобретает особое значение в связи с эксплуатацией большого количества зарубежного электрооборудования, поставляемого в Россию как отдельно, так и комплектно с технологическим оборудованием.

Выбор и применение в России зарубежного взрывозащищенного элек-

трооборудования регламентируется указаниями гл. 3.4 [10], РД-03-67-94 [12] и отраслевыми стандартами [13].

Страны, производящие и поставляющие взрывозащищенное электрооборудование, имеют национальные стандарты (правила) на проектирование, испытание, маркировку, выбор и применение такого электрооборудования, а также стандарты на классификацию взрывоопасных установок (зон) и взрывоопасных смесей (см. табл. 2.9 и 2.10).

Кроме национальных стандартов существуют международные рекомендации и нормы, например:

рекомендации Международной электротехнической комиссии - МЭК (IEC), объединяющей практически все страны, изготавливающие или потребляющие взрывозащищенное электрооборудование;

европейские нормы (EN), являющиеся обязательными для включения в национальные стандарты стран-членов Европейского комитета по координации электротехнических норм (CENELEC).

Большинство зарубежных стандартов и правил существенно различаются между собой и отличаются от норм России. Так, критерии, по которым проводится классификация взрывоопасных зон, категорий и групп взрывоопасных смесей, в стандартах разных стран различны [13, 24]. Например, в США и Канаде отсутствует классификация взрывоопасных смесей по группам. Большинство стандартов не предусматривает классификацию взрывозащищенного электрооборудования по уровню взрывозащиты. Неодинаковы и нормирование средств взрывозащиты электрооборудования, методы его испытания и маркировка взрывозащиты.

Таким образом, обилие норм, стандартов и рекомендаций затрудняет сопоставление электрооборудования по однозначности его взрывозащиты и усложняет проблему выбора монтажа и эксплуатации зарубежного взрывозащищенного электрооборудования, которое должно соответствовать требованиям российских норм и правил.

В Россию зарубежное взрывозащищенное электрооборудование поступает, как правило, в комплекте с технологическими взрывоопасными установками, но может закупаться и индивидуально (россыпью). В комплекте со взрывозащищенным электрооборудованием фирмы-изготовителя или фирмы-поставщика должна представляться и соответствующая документация.

В состав технической документации входят:

перечень электрооборудования, в котором указывается вид взрывозащиты (по зарубежному стандарту и стандарту России), маркировка взрывозащиты (по зарубежному стандарту);

взрывоопасные условия применения (класс взрывоопасной зоны, категория и группа взрывоопасной смеси по зарубежным стандартам и стан-

дартам России);

сертификат (копия свидетельства) о взрывозащищенности каждого изделия (или партии однотипных изделий). В сертификате указывается: стандарт, по которому изготовлено электрооборудование; вид взрывозащиты, маркировка взрывозащиты и взрывоопасная среда, на которую рассчитано электрооборудование. Сертификат должен быть согласован с национальной (зарубежной) испытательной организацией. Образцы сертификатов ряда стран и перечень национальных испытательных организаций приведены в РД-03-67-94, ОСТ 16 0.800.699-79-ОСТ 16 0.800.704-79 [12 и 13];

инструкция по монтажу и эксплуатации;

сборочные чертежи электрооборудования или его узлов с указанием мер, средств и параметров, обеспечивающих взрывозащиту.

По просьбе заказчика (министерства, акционерного общества или фирмы) на зарубежное взрывозащищенное электрооборудование оформляется свидетельство испытательной организации России (например, ВостНИИ - Восточного научно-исследовательского института по безопасности работ в горной промышленности или испытательного центра взрывозащищенного электрооборудования РФЯЦ - ВНИИЭФ в г. Сарове). На электрооборудование, закупаемое индивидуально (россыпью), оформление свидетельства является обязательным.

В свидетельстве (сертификате) о взрывозащищенности электрооборудования испытательная организация России указывает возможность его применения во взрывоопасных зонах и взрывоопасных смесях в соответствии с нормами и правилами, действующими в России.

Зарубежное взрывозащищенное электрооборудование, как и отечественное, в соответствии с национальными стандартами должно иметь маркировку (знак) взрывозащиты или данные о взрывозащищенности. Маркировка взрывозащиты указывается обычно на фирменной или специальной табличке. Маркировка может быть рельефно отлита заодно с основной деталью или частью оболочки электрооборудования (на корпусе, крышке и др.).

Маркировка взрывозащиты электрооборудования согласно национальным стандартам зарубежных стран и международных организаций приводится в ОСТ 160.800.699-ОСТ 160.800.704-79 [13] и [24]. Маркировка взрывозащиты содержит условные знаки или данные, которые обозначают (см. табл. 2.6, 2.7 [24] и [13]):

принадлежность электрооборудования к взрывозащищенному (общий знак взрывозащиты, например: Ex, EEx, S, Rb, AD, SA и др.). Стандарты Японии и Швеции общего знака не имеют;

вид взрывозащиты (см. табл. 2.6, 2.7 [24] и [13]). Стандарты Бельгии, США, Канады, а также ранее действовавшие стандарты Англии и Франции этих данных не предусматривали;

категории взрывоопасной смеси (см. табл. 2.9, 2.2 и 2.3 [24] и [13]). Категория указывается для электрооборудования или его узла, именующего вид взрывозащиты «взрывонепроницаемая оболочка» и, как правило, «искробезопасная электрическая цепь»;

группу взрывоопасной смеси (см. табл. 2.10, 2.4 и 2.5 [24] и [13]). Согласно стандартам США и Канады, а также действовавшим ранее стандартам Англии, Франции и Италии, взрывоопасные смеси не классифицированы по группам, поэтому в этих случаях в маркировке группа не указывается.

Взрывозащищенное электрооборудование может иметь один или несколько видов взрывозащиты. В последнем случае электрооборудованию присваивают, как правило, комбинированную маркировку или указывают знак взрывозащиты каждого вида. В ряде стран (ФРГ, Австрия, Япония, Швеция) комбинированная маркировка присваивается изделию в том случае, если каждый вид взрывозащиты имеет важное значение по обеспечению взрывозащиты электрооборудования.

В маркировке взрывозащиты электрооборудования, кроме основных знаков, могут указываться дополнительные данные, такие, как номер сертификата, номер стандарта, зона взрывоопасности, допустимые параметры по искробезопасности (U, I, L, C), допустимое время τ_e, максимальная температура нагрева частей электрооборудования.

Во всех зарубежных стандартах для всех видов взрывозащиты, кроме искробезопасных электрических сетей, отсутствует деление на уровни взрывозащиты.

Европейским комитетом по электротехнической стандартизации (CENELEC) введены общие требования к взрывозащищенному электрооборудованию, называемые Европейскими нормами (EN50014), которые должны быть включены в национальные стандарты стран-членов CENELEC (ФРГ, Австрия, Дания, Испания, Финляндия, Франция, Ирландия, Италия, Норвегия, Голландия, Португалия, Англия, Швеция и Швейцария). Эти нормы содержат также требования к единой системе маркировки взрывозащищенного электрооборудования.

Несмотря на наличие рекомендаций МЭК и CENELEC, большое количество зарубежного электрооборудования изготовляется по национальным стандартам, которые еще не приведены в соответствие с международными стандартами.

Рекомендации по выбору зарубежного взрывозащищенного электрооборудования и оценки его соответствия требованиям ПУЭ включают этапы:

выбор уровня и вида взрывозащиты электрооборудования на соответствие классу взрывоопасной зоны (см. табл. 2.7 [24] и [13]);

выбор маркировки (знака) взрывозащиты на соответствие взрывоопасной смеси (по категории и группе) - табл. 2.9 и 2.10.

В наружных установках электрооборудование должно быть пригодным для работы на открытом воздухе или иметь устройство для защиты от атмосферных воздействий.

В табл. 2.18 приводятся примеры сопоставления маркировок отечественного и зарубежного электрооборудования по взрывозащите и области его применения во взрывоопасных средах.

Таблица 2.18

Вид взрывозащиты	Взрывоопасная смесь	Маркировка по взрывозащите в странах							
		Россия			ЧССР	ФРГ	Япония	Англия	Франция, CENELEC
		ГОСТ 12.2.020-76	ПИВРЭ	ПИВЭ					
d	Метан	1 Exd IIAT1	B1T1-B	B1Aa	Ex3 P|A	Exd IIAT1	d1G1	Exd IIAT1	Exd IIAT1
	CS_2	1ExdIICT6	B4T5-B	B4Д	Ex3 H|F	Exd IICT6	d3вG5	Exd IICT6	Exd IICT6
e	Серный эфир	2ExeIICT4	H4T4-H	КОГ	Ex0 H|D	Exe IICT4	eG4	Exe IICT4	Exe IICT4
o	Дивинил	1ExoIIBT2	B3T2-M	МОД	Ex5 S|B	Exo IIBt2	oG2	Exo IIBT2	Exo IIBT2
p	Трихлорсилан	1ExpIICT3	B4T3-П	ПОГ	Ex6 H|C	Exp IICT3	fG3	Exp IICT3	Exp IICT3
s	Окись этилена	1ExsIIBT2	B3T2-C	СОБ	Ex8 S|B	Exs IIBT2	sG2	Exs IIBT2	Exs IIBT2
i	H_2	1ExiICT1	B4T1-И	ИО водород	Ex9 H|A	Exi IICT1	iG1	Exi IICT1	Exi IICT1

Допуск к применению зарубежного взрывозащищенного электрооборудования должен разрешаться головными отраслевыми технологическими институтами совместно с органами надзора России (например, Главгосэнергонадзор, Госгортехнадзор и др.).

2.6. ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА, МОНТАЖА, ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕМОНТА ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Выбор и условия применения электрооборудования. Надежность и безопасность эксплуатации взрывозащищенного электрооборудования во взрывоопасных зонах может быть обеспечена, если оно будет соответствовать классу взрывоопасной зоны, категории и группе взрывоопасной смеси, а также условиям, характеризующим температуру, влажность, химическую агрессивность и запыленность среды. При этом количество взрывозащищенного электрооборудования, устанавливаемого во взрывоопасных зонах, должно быть по возможности минимальным, а электрооборудование

с нормально искрящими частями рекомендуется выносить за пределы взрывоопасных зон.

Выбору количества и места установки электрооборудования должен предшествовать анализ технической документации как самого электрооборудования, так и места его установки.

При пожарно-технической экспертизе электротехнической части проектов или пожарно-техническом обследовании электроустановок действующих объектов следует учитывать, что расчет и техническое обоснование класса взрывоопасной зоны приводятся в технологической части проекта. В электротехнической части проекта (на планах расположения силового и осветительного электрооборудования) указываются классы взрывоопасных зон, группы и категории взрывоопасных смесей, по которым был произведен выбор электрооборудования.

Определяющим при выборе взрывозащищенного электрооборудования является его назначение, уровень и вид взрывозащиты. Эти характеристики устанавливаются по паспортным данным и маркировке. Допустимые уровни взрывозащиты, а также допустимая степень защиты оболочки электрооборудования (для случая, когда взрывозащищенное электрооборудование не требуется, а допускается электрооборудование общего назначения) приводится в табл. 2.19.

При проектировании новых объектов и реконструкции старых электрооборудование для взрывоопасных зон должно выбираться в соответствии с требованиями гл. 7.3 [1], с учетом табл. 2.19, с соблюдением при этом определенной последовательности [24].

В случае, если промышленность не выпускает взрывозащищенное электрооборудование в нужном исполнении, вопрос о замене решается Главгосэнергонадзором.

В основе выбора зарубежного взрывозащищенного электрооборудования лежат те же факторы, т.е. анализ взрывоопасных условий будущей эксплуатации и особенностей его взрывозащиты. Задача несколько усложняется, если зарубежное взрывозащищенное электрооборудование поставляется комплектно, так как обязательно требуется проводить сравнение классификации взрывоопасных условий по зарубежному стандарту с классификацией взрывоопасных зон по ПУЭ.

Вторым важным фактором выбора является установление соответствия вида взрывозащиты электрооборудования категории и группе взрывоопасной смеси. Это соответствие должно устанавливаться по маркировке, а также по указаниям сертификата (или свидетельства).

Любое зарубежное взрывозащищенное электрооборудование должно обязательно пройти государственные контрольные испытания на национальной испытательной станции или на испытательной станции страны, в которую оно будет поставляться. По результатам испытаний испытательная станция выдает сертификат (или свидетельство) о проведенных испытаниях, в котором указываются особенности рассмотренного электрооборудования.

Зарубежное взрывозащищенное электрооборудование, поставляемое в Россию комплектно с технологической установкой или отдельно, должно пройти освидетельствование средств взрывозащиты в контрольных (испытательных) организациях [12]. В некоторых случаях освидетельствование можно не проводить, ограничившись соответствующим заключением головной проектной организации, если зарубежное оборудование будет использоваться только в каких-либо конкретных условиях, например на газораспределительной станции с хорошо известными взрывоопасными условиями.

После получения дополнительных результатов освидетельствования испытательная организация оформляет свидетельство о взрывозащищенности (сертификат) установленного образца и передает его на утверждение в Главгосэнергонадзор. В дальнейшем поступающее в Россию подобное электрооборудование освидетельствованию не подлежит. Последующие переосвидетельствования проводят через 5 лет.

Нормативно задача выбора зарубежного взрывозащищенного электрооборудования решается в свете требований [12] и ОСТ 16.0.800.699-79-ОСТ 16.0.800.704-79 [13].

Особенности монтажа электрооборудования. Монтаж взрывозащищенного электрооборудования должны производить специализированные электромонтажные организации в соответствии с требованиями ПУЭ [1], СНиП 3.05-06 [25], а также Инструкции по монтажу электрооборудования, силовых и осветительных сетей взрывоопасных зон [26], специальных инструкций (или указаний) по монтажу отдельных видов взрывозащищенного электрооборудования и других нормативных документов.

Монтажные работы должны выполняться в соответствии с проектом производства электромонтажных работ, разработанным согласно указаниям и нормам. При этом необходимо строго соблюдать все указания инструкции по монтажу и эксплуатации взрывозащищенного электрооборудования заводов-изготовителей. Обычно они помещаются в проекте произ-

водства электромонтажных работ, в разделе «Обеспечение взрывозащиты при монтаже».

Вновь смонтированная или реконструированная электроустановка должна быть принята в эксплуатацию в порядке, установленном действующими нормами и правилами [1, 10, 25, 27].

При сдаче в эксплуатацию кроме документации, предусмотренной отраслевыми правилами приемки и правилами [10], должны быть оформлены и переданы предприятию, например, следующие документы и расчеты:

а) проект силового электрооборудования и электрического освещения, который наряду с обычными техническими расчетами и чертежами должен содержать (п. 3.4.4 [10]):

расчет или техническое обоснование возможности образования в помещении или вокруг наружной установки взрывоопасных смесей ЛВЖ, ГГ, ГП или ГВ в смеси с воздухом, т.е. обоснование класса взрывоопасной зоны категории и группы взрывоопасных смесей и др. Расчет или технические обоснования могут быть изложены в технологической части проекта;

спецификацию электрооборудования и установочной аппаратуры с указанием их маркировки по взрывозащите;

планы расположения электрооборудования с разводкой силовых, осветительных, контрольных и других электрических цепей с указанием классов взрывоопасных зон, категории и группы взрывоопасных смесей или наименования горючих волокон либо пыли, по которым было выбрано электрооборудование;

документацию по молниезащите зданий и сооружений и защите от статического электричества;

расчет токов короткого замыкания в сетях напряжением до 1000 В;

перечень мероприятий, которые могут предотвратить образование взрывоопасных концентраций: устройство вентиляции, сигнализации, установка защитных блокировочных устройств и автоматических средств контроля концентрации взрывоопасных газов, паров, веществ и др.;

б) документация приемосдаточных и пусконаладочных испытаний электрооборудования, предусмотренных ПУЭ [1], и соответствующие протоколы: предпусковых испытаний взрывозащищенного электрооборудования (по инструкциям заводов-изготовителей); измерения избыточного давления в помещениях, предусмотренные ПУЭ; испытаний давлением плотности соединений трубопроводов и разделительных уплотнений электропроводок; проверки полного сопротивления петли фаза-нуль в установках напряжением до 1000 В с контролем кратности тока однофазного КЗ номинальному току ближайшей плавкой вставки предохранителя или установки автоматического выключателя в соответствии с указаниями гл. 7.3 [1] и гл. 3 учебника и т.д.;

в) документация, поставляемая с импортным взрывозащищенным электрооборудованием (определяется контрактом с иностранной фирмой);

г) инструкции заводов-изготовителей по монтажу и эксплуатации взрывозащищенного электрооборудования.

При приемке в эксплуатацию электроустановок кроме выполнения требований ПУЭ [1] и [10] и инструкций заводов-изготовителей следует обязательно контролировать: соответствие проекту установленного во взрывоопасных зонах электрооборудования, а также смонтированных проводов и кабелей; техническое состояние каждого электротехнического изделия; правильность выполнения ввода проводов и кабелей, надежность их уплотнения; наличие разделительных уплотнений электропроводок (подтверждается протоколом монтажной организации); наличие уплотнений в патрубках при проходе одиночных кабелей через стены и т.п.

Приемка в эксплуатацию взрывозащищенного электрооборудования с дефектами и неполадками запрещается.

Особенности эксплуатации электрооборудования. Смонтированное или реконструированное электрооборудование, установленное во взрывоопасной зоне, должно быть принято в эксплуатацию специальной комиссией в составе представителей монтажной организации, эксплуатирующего предприятия и местных контролирующих (надзорных) организаций. Состав комиссии утверждается главным инженером предприятия. Порядок участия представителя органов государственного пожарного надзора в комиссии регламентируется положениями НПБ 05-93 [27].

К эксплуатации во взрывоопасных зонах допускается электрооборудование, которое изготовлено на специализированных предприятиях в соответствии с требованиями правил [7 и 8], стандартов на отдельные виды взрывозащиты (например, [11], [14], [15], [17]-[23]) либо электрооборудование, имеющие маркировку по взрывозащите и снабженное эксплуатационной документацией (см. прил. 4).

Электрооборудование, изготовленное неспециализированными предприятиями, а также опытные образцы взрывозащищенного электрооборудования могут применяться во взрывоопасных зонах только после получения заключения испытательной организации (например, в испытательном центре взрывозащищенного электрооборудования РФЯЦ-ВНИИЭФ).

Безопасная эксплуатация взрывозащищенного электрооборудования обеспечивается правильной организацией осмотров и периодических проверок средств и параметров, обеспечивающих их взрывозащищенность, а также своевременным устранением различных нарушений. С этой целью ответственный за электрохозяйство предприятия обязан обеспечить инструктаж электротехнического персонала по вопросам взрывобезопасности в соответствии с инструкциями, утвержденными главным инженером пред-

приятия.

На каждое взрывозащищенное электрооборудование составляется паспорт индивидуальной эксплуатации (например, в виде отдельных карт), в которых указывается его состояние на различных стадиях проведения регламентных работ.

При эксплуатации взрывозащищенного электрооборудования пользуются указаниями действующих правил [10] и различных инструкций на конкретные виды оборудования.

На взрывозащищенном оборудовании *запрещается* закрашивать паспортные таблички. Необходимо периодически восстанавливать окраску знаков взрывозащиты и предупредительных надписей. Цвет их окраски должен отличаться от цвета окраски электрооборудования (как правило, должна применяться красная краска).

Периодичность профилактических испытаний взрывозащищенного электрооборудования устанавливается ответственным за электрохозяйство предприятия с учетом местных условий и должна быть не реже, чем указано в соответствующих главах правил эксплуатации [10] для электрооборудования общего назначения.

Эксплуатация зарубежного взрывозащищенного электрооборудования должна производиться в строгом соответствии с указаниями гл. 3.4 [10].

При эксплуатации электроустановок во взрывоопасных зонах следует руководствоваться также и правилами техники безопасности [28].

Особенности ремонта электрооборудования. Ремонт взрывозащищенного электрооборудования в принципе не отличается от ремонта электрооборудования общего назначения, однако при этом необходимо не только восстановление его работоспособности, но и соблюдение параметров его взрывозащищенности.

Планово-предупредительный ремонт и профилактические испытания электрооборудования должны осуществляться по графику в сроки, установленные в правилах [10], инструкцией завода-изготовителя и другими директивными материалами. К ремонту взрывозащищенного электрооборудования допускаются лица, прошедшие одновременно с проверкой знаний (общих) гл. [10] и [27] проверку знаний гл. 3.4 [10], инструкций заводов-изготовителей, а также правил [7, 8], стандартов [11], [14], [15], [17]-[23] и др. (см. прил. 4). При проведении профилактических осмотров, технического обслуживания и текущих ремонтов эксплуатационному персоналу разрешается выполнять работы, не связанные с восстановлением взрывозащиты электрооборудования или не влияющие на его взрывозащиту, например:

замену смазки в подшипниках и самих подшипников;

ревизию токоведущих частей и контактных соединений;

устранение течи масла и его замену;

замену перегоревших ламп и поврежденных стеклянных колпаков в светильниках;

замену уплотняющих прокладок;

ремонт систем продувки, чистку и замену фильтров, замену разбитых стекол смотровых окон;

замену деталей и узлов на аналогичные запасные, поставленные заводом-изготовителем комплектно с изделием, либо изготовленные заводом по заказу организации, эксплуатирующей изделия.

Средний и капитальный ремонты, связанные с заменой, восстановлением или изготовлением деталей и сборочных единиц, неисправность которых может повлечь за собой нарушение взрывозащищенности электрооборудования, выполняют в соответствии с РД 16.407.95 [9], зарегистрированные в органах Госгортехнадзора ремонтные предприятия (заводы, цехи, участки), оснащенные соответствующим оборудованием и имеющие разрешение вышестоящей организации, определившей достаточность их специализации.

Ремонт зарубежного взрывозащищенного электрооборудования организационно мало чем отличается от ремонта отечественного электрооборудования аналогичного назначения. Осложнением является отсутствие специальной ремонтной документации, которую вынуждены разрабатывать ремонтные предприятия и в установленном порядке согласовывать с контрольной (испытательной) организацией.

2.7. ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА, МОНТАЖА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПОЖАРООПАСНЫХ ЗОН И ПОМЕЩЕНИЙ С НОРМАЛЬНОЙ СРЕДОЙ

Для обеспечения пожарной безопасности электрооборудования в пожароопасных зонах помещений и наружных установок пожароопасных производств применяется электрооборудование общего назначения. При этом степень защиты оболочки электрооборудования должна соответствовать классу пожароопасной зоны (см. п. 2.1 и табл. 7.4.1, 7.4.3 [1] и [24].

При размещении в помещениях или наружных установках единичного пожароопасного оборудования, когда специальные меры против распространения пожара не предусмотрены, зона в пределах до 3 м по горизонтали и вертикали от этого оборудования является пожароопасной, а ее класс определяется в зависимости от нормативных признаков и характеристик.

Электрооборудованием общего назначения называется электрооборудование, выполненное без соблюдения специфических требований, характерных для определенной отрасли промышленности или определенного

назначения.

На оболочку такого электрооборудования или на табличку с его паспортными данными, либо в помещениях, указанных в стандартах или технических условиях могут наноситься условные обозначения степени защиты оболочки по ГОСТ 14254-86 [16]. Такая степень обозначается латинскими буквами *IP* (начальные буквы слов *International Protection*). Следующие за ними две цифры означают: первая – степень защиты персонала от соприкосновения с токоведущими частями и попадания внутрь оболочки твердых посторонних тел; вторая – степень защиты оборудования от проникновения внутрь оболочки воды. В табл. 2.20 приведены предпочтительные степени защиты оболочек электрооборудования.

Таблица 2.20

Первая цифра: защита от проникновения и попадания посторонних тел	Вторая цифра – защита от проникновения воды								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	*IP*00	*IP*01	-	-	-	-	-	-	-
1	*IP*10	*IP*11	*IP*12	*IP*13	-	-	-	-	-
2	*IP*20	*IP*21	*IP*22	*IP*23	-	-	-	-	-
3	*IP*30	*IP*31	*IP*32	*IP*33	*IP*34	-	-	-	-
4	*IP*40	*IP*41	*IP*42	*IP*43	*IP*44	-	-	-	-
5	-	-	-	-	*IP*54	*IP*55	*IP*56	-	-
6	-	-	-	-	-	*IP*65	*IP*66	*IP*67	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	*IP*68

Если для электрооборудования нет необходимости в одном из видов защиты, то в условном обозначении допускается проставлять знак X вместо цифрового обозначения того вида защиты, который в данном электрооборудовании не требуется или испытания которого не производятся. Например: *IP*X2, *IP*3X и т.д.

При выборе электрооборудования, устанавливаемого в пожароопасных зонах, необходимо учитывать также условия окружающей среды (химическую активность, атмосферные осадки и т.п.).

Электрооборудование с частями, искрящими при нормальной работе, рекомендуется выносить за пределы пожароопасных зон, если это не вызывает затруднений при эксплуатации и не сопряжено с неоправданными затратами. В случае его установки в пределах пожароопасной зоны оно должно удовлетворять требованиям гл. 7.4 [1].

Электрооборудование в помещениях с нормальной средой (т.е. не содержащих пожаро- и взрывоопасные зоны) или располагаемое на открытом воздухе или под навесами должно быть стойким в отношении воздействий окружающей среды или защищенным от этого воздействия (влаги, пыли,

химически активной среды, повышенной температуры и т.п.).

В связи с указанным требованием в гл. 1.1 [1] выбор электрооборудования увязывается с классификацией помещений по общим свойствам и характеру окружающей среды: сухие, влажные, сырые, особо сырые, жаркие, пыльные (имеется в виду, что пыль негорючая, но токопроводящая или нетокопроводящая) и с химически активной средой.

С учетом этой классификации в соответствующих разделах и главах ПУЭ [1] указывается допустимая степень защиты оболочек электрооборудования общего назначения (см. табл. 2.20).

Монтажные работы должны выполняться с учетом требований [1], [25], а также инструкции по монтажу электрооборудования пожароопасных установок [30].

2.8. КОНТРОЛЬ ЗА ПРОТИВОПОЖАРНЫМ СОСТОЯНИЕМ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Надзор за соблюдением правил устройства и правил технической эксплуатации электроустановок осуществляется органами Главного управления государственного энергетического надзора Министерства топлива и энергетики Российской Федерации. Поэтому представитель Государственный противопожарной службы (ГПС), кроме материалов, подготовленных пожарно-технической комиссией, должен внимательно изучить документы и материалы ревизии и обследования электроустановок представителями безопасности – Госэнергонадзором и Госгортехнадзором. Если требования этих надзорных органов имеют отношение к пожарной безопасности электроустановок, их можно подтвердить предписанием госпожнадзора, т.е. включить отдельными пунктами. Следует учитывать и требования правил [36 и 37].

Большое значение в обеспечении пожарной безопасности электроустановок имеет взаимодействие госпожнадзора с органами Государственного энергетического надзора. Указанные органы должны анализировать пожары, происшедшие по причине неисправности или неправильной эксплуатации электроустановок, и разрабатывать мероприятия по их предупреждению и тушению, принимать совместное участие в установлении причин пожара от электроустановок; совместно проводить мероприятия по повышению квалификации работников, связанных с монтажом и эксплуатацией электроустановок. Должен быть обмен информацией по нормативно-техническим вопросам устройства и эксплуатации электроустановок, а также сведениям о происшедших авариях и пожарах от электроустановок.

Обеспечение пожаро- и взрывобезопасности электроустановок достигается и выполнением нормативно-технической работы органами ГПС, на-

пример, путем контроля за выполнением проектными организациями противопожарных требований, общегосударственных норм и правил при разработке проектов, т.е. выполнением пожарно-технической экспертизы любой части проекта, в том числе и электротехнической, или всего проекта в целом. Оформляются следующие документы: *письмо* в проектную организацию или *предписание*, в которых предусматривается устранение выявленных нарушений и отступлений от норм проектирования (ГОСТ, ПУЭ, СНиП, ПЭЭП, ПТБ, ТУ, НПБ, ППБ и ведомственных нормативов).

В рекомендациях, разрабатываемых по результатам пожарно-технической экспертизы, должны быть предложены такие технические решения по устранению нарушений требований пожарной безопасности, которые были бы экономически целесообразны и обоснованы на уровне современных достижений науки и техники.

Пожарно-техническая экспертиза может проводиться в порядке осуществления функций ГПС при рассмотрении отдельных проектов в ГУГПС, УГПС, ОГПД МВД России, проектных и строительных организациях, у заказчика. В этом случае эксперт должен руководствоваться положениями и наставлениями ГПС, в которых область экспертизы и объем вопросов могут быть ограниченными, например:

рассмотрение проектов электрических распределительных устройств и электрических подстанций производится только в части соответствия противопожарных разрывов нормам проектирования, соблюдения нормативных требований, предъявляемых к встроенным электроподстанциям и распредустройствам, а также в части их противопожарной защиты;

принципиальные схемы электрических сетей предприятий и учреждений в целом органы госпожнадзора не рассматривают. Проекты внутренних электросетей рассматриваются в части соответствия типов и марок проводов (способов их прокладки); электродвигателей, светильников аппаратов, распределительных щитов классу пожаровзрывоопасности зоны характеру и свойствам окружающей среды, определяемым проектной организацией.

Пожарно-техническая экспертиза может проводиться по требованию судебных органов по делам о пожарах. В этом случае эксперт может (и должен!) давать заключение по любым вопросам, представленным на экспертизу.

При составлении заключения по результатам пожарно-технической экспертизы необходимо учитывать, что:

предлагаемые мероприятия излагаются кратко, четко, с обоснованием требований норм проектирования;

в заключении указываются требования по выполнению норм проектирования, а не способ их выполнения;

противопожарные мероприятия, предусмотренные нормами проектирования, излагаются с использованием слов «должно быть», «необходимо», «следует» и производных от них.

противопожарные мероприятия, не предусмотренные нормами проектирования, излагаются с использованием слов «рекомендуется», «целесообразно» - как это рекомендуется ПУЭ [1].

Глава 3

АППАРАТЫ ЗАЩИТЫ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Аппараты защиты предназначаются для защиты электрических сетей, машин и аппаратов от аварийных режимов (например, коротких замыканий, перегрузок), угрожающих сохранности электрооборудования и безопасности персонала. Однако при неправильном монтаже и эксплуатации они сами могут быть причиной аварии, пожара или взрыва, так как во время их работы возникают электрические искры, дуги и прочее.

Наиболее часто применяемыми аппаратами защиты являются плавкие предохранители, воздушные автоматические выключатели (автоматы), реле (в учебнике рассматриваются только тепловые реле, применяемые в магнитных пускателях) и устройства защитного отключения (УЗО).

3.1. ПЛАВКИЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

Принцип устройства и работы плавких предохранителей

Плавким предохранителем называется устройство, в котором при токе, превышающем допустимое значение, расплавляется плавкий элемент плавкой вставки и размыкается электрическая цепь. Плавкий предохранитель состоит из плавкой вставки, поддерживающего ее контактного устройства и патрона (корпуса). Основной частью плавкой вставки является плавкий элемент. Плавкая вставка подлежит замене после срабатывания предохранителя.

Многие предохранители имеют специальные устройства для гашения дуги, образующейся при расплавлении плавкого элемента вставки. Обычно плавкие вставки находятся внутри патрона, покрытого изоляционной оболочкой, армированного деталями для крепления вставки и подвода к ней тока. По конструкции плавких вставок предохранители бывают *разборными* и *неразборными.* Разборные допускают замену плавких элементов после срабатывания на месте эксплуатации без специального инструмента. У неразборных замене подлежит вся плавкая вставка.

Различают предохранители с *наполнителем*, у которых дуга гасится в порошковом, зернистом или волокнистом веществе (тальк, кварцевый песок и т.д.), и без *наполнителя*, у которых гашение дуги происходит благодаря высокому давлению в патроне или движению газов. Предохранители иногда имеют визуальный указатель срабатывания, позволяющий судить о расплавлении плавкого элемента вставки при срабатывании.

Действие плавких предохранителей основано на том, что электрический ток в плавкой вставке выделяет тепло. Тепловое действие тока, протекающего через предохранитель, характеризуется джоулевым интегралом $\int i^2 d\tau$. При нормальных условиях это тепло отводится в окружающую среду

путем излучения, конвекции и теплопроводности (главным образом через контакты). Если количество выделяющегося во вставке тепла больше отводимого, избыток тепла будет повышать температуру вставки до тех пор, пока снова не будет достигнут тепловой баланс при новой температуре или вставка расплавится (перегорит). Она может быть разорвана электродинамическими силами и до начала плавления. Плавкие предохранители характеризуются следующими параметрами.

Номинальное напряжение $U_{н.пр}$ – напряжение, указанное на предохранителе и соответствующее наибольшему номинальному напряжению сетей, в которых разрешается установка данного предохранителя. Так, предохранители типа ПР-2 первого габарита (меньших размеров) имеют маркировку 250 В и могут устанавливаться в сетях с номинальным напряжением до 250 В постоянного тока и до 380 В переменного тока. Предохранители ПР-2 второго габарита (больших размеров) имеют маркировку 500 В и могут устанавливаться в сетях напряжением 500 В и ниже (см. прил. 1).

Номинальный ток предохранителя $I_{н.пр}$ – ток, указанный на предохранителе и равный наибольшему из номинальных токов плавких вставок, предназначенных для данного предохранителя. На этот ток рассчитаны все токоведущие контактные части предохранителя.

Номинальный ток плавкой вставки $I_{н.вст}$ – ток, указанный на вставке, для которого она предназначена, при длительной работе. Номинальный ток предохранителя всегда должен быть больше или равен номинальному току плавкой вставки, т.е. $I_{н.пр} \geq I_{н.вст}$.

Пограничный ток плавкой вставки I_{∞} - ток, при котором вставка расплавится через промежуток времени, достаточный для достижения ею установившейся температуры. Это время обычно равно 1-2 ч. Ток I_{∞} больше $I_{н.вст}$.

Предельный ток отключения предохранителя $I_{пр.пр}$ – наибольшее значение тока КЗ сети, при котором гарантируется надежная работа предохранителей, т.е. дуга гасится без каких-либо повреждений патрона.

Защитная характеристика предохранителя

Предохранители обладают защитной, или времятоковой характеристикой (рис. 3.1). Она представляет собой зависимость времени полного отклонения $\tau_{откл}$ от отношения ожидаемого тока в цепи (тока КЗ или перегрузки I) к номинальному току плавкой вставки.

В полное время отключения входит время нагревания вставки повышенным током I, ее расплавление, появление дуги и гашение. Откладывая кратности тока по горизонтальной оси и время $\tau_{откл}$ по вертикальной, имеем кривую

$$\tau_{откл} = f\,(I/I_{н.вст}). \qquad (3.1)$$

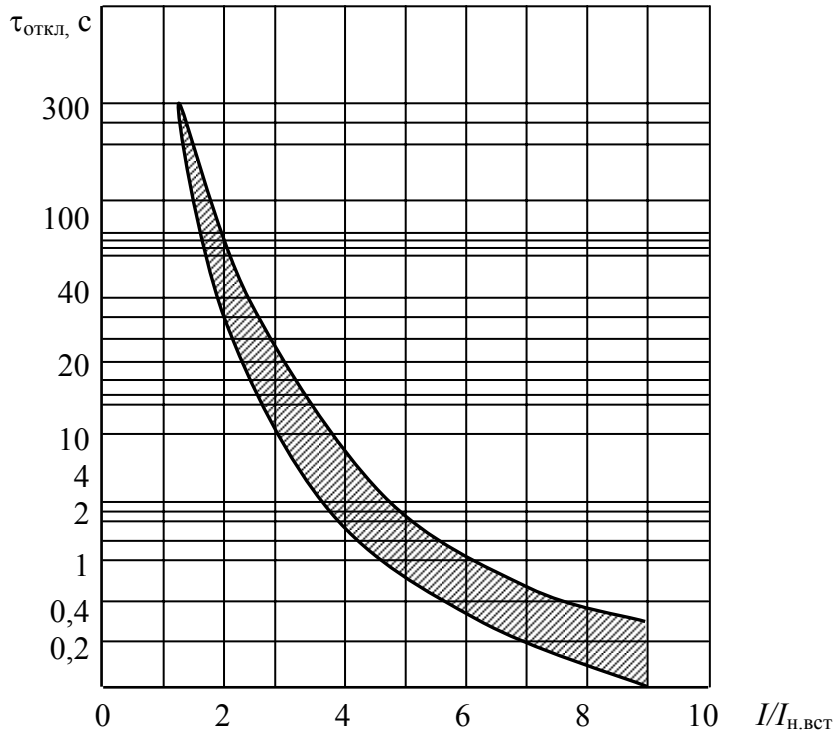


Рис. 3.1. Типовая защитная характеристика предохранителя ПН-2

Характеристика (см.рис. 3.1) является типовой, т.е. она относится не к одному предохранителю, а к серии подобных предохранителей на разные номинальные токи $I_{н.вст}$. Если требуется характеризовать каждую вставку отдельно, на горизонтальной оси откладывают не кратность тока нагрузки, а ток.

Характеристики отдельных предохранителей отклоняются от средних значений из-за производственных допусков в размере и составе плавких вставок, различного качества и количества контактов, а также старения материала вставок в процессе эксплуатации. Поэтому защитную характеристику изображают не линией, а в виде полосы (см. рис. 3.1), в пределах которой лежит возможное время отключения.

Обычно все характеристики предохранителей в связи с широким диапазоном изменения их параметров принято изображать в виде семейства графиков с логарифмическим масштабом для различных номинальных токов плавкой вставки.

Защитная характеристика позволяет определять надежность защиты элементов электроустановок плавкими предохранителями от токов перегрузки и КЗ. Для этого на совмещенном графике необходимо сопоставить защитную характеристику предохранителя и тепловую характеристику защищаемого элемента (провода, кабеля, электродвигателя и т.п.).

Тепловая характеристика элемента электрической установки изображается кривой и выражает зависимость промежутка времени, в

течение которого температура этого элемента станет предельно допустимой, от отношения фактического тока в нем $I_к$ номинальному току $I_н$, т.е.

$$\tau_{нагр} = f\,(I/I_н). \qquad (3.2)$$

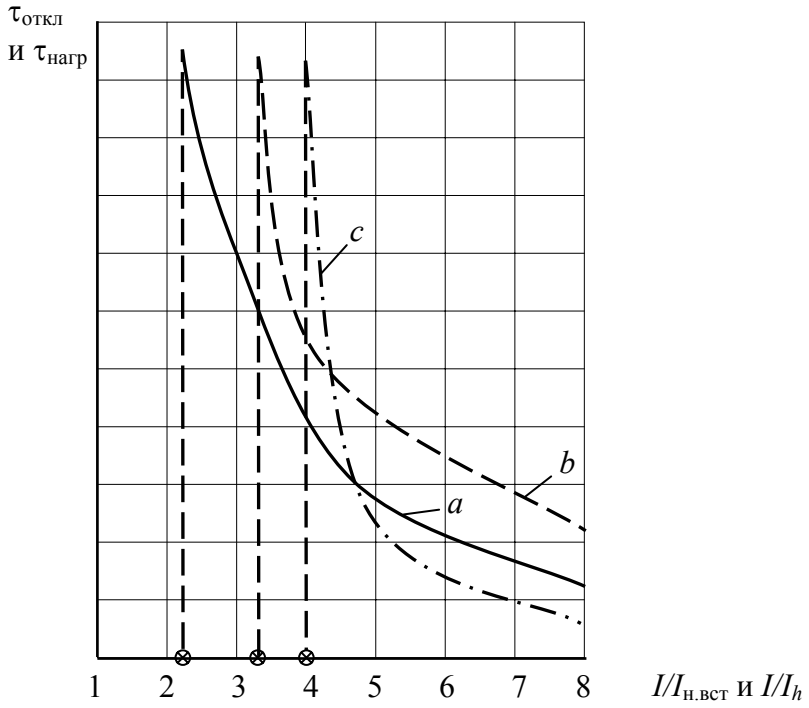


Рис. 3.2. Сопоставление защитных характеристик плавких вставок с тепловой характеристикой защищаемого элемента электроустановки:
a, c – защитные характеристики; *b* – тепловая характеристика

На рис. 3.2 сопоставлены защитные характеристики плавких вставок предохранителей и тепловая характеристика элемента электрической установки. Вставка с характеристикой *a* обеспечивает защиту элемента электроустановки с тепловой характеристикой *b* при любой кратности тока. Вставка с характеристикой *c* может обеспечивать защиту того же элемента только при значительных кратностях, в данном случае при кратности более четырех. При меньших кратностях температура защищаемого элемента может превысить предельно допустимую раньше, чем перегорит вставка, а элемент повредится. Поэтому для улучшения защитных характеристик плавких вставок, зависящих в основном от отношения $I_∞ /I_{н.вст}$, необходимо, чтобы это отношение было как можно меньше при малом времени отключения $\tau_{откл}$, т.е. характеристика должна быть пологой. Вместе с тем слишком малое отношение $I_∞ /I_{н.вст}$ явилось бы причиной ложных отключений при небольших перегрузках, часто возникающих при эксплуатации и не представляющих опасности для элемента. Такие отключения недопус-

тимы, так как нарушают нормальную работу технологических установок. Поэтому для плавких вставок принято отношение $I_{\infty}/I_{\text{н.вст}}$ от 1,25 до 2,0.

Таким образом, условием безопасности и надежности защиты элемента электроустановки предохранителем является соотношение

$$\tau_{\text{откл}} \leq \tau_{\text{нагр}}. \qquad (3.3)$$

Способы улучшения защитных характеристик предохранителей

Улучшить защитные характеристики можно выбором материала для плавкой вставки, применением вставок с так называемым металлургическим эффектом, выбором рациональной конструкции плавкой вставки, т.е. ее длины и формы.

Материал плавкой вставки. Плавкие вставки обычно изготовляют из меди, серебра, олова, свинца, цинка, алюминия и их сплавов. Материал очень влияет на защитную характеристику вставки. Экспериментально установлено, что вставки из легкоплавких металлов - олова, свинца, цинка и алюминия - более удобны для защиты элементов электроустановок от токов перегрузки, так как позволяют получить большую выдержку времени. Вставки из этих материалов обладают большим удельным электрическим сопротивлением и малой теплопроводностью. Однако масса вставки из этих металлов при одинаковом номинальном токе больше, чем масса вставки из меди или серебра. Это снижает разрывную способность предохранителя.

Вставки из меди и серебра дают меньшую выдержку времени при перегрузках, что ухудшает их защитные характеристики. Существенным недостатком таких вставок является сравнительно высокая температура их плавления (они тугоплавки). При длительном токе, меньшем, чем ток плавления, вставки могут нагреваться до температуры выше 900 ^{o}C. Столь высокий и длительный нагрев плавких вставок может привести к чрезмерному перегреву контактной системы и корпуса предохранителя, особенно закрытого, вызвать их разрушение. Однако применение медных и серебряных вставок повышает разрывную способность предохранителей, так как увеличивается предельный ток отключения $I_{\text{пр}}$.

Большая разрывная способность вставок из тугоплавкого металла явилась предпосылкой для применения плавких вставок с так называемым *металлургическим эффектом.* Для металлургического эффекта в середине вставки из тугоплавкого металла напаивают шарик из легкоплавкого металла (рис. 3.3). Физическая сущность металлургического эффекта заключается в растворении более тугоплавкого материала вставки (медь, серебро) в легкоплавких средах (олово, сплав олова с кадмием и др.), причем диффундирование меди или серебра повышается с увеличением темпера-

туры. Такая вставка имеет более благоприятную защитную характеристику от токов перегрузки и перегорает при меньшем значении отношения $I_{\infty}/I_{\text{н.вст}}$ и невысокой температуре (примерно в два-три раза меньше, чем температура плавления основного металла). Размер шарика (называемого также металлическим растворителем) влияет на работу вставки. При слишком малом шарике металлургический эффект мал, при слишком большом - отвод тепла от вставки в месте нахождения шарика настолько снижает температуру вставки, что шарик не плавится и металлургический эффект ослабляется. Оптимальный диаметр, например, оловянного шарика в центре медной проволоки диаметром от 0,25 до 0,6 мм составляет 1-2 мм.

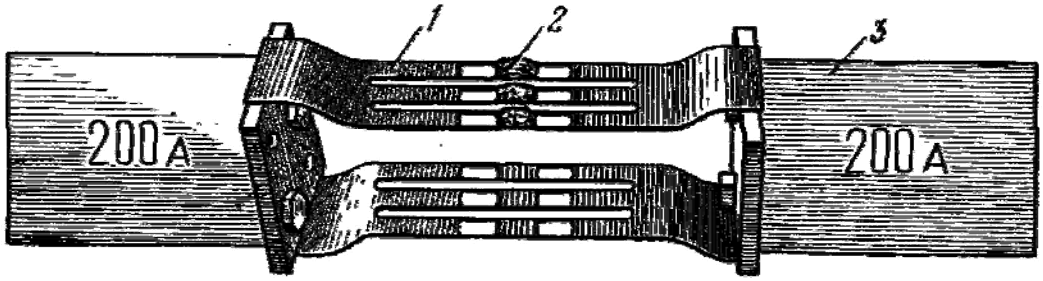


Рис. 3.3. Плавкая вставка (элемент) с металлургическим эффектом:
1 – медь; *2* – свинец или олово; *3* – наконечник (контакт)

С точки зрения *конструктивного исполнения* на защитную характеристику влияет главным образом длина и форма вставки. Увеличение длины повышает пограничный ток вставки. Для предохранителей напряжением от 120 до 500 В оптимальная активная длина вставки составляет 70 мм. При меньшей длине снижается разрывная способность предохранителя.

Для уменьшения объема расплавляемого металла и увеличения быстроты разрыва при КЗ для одного и того же пограничного тока I_{∞} вставки делают с несколькими параллельными ветвями, что увеличивает разрывную способность предохранителя и уменьшает время гашения дуги.

В некоторых типах предохранителей используются плавкие вставки, имеющие два-четыре коротких перешейка А-А (рис. 3.4). В этих перешейках повышаются электрическое сопротивление, плотность тока и выделяется больше тепла, чем в широких частях. В нормальных условиях это тепло отводится к менее нагретым частям вставки и контактным ножам предохранителя, с которых оно рассеивается в окружающую среду. При токах КЗ перешейки быстро нагреваются до температуры плавления металла, и плавкая вставка расплавляется во всех перешейках. При перегрузках вставка нагревается значительно медленнее, чем при токах КЗ, и благодаря лучшему охлаждению ее широких мест она рас-

плавляется обычно только в одном месте, чаще всего в средней части, например на линии А-А.

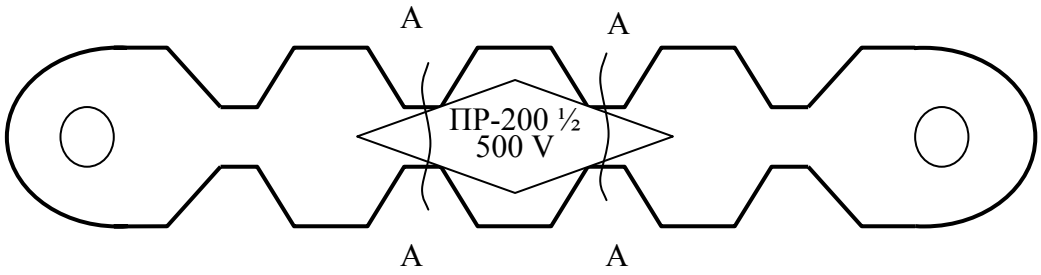


Рис. 3.4. Плавкая вставка (элемент) предохранителя типа ПР-2

При эксплуатации следует обратить внимание на недопустимость применения нестандартных, некалиброванных плавких вставок из медных или других проволок («жучков»). Пограничные и номинальные токи такой вставки и защитная характеристика предохранителя имеют крайне неопределенные значения. При таких вставках вероятны местные перегревы, порча и даже разрыв патронов (например, предохранителей типа ПР-2), резкое изменение коммутационной (разрывной) способности предохранителей. Все это может вызвать аварии и пожары.

Типы плавких предохранителей для установок напряжением до 1000 В

По конструкции предохранители могут быть разделены на следующие типы: открытые (или пластинчатые), трубчатые и однополюсные резьбовые (пробочные).

Открытые (пластинчатые) предохранители конструктивно просты и представляют собой открытую одиночную проволоку (или несколько параллельных проволок), впаянную в медные или латунные плоские наконечники. Они не имеют дугогасительных устройств и поэтому обладают малой разрывной способностью. При расплавлении вставки образуется открытая дуга, разбрызгивается расплавленный металл, распространяются раскаленные и ионизированные газы. Все это опасно для обслуживающего персонала, а также увеличивает возможность пожара, особенно в пожароопасных помещениях. Поэтому применение открытых предохранителей следует запрещать.

Трубчатые предохранители изготавливаются либо с закрытыми фибровыми трубками, либо с закрытыми стеклянными или фарфоровыми трубками, заполняемыми мелкозернистым песком. Предохранители с закрытыми фибровыми трубками типа ПР-2 (рис. 3.5) используются в установках постоянного и переменного тока напряжением 220 В (короткие) и 500 В (длинные), рассчитаны на номинальные токи от 6 до 1000 А. Эти предохра-

нители устанавливают в различные распределительные устройства (щиты, шкафы, ящики). Они допускают присоединение не только медных, но и алюминиевых проводов, кабелей или шин. При перегорании плавкой вставки и появлении дуги фибровая трубка обгорает. Выделяемые при этом теплоемкие газы деионизируют дугу и создают в патроне высокое давление, пропорциональное энергии, выделяющейся в дуге, и обратно пропорциональное внутреннему объему патрона. При больших токах КЗ оно достигает 150 кПа и способствует быстрому и интенсивному гашению дуги.

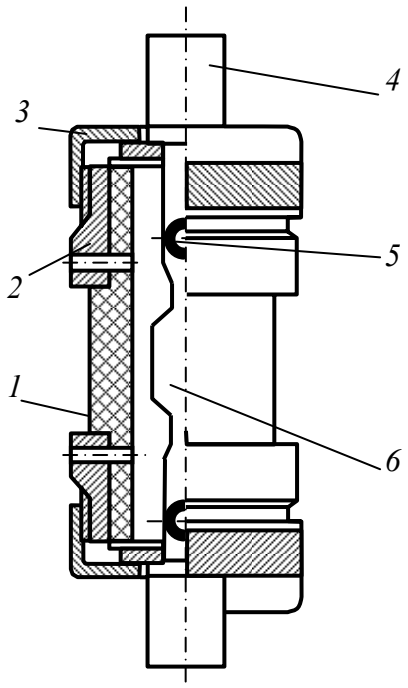


Рис. 3.5. Предохранитель трубчатый ПР-2:
1 – фибровая трубка; *2* – латунная втулка; *3* – латунный колпак; *4* – контактные ножи; *5* – болты; *6* – цинковая плавкая вставка (элемент)

При отключении тока КЗ благодаря энергичной деионизации дуги в закрытом патроне сопротивление ее настолько быстро и значительно увеличивается, что ток КЗ в цепи вынужденно уменьшается до нуля раньше, чем в цепи переменного тока он достигает ударного значения, а в цепи постоянного тока - установившегося значения. Так, в цепи с действующим током КЗ, равным 50 000 А, предохранитель с плавкой вставкой на 6 А произведет отключение при токе всего лишь 400 А. Такие предохранители называют токоограничивающими. Их предельная разрывная способность достаточно велика и характеризуется данными табл. 1 прил. 1.

В предохранителях типа ПР-2 следует использовать только цинковые плавкие вставки, так как температура внутри трубки не должна быть выше температуры плавления цинка (400 ^{o}C). Эти предохранители обладают рядом недостатков: их разрывная способность мала для современных промышленных установок, защитная характеристика нестабильна, так как со-

противление контакта вставки с ножами патрона зависит от степени затяжки болтов. Предохранители велики по размерам, недостаточно надежны (прогорают фибровые корпуса) и дорогостоящи.

В предохранителях с мелкозернистым наполнителем плавкие вставки помещены в закрытые трубки, заполненные мелкозернистым изоляционным наполнителем (обычно кварцевым песком). Раскаленные и ионизированные газы, образующиеся после испарения плавкой вставки, проникая в промежутки между зернами наполнителя и соприкасаясь с поверхностью последних, деионизируются. Капельки металла, разбрызгиваясь в стороны и проникая в глубь наполнителя, конденсируются на его поверхности. Зерна наполнителя хорошо поглощают тепло, охлаждают газы и тем самым резко снижают давление в патроне в момент испарения вставки. Кроме того, для предупреждения перегрева патрона при длительной перегрузке вставки, не сопровождающейся ее расплавлением, используют металлургический эффект.

Кварцевые предохранители являются также токоограничивающими. Время гашения в таком предохранителе настолько мало, что ток не успевает достичь того наибольшего значения, которого достиг бы при КЗ в установке без предохранителей. Например, предохранители типа ПН-2-100 пропускают ток КЗ, не превышающий 5 кА. В то же время предельная отключающая способность предохранителя достигает 50 кА. К группе предохранителей с мелкозернистым наполнителем относятся предохранители типов: НПН, ПН-2, ПНБ5, ППЗ1, ПП24, ПП17, ПТ23, ПТ26, ПР23, ПР26 и др. В новой серии предохранителей все токоведущие части выполняются из алюминия и его сплавов.

Для защиты автоматических воздушных выключателей, магнитных пускателей и контакторов при больших токах КЗ, превышающих их отключающую способность, освоена новая серия предохранителей ПП26 на токи от 25 А с номинальным напряжением 400 В. Для этих предохранителей характерно повышенное время плавления плавкого элемента при токах 6-10 $I_{н.вст}$ и быстрое срабатывание при токах КЗ. Поскольку эти предохранители применяются с автоматическими воздушными выключателями или тепловыми реле, они названы *сопутствующими.* Такие предохранители не могут быть использованы для отключения малых токовых перегрузок.

На рис. 3.6 показан предохранитель типа ПН-2-400. Патрон предохранителя, заполненный сухим кварцевым песком, состоит из двух контактных ножей *1*; квадратной фарфоровой трубки *2* с круглым отверстием в центре; двух металлических крышек *3*, прикрепленных винтами к торцам трубки; плавких вставок *4*, укрепленных на ножах. Плавкие вставки штампуют из тонкой медной ленты. На средней части пластин вставки напаяно олово *5* (растворитель). В этих местах пластины расплавляются при токах перегрузки. При КЗ пластины вставки расплавляются в местах *6*.

Контактные ножи патрона врубаются в штампованные медные стойки *7*, укрепленные на изоляционной плите *8*. Зажимы *9* служат для присоединения шин или проводов. Предохранители этой серии в зависимости от типа исполнения могут иметь указатели срабатывания и свободный контакт.

Благодаря большой отключающей способности предохранители ПН-2 даже с небольшим номинальным током могут быть использованы для защиты ответвлений в мощных электрических системах. По сравнению с другими предохранителями отечественного производства они более надежны, имеют наиболее устойчивую защитную характеристику, меньшие размеры и стоимость. Так как при расплавлении вставки пламя и ионизированные газы не выбрасываются из предохранителей, это весьма упрощает их установку в распределительных устройствах, повышает пожарную безопасность и безопасность обслуживания.

Однополюсные резьбовые (пробочные) предохранители типов Ц-27, Ц-33, ПРС, ПД, ПДС и другие применяются в тех случаях, когда требуется очень малые габариты распределительных устройств. Предохранители Ц-27 и Ц-33 отличаются только диаметром резьбы.

Предохранители ПД и ПДС по сравнению с предохранителями Ц-27 (600 А) и Ц-33 (1000 А) обладают более высокой разрывной способностью (от 2000 до 15 000 А). Это достигается заполнением внутренней части корпуса пробки кварцевым песком, облегчающим гашение дуги. Предохранители ПД и ПДС предназначены для непосредственной установки на токоведущие шины распределительных устройств.

Предохранитель ПП24-25 – предохранитель плавкий пробочный; 24 - номер серии; 25 - номинальный ток предохранителя. Предназначен для защиты электрооборудования промышленных установок и электрических сетей с номинальным напряжением до 660 В переменного тока и 440 В постоянного тока. Состоит из изоляционного основания с контактами в сборе; неразборной плавкой вставки с указателем срабатывания; головки (держатель плавкой вставки) с резьбовым контактом в сборе. Плавкая вставка с керамическим корпусом и серебряным плавким элементом заполнена кварцевым песком. Предохранитель имеет контрольное устройство, препятствующее установке плавкой вставки на больший номинальный ток.

Предохранитель ПП17 – предохранитель плавкий, 17 - номер серии, номинальное напряжение 380 В, номинальный ток предохранителя 1000 А. Предназначен для защиты электрооборудования промышленных установок и электрических сетей трехфазного переменного тока. Состоит из контактов основания с крепежными деталями, плавкой вставки, помещенной в керамический корпус, заполненный кварцевым песком, указателя срабатывания и свободного контакта.

При расплавлении плавкой вставки предохранителя перегорает плавкая вставка указателя срабатывания, освобождая взведенный при сборке указателя боек, который переключает свободный контакт.

Предохранители ПТ23, ПТ26 (предохранители трубчатые) и ПР23, ПР26 (предохранители-разъединители) имеют плавкие вставки типа ВТФМ (В - вставка; Т - трубчатая; Ф - фарфоровая; М - модернизированная). Являются токоограничивающими с коэффициентом токоограничения 0,3 - 0,4.

Предохранители ПТ состоят из фенопластового основания, на котором неподвижно закреплены контактные стойки с крепежными узлами для присоединения внешних проводников. В контактные стойки входят плавкие вставки трубчатой формы, корпус которых изготовлен из фарфора (вставки типа ВТФМ).

Предохранители-разъединители ПР состоят из следующих основных частей: корпуса из двух половин, между которыми расположены плавкие вставки ВТФМ на неподвижно зафиксированных контактах предохранителя с крепежными элементами для подсоединения проводников; скобы-стяжки для крепления обеих половин корпуса; защелки для установки разъединителя. Рукоятка устанавливается подвижно между двумя половинами корпуса. Включение и отключение разъединителя осуществляется поворотом рукоятки. Предохранители имеют исполнения с сигнализацией о срабатывании предохранителя и без сигнализации.

В исполнениях с сигнализацией панель сигнализации расположена в рукоятке и состоит из индуктора единичного типа АЛ 37 В, диода кремниевого КД 521 В, резистора МЛТ-0,25-100 кОм. Контакты панели сигнализации соединены параллельно с элементом плавкой вставки, и индуктор при ее перегорании начинает светиться.

Предохранители ПР и ПТ могут устанавливаться в комплектные распределительные устройства.

Большая группа плавких предохранителей серий: ПП38, ПП40, ПП50, ПП60С, ПП60М, ППА и др. с неразборными плавкими вставками предназначены для защиты полупроводниковых тиристорных приводов, выпрямителей, выпрямителей для электролиза, преобразователей различного назначения, требующих малого времени отключения при коротких замыканиях в цепях переменного или пульсирующего тока частотой 50 и 60 Гц и в цепях постоянного тока.

Технические данные некоторых типов и серий плавких предохранителей приводятся в табл. 1 прил. 1.

3.2. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ (АВТОМАТЫ)

Для более надежной защиты электрических сетей от токов перегрузки и КЗ применяются автоматические выключатели, которые одновременно могут служить для нечастых коммутаций электрических сетей. Поэтому их

следует широко использовать в электроустановках пожаро- и взрывоопасных производств.

Автоматы различают по их быстродействию. Ниже рассматриваются только *небыстродействующие* автоматы, получившие большое распространение на промышленных предприятиях, у которых собственное время отключения не менее 10 мс.

Устройство и принцип работы небыстродействующих автоматов

Автомат состоит из корпуса, подвижных и неподвижных контактов, дугогасительных камер, механизма управления, механизма свободного расцепления и расцепителя.

Корпус автомата выполнен из пластмассы, фарфора или стали и состоит из основания, на котором непосредственно монтируют части автомата и крышки. Корпус закрывает все части, обеспечивая безопасность персонала при срабатывании автомата и его обслуживании.

У многих автоматов контакты каждого полюса заключены в дугогасительную камеру, где дуга гасится дроблением и деионизацией ее в щелях между поперечными металлическими пластинками.

Механизм управления обеспечивает моментное замыкание и размыкание контактов с постоянной скоростью, не зависящей от скорости движения кнопки или рычага. Он может представлять собой рычаг с рукояткой или кнопку включения и отключения, по положению которых определяется коммутационное положение контактов автомата.

Основным узлом, обеспечивающим автоматическое срабатывание автомата при ненормальном режиме, является расцепитель. В автоматах наиболее часто используются расцепители максимального тока, которые срабатывают при токе, превышающем ток уставки. В зависимости от встраиваемых расцепителей максимального тока автоматы изготовляются с электромагнитным расцепителем М, тепловым расцепителем Т и комбинированным расцепителем МТ (т.е. электромагнитным и тепловым).

На рис. 3.7 представлены автоматы с электромагнитным расцепителем. Во включенном положении автомат удерживает защелка *4*, сцепленная с рычагом *3* рукоятки *10*. Пружина *7* обеспечивает надежность этого сцепления. При нормальном токе якорь *8* защелки *4* стремится притянуть к сердечнику электромагнита *9*, но этому препятствует пружина. Когда ток в защищаемой цепи превышает установленное значение (например, при КЗ), якорь *8* притягивается к сердечнику, защелка поворачивается на оси *5* и освобождает рычаг *3*. После этого под действием отключающей пружины *2* и собственного веса подвижного контакта *1* автомат отключается. Положение защелки при отключенном автомате определяется упором якоря *6*.

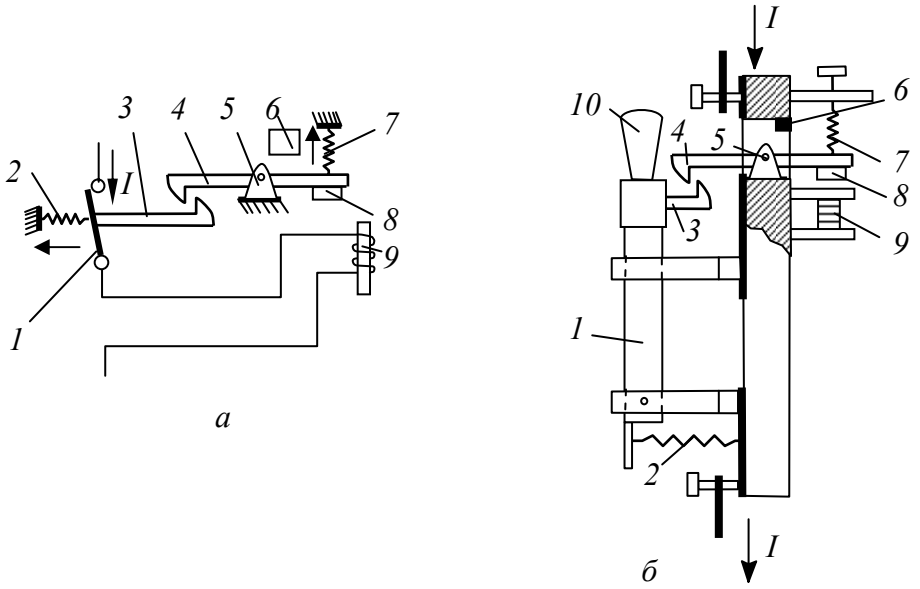


Рис. 3.7. Принципиальная схема однополюсного автомата с электромагнитным расцепителем максимального тока без выдержки времени:
а – электрическая схема: *б* – монтажная схема; *1* – подвижный контакт; *2* – отключающая пружина; *3* – рычаг; *4* – защелка; *5* – ось; *6* – упор якоря; *7* - пружина сцепления; *8* – якорь; *9* – электромагнит; *10* - рукоятка

В электросиловых установках часто возникают кратковременные повышенные токи, не опасные для установки (например, пусковые токи электродвигателей). Чтобы избежать отключения цепи при таких токах, расцепитель максимального тока устанавливают на ток срабатывания, который превышает значение кратковременных больших токов. При этом автомат перестает защищать электрооборудование от всех перегрузок, не превышающих ток срабатывания.

Большинство автоматов имеют расцепители максимального тока без выдержки времени и мгновенно отключаются. Некоторые автоматы снабжаются расцепителем максимального тока с выдержкой времени, т.е. приспособлением, которое создает определенный промежуток времени между воздействием тока на автомат и моментом отключения цепи. Для выдержки времени используются часовой механизм, масляный или воздушный тормоз, электромагнитные замедлители и т.д. У таких автоматов сердечник электромагнита вернется в исходное положение, если толчок тока закончится прежде, чем механизм выдержки времени позволит освободить защелку. Существенным недостатком автомата, представленного на рис. 3.7, является отсутствие *механизма свободного расцепления*, автоматически отключающего автомат при КЗ и в том случае, когда по каким-либо причинам подвижный его контакт *1* долгое время удерживается рукой во вклю-

ченном положении. Этот механизм выполняют в виде системы ломающихся рычагов. Автоматы без механизмов свободного расцепления недостаточно надежны и небезопасны при обслуживании. Применение автоматов без механизма свободного расцепления для защиты электроустановок пожаровзрывоопасных производств недопустимо.

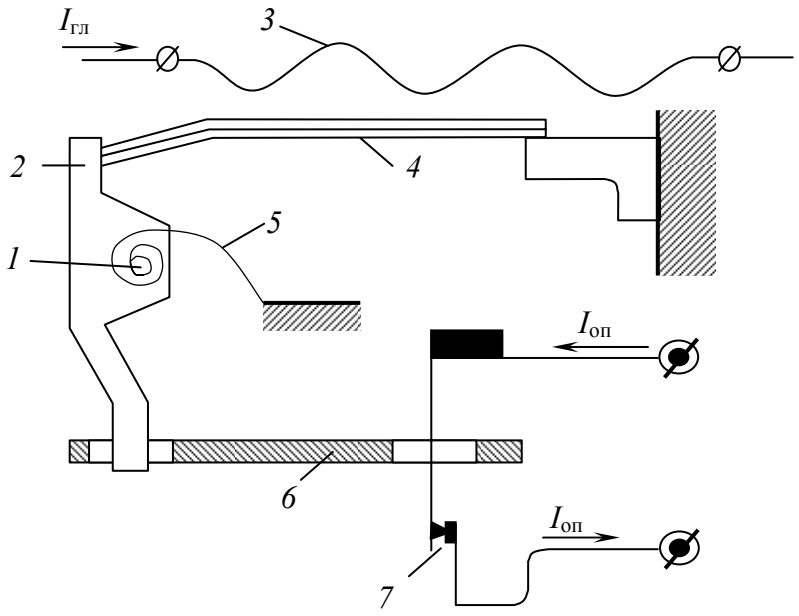


Рис. 3.8. Схема теплового расцепителя максимального тока косвенного действия:
1 – ось; *2* – защелка; *3* – нагревательный элемент; *4* – биметаллический элемент; *5* – пружина; *6* – тяга; *7* – контакты

На рис. 3.8 представлены автоматы с тепловым расцепителем. Такой расцепитель действует при помощи биметаллического элемента *4*, который представляет собой две механически связанные пластины из металлов с различными температурными коэффициентами расширения. Тепло, выделяемое нагревательным элементом *3*, включенным в цепь главного тока $I_{гл}$ (защищаемую цепь), воздействует на биметаллический элемент. При перегрузке цепи главного тока обе пластины биметаллического элемента, нагреваясь, значительно, но неодинаково удлиняются, вследствие чего биметаллический элемент изгибается вверх и выходит из зацепления с защелкой *2*. Последняя под действием пружины *5* поворачивается вокруг оси *1* по часовой стрелке и изоляционной тягой *6* размыкает контакты *7*, прерывая цепь оперативного тока $I_{оп}$. Это соответствует нажатию кнопки «Стоп» в схеме магнитного пускателя. Часто в автоматах с тепловым расцепителем нагревательный элемент отсутствует, и ток протекает по биметаллическому элементу. После срабатывания тепловой расцепитель должен остыть, и только потом автомат может быть включен вновь.

Для тепловых расцепителей характерно: чем больше ток, тем быстрее нарастает температура биметаллического элемента, тем быстрее он изгибается и производит отключение. Поэтому автоматы с тепловыми расцепителями защищают от перегрузок с обратнозависимой от тока выдержкой времени.

В автоматах с комбинированным расцепителем при относительно небольших токах перегрузки действует тепловой расцепитель с выдержкой времени. При токах КЗ выше определенной величины срабатывает электромагнитный расцепитель мгновенного действия (дает отсечку) до того, как биметаллическая пластина успеет нагреться и изогнуться.

Таким образом, отключение автомата при срабатывании любого расцепителя происходит вследствие воздействия на механизм свободного расцепителя. При этом нарушается связь между механизмом управления и контактами, и они переходят в отключенное положение под действием отключающих пружин независимо от положения механизма управления.

Как уже отмечалось, одной из важнейших характеристик аппаратов защиты является их быстродействие. Этот параметр особо важное значение имеет в случаях, когда нагрузкой электрических сетей являются полупроводниковые преобразователи, выпрямители и другие устройства на основе полупроводниковых элементов: транзисторов, тиристоров, симисторов.

Одним из недостатков полупроводниковых преобразователей, как и других полупроводниковых устройств, является *их низкая перегрузочная способность* по току. Это выдвигает новые специфические требования к аппаратам защиты по токовой защите полупроводниковых устройств, которыми не обладают автоматы с электромагнитными расцепителями и многие типы плавких предохранителей.

Указанным требованиям отвечают автоматические выключатели с полупроводниковыми расцепителями на базе силовых полупроводниковых элементов (см. п. 5.5, рис. 5.12 и 5.13).

В конструкции автоматических выключателей с полупроводниковыми расцепителями эффективно сочетаются функции защиты и управления. Они обладают большим быстродействием и высокой селективностью защиты. Кроме того, они имеют высокую износостойкость, большой срок службы и высокую надежность работы. Полное время включения не превосходит 30 мкс, а отключения 0,01 с.

Блок-схема полупроводникового расцепителя переменного тока селективного исполнения представлена на рис. 3.9. С измерительных элементов *1* (трансформатор тока), установленных в каждом полюсе выключателя, сигналы, пропорциональные току в защищаемой сети, поступают на схему выделения наибольшего сигнала *2*, откуда последний поступает на входы блоков перегрузки и короткого замыкания (КЗ). Блок питания *10*

обеспечивает питание схемы полупроводникового расцепителя и обмотки независимого расцепителя.

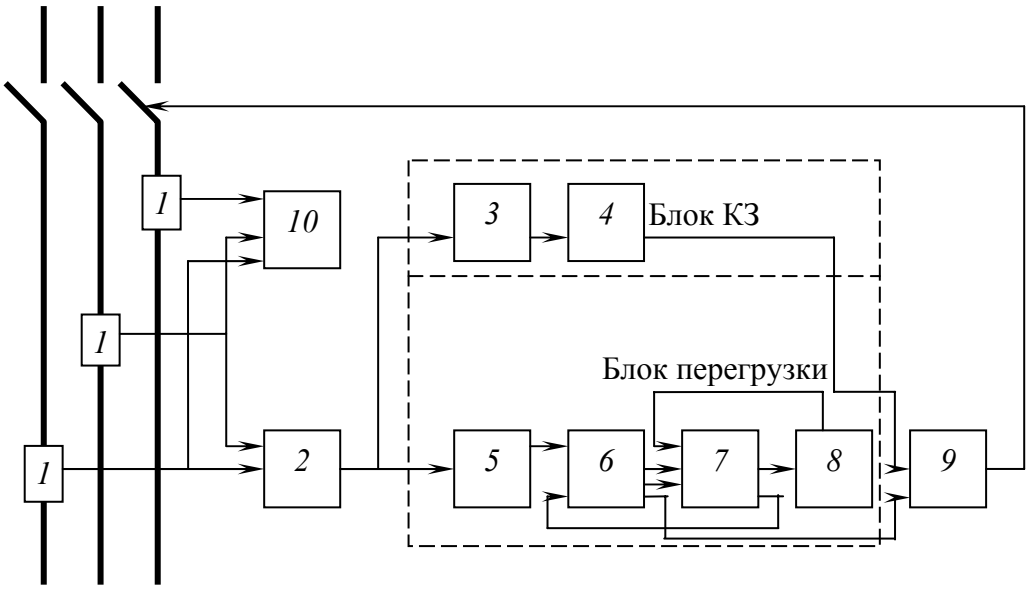


Рис. 3.9. Блок-схема полупроводникового расцепителя переменного тока селективного исполнения

Блок перегрузки включает реле перегрузки *5* и элемент временной задержки (с обратнозависимой от тока характеристикой), построенный на основе релаксационного генератора *8* и магнитного накопительного счетчика *7*.

Блок КЗ состоит из реле короткого замыкания *3* и элемента временной задержки *4* с независимой от тока характеристикой срабатывания. Величина временной задержки определяется уставкой тока короткого замыкания, которая не регулируется при эксплуатации.

Выходные сигналы блоков перегрузки и короткого замыкания поступают на схему формирователя выходного сигнала *9* и далее на вход независимого расцепителя, который воздействует на механизм управления автоматического выключателя.

При возникновении в сети тока КЗ, превышающего соответствующую уставку, срабатывает реле короткого замыкания *3* и выходной сигнал реле через элемент задержки *4* поступает на вход формирователя *9*.

При возникновении в сети тока перегрузки, превышающего заданную уставку, срабатывает реле перегрузки *5*, выполненное на основе компаратора. Сигнал, генерируемый компаратором, через схему распределения сигналов *6* поступает сначала на вход «сброс» накопительного счетчика *7*, а затем на вход «запись» того же счетчика. Импульсы на счетчик поступают с выхода генератора *8*. Сигнал переполнения счетчика через элемент *6* поступает на схему формирователя сигнала *9*.

Автоматы характеризуются следующими параметрами:

Номинальное напряжение $U_{н.а}$ - напряжение, соответствующее наибольшему номинальному напряжению сетей, в которых разрешается применять данный автомат.

Номинальный ток $I_{н.а}$ - наибольший ток, на который рассчитаны токоведущие и контактные части автомата, равный наибольшему из номинальных токов расцепителя.

Номинальный ток расцепителя ($I_{н.эл.м}$, $I_{н.тепл}$ или $I_{н.комб}$) - наибольший ток, на который рассчитан расцепитель автомата для длительной работы. При этом расцепитель не срабатывает.

Номинальный ток уставки теплового расцепителя - ток, на который отрегулирован тепловой расцепитель. При этом расцепитель не срабатывает. Например:

для автоматов с регулировкой тока уставки

$$I_{н.уст.тепл} = (0{,}6\text{-}1)\, I_{н.тепл}; \qquad (3.4)$$

для автоматов без регулировки тока уставки

$$I_{н.уст.тепл} = I_{н.тепл}. \qquad (3.4а)$$

Ток срабатывания (уставки) расцепителя $I_{ср.эл.м}$, $I_{ср.тепл}$ - наименьший ток, при котором срабатывает расцепитель автомата, например:

для автоматов с электромагнитным или комбинированным расцепителем

$$I_{ср.эл.м} = (7\text{-}15)\, I_{н.эл.м}; \qquad (3.5)$$

для автоматов с тепловым расцепителем без регулировки тока уставки

$$I_{ср.тепл} = (1{,}25\text{-}1{,}45)\, I_{н.тепл}; \qquad (3.5а)$$

для автоматов с тепловым расцепителем с регулировкой тока уставки

$$I_{ср.\ тепл} = (1{,}25\text{-}1{,}33)\, I_{н.уст.тепл}. \qquad (3.5б)$$

Предельный ток отключения при данном напряжении $I_{пр.а}$ - наибольшее значение тока КЗ сети, при котором гарантируется надежная работа автомата.

Номинальные параметры автоматов приведены в каталогах или указаны на заводских табличках (щитках) автоматов.

Защитные характеристики автоматов

Полное время отключения цепи автоматом определяется по формуле

$$\tau_{откл} = \tau_{с} + \tau_{д}, \qquad (3.6)$$

где $\tau_{с}$ - собственное время отключения (например, для тепловых расцепителей $\tau_{с} = \tau_{н} + \tau_{р}$. Здесь $\tau_{н}$ - время, необходимое для нагревания биметалла

до температуры срабатывания; $\tau_р$ - время, необходимое для расцепления механизма); $\tau_д$ - время горения дуги.

Зависимость полного времени отключения $\tau_{откл}$ тока автоматом изображают графически защитной, или времятоковой, характеристикой (рис. 3.10).

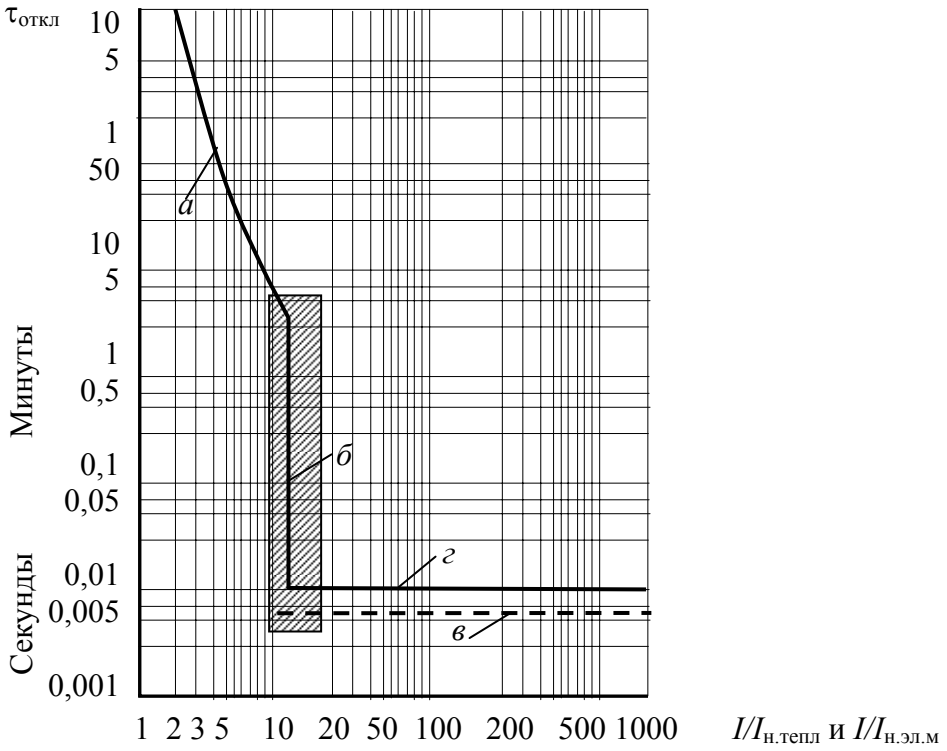


Рис. 3.10. Защитная характеристика автомата А3120 с комбинированным расцепителем

Защитная характеристика автомата определяет зависимость полного времени отключения цепи от отношения тока в расцепителе к номинальному току расцепителя:

$$\tau_{откл} = f(I/I_{н.тепл/н.эл.м}). \qquad (3.7)$$

На рис. 3.10 линия *а* определяет зависимость времени отключения от кратности тока перегрузки, отключаемого под воздействием тепловых расцепителей; линия *б* - номинальную кратность тока, при которой уже начинает действовать электромагнитный расцепитель практически без выдержки времени. Фактически эта кратность может оказаться любой в пределах зоны, заштрихованной по обе стороны линии *б*. Линия *в* - время от начала КЗ до момента удара якоря электромагнитного расцепителя по отключающей рейке, после чего автомат отключается независимо от того, продолжается КЗ или нет. Линия *г* обозначает время полного отключения $\tau_{откл}$ автоматом тока КЗ под действием электромагнитных расцепителей.

Защитная характеристика автомата типа АБ-25М с тепловым расцепителем показана на рис. 3.11. Поскольку в действительности наблюдаются существенные отклонения от средних значений характеристик, вызванные производственными и эксплуатационными факторами (допуск на качество материала термоэлементов и контактов, различное старение элементов защиты и т.п.), времятоковую характеристику изображают не одной линией, а полосой между двумя, в пределах которой лежит возможное время отключения.

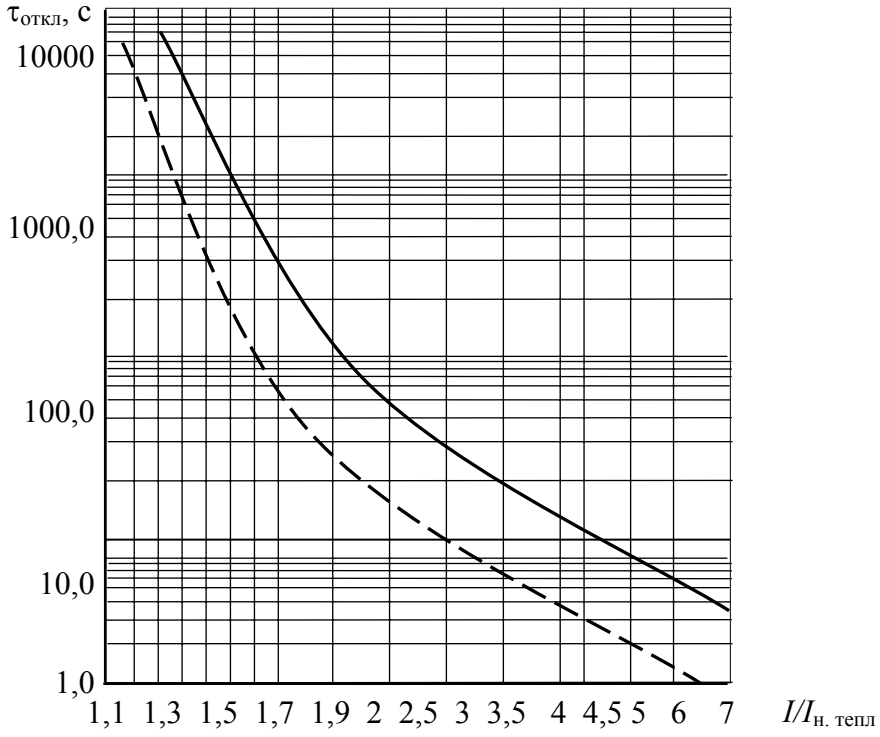


Рис. 3.11. Защитная характеристика автомата АБ-25М

Защитная характеристика автомата позволяет определить надежность защиты элементов электроустановок от токов перегрузок и токов КЗ. Для этого, так же как и при защите предохранителями, необходимо сопоставить защитную характеристику автомата с характеристикой допустимой перегрузки защищаемого элемента, т.е. с его тепловой характеристикой. Между этими характеристиками должно быть соответствие, чтобы при отключении тока, например из-за перегрузки, температура защищаемого элемента была близка к предельно допустимой.

Условием безопасности и надежности защиты элемента электроустановки автоматом будет являться выражение (3.3).

Типы установочных автоматов

Чаще всего используются установочные автоматы типов: А3100, А4100, А3700, ВА, АП-50, АК-63, АБ-25М, А-63, АЕ-20, АЕ-1000,

АЕ-2000 и др. Они не рассчитаны для работы в средах, насыщенных токопроводящей пылью или содержащих едкие пары или газы в концентрациях, разрушающих металлы и изоляцию, во взрывоопасных средах, а также в местах, не защищенных от попадания воды. Автоматы эти не рассчитаны для работы в местах, подверженных ударам и вибрации.

Автоматы типа А3100 изготовляются на номинальные токи от 50 до 600 А для сетей переменного тока напряжением до 500 В и для сетей постоянного тока напряжением 110-220 В. Они могут быть одно-, двух- и трехполюсными со встраиваемым расцепителем максимального тока, т.е. тепловым, электромагнитным и комбинированным расцепителями (см. табл. 2 прил. 1).

Автоматы типа А3160 выпускают только с тепловыми расцепителями на номинальные токи 15,20,25,30,40 и 50 А; все остальные автоматы (А3110, А3120,А3130 и А3140) - с электромагнитными или с комбинированными расцепителями. При возникновении в какой-либо фазе перегрузки или КЗ срабатывают тепловой или электромагнитный расцепители данного полюса, поворачивая общую для всех полюсов отключающую рейку. Все фазы автомата размыкаются одновременно. Расцепители автоматов этого типа не рассчитаны на регулировку тока уставки при эксплуатации, что является их особенностью. Такая регулировка производится в заводских условиях.

Автоматы типа А4100. Для обеспечения селективного отключения автоматических выключателей при последовательном их включении в случае возникновения токов короткого замыкания разработана и внедрена серия двухполюсных и трехполюсных автоматов А4100 на токи 160, 250, 400, 630 А, 440 В переменного тока и 220 В постоянного напряжения. Автоматы серии А4100 по внешнему виду и способу управления (рукояткой) похожи на серию А3100. Двухполюсные автоматы выполнены в габаритах трехполюсных. Автоматы рассчитаны на работу при температуре от -5 до +40 ^{o}С. Для обеспечения выдержки времени в автоматах серии А4100 применяются расцепители с воздушными замедлителями.

Автоматические воздушные выключатели (автоматы) серии А3700 превосходят автоматы серий А3100 и А4100 по ряду показателей: меньшие габаритные размеры в 2,2 - 8,8 раза; меньшая масса в 2,3 -9,5 раза; большая (в 1,6 раза) износоустойчивость; возможность эксплуатации в цепях 660 В переменного тока и 440 В постоянного тока, по сравнению с 500 и 220 В для серий А3100 и А4100.

Конструкция выключателей серии А3700 является блочной. Большим преимуществом их является то, что как полупроводниковые, так и тепловые расцепители максимального тока являются *сменными* блоками.

Выключатели А3700 предназначены: для максимальной токовой защиты электрических установок при перегрузках и КЗ; для нечастых (до 3

включений в час) оперативных коммутаций цепей, а также при снижении напряжения до недопустимого значения. Кроме того, выключатели этой серии обеспечивают возможность дистанционного отключения цепи при подачи сигнала (напряжения) от внешнего устройства. В выключатели могут монтироваться вспомогательные контакты (замыкающий и размыкающий), которые служат для переключений в цепях блокировки, управления и сигнализации в зависимости от коммутационного положения выключателя.

Выключатель серии А3700 состоит из: корпуса, контактной системы, механизма управления, расцепителей, дугогасительных камер. Расцепители могут быть: тепловыми, электромагнитными, минимальными, независимыми и полупроводниковыми.

Расцепитель *независимый* представляет собой электромагнит, кинематически связанный с механизмом управления. На независимый расцепитель поступает сигнал от внешних устройств или от полупроводникового расцепителя, который воздействует на механизм расцепления.

Минимальный расцепитель напряжения обеспечивает отключение включенного автомата без выдержки времени при напряжении на катушке $\leq 0{,}7\ U_{ном}$ при переменном токе. Минимальные расцепители изготовляются на напряжения от 127 до 660 В однофазного переменного тока.

По роду защиты выключатели могут обеспечивать *селективную* защиту (с регулируемым временем срабатывания в зоне токов КЗ) и могут быть *токоограничивающими.*

Максимальная защита токоограничивающих выключателей обеспечивается полупроводниковыми и электромагнитными расцепителями, а селективных - только полупроводниковыми расцепителями.

Выключатели с полупроводниковыми расцепителями допускают регулировку следующих параметров: номинального рабочего тока расцепителя, уставки по току срабатывания в зоне КЗ, уставки по времени срабатывания в зоне токов перегрузки.

Уставки расцепителей максимального тока:

полупроводникового - по току КЗ - 2,3,5,7 и 10 $I_н$; по току перегрузки - 1,25$I_н$; по времени срабатывания от токов КЗ от 0,1 до 0,4 с; по времени срабатывания от токов перегрузки - 4, 8,16 с.

электромагнитного - то току КЗ – 10$I_н$ (4$I_н$ только А3710); *теплового* в зоне перегрузки - от 1,12 до 1,16$I_н$.

Технические характеристики (параметры) выключателей А3700 (на примере А3713Б) приведены в табл. 3 прил.1.

Автоматические выключатели серии ВА являются новейшей серией и в их устройство входят те же функциональные части, что и в выключатели серии А3700. Отличием этой серии выключателей является расширение функциональных возможностей и значений номинального тока по сравнению с А3700.

Выключатели серии ВА применяются: для защиты электрических цепей от токов перегрузки, коротких замыканий, оперативного отключения и включения осветительных (например, ВА16) и силовых сетей; для прямых нечастых пусков и отключений асинхронных электродвигателей (ВА14, ВА51 и др.), а также при недопустимом снижении напряжения (ВА51, ВА52).

Выключатели ВА12-ВА51 применяются для токов, не превышающих 630 А, и комплектуются электромагнитными и тепловыми расцепителями. У них имеется регулировка тока уставки теплового расцепителя. В выключателях на номинальные токи свыше 630 А (ВА53, ВА81) для защиты от максимальных токов используются полупроводниковые расцепители.

Технические характеристики выключателей ВА приведены в табл. 5 прил.1.

Автоматы типа АП-50 выпускают в двух- и трехполюсном исполнении с комбинированными (АП-50-2МТ, АП-50-3МТ), электромагнитными (АП-50-2М, АП-50-3М) и тепловыми (АП-50-2Т, АП-50-3Т) расцепителями. Автоматы АП-50 могут иметь различные специальные исполнения с дополнительными расцепителями, например с расцепителями минимального напряжения дистанционного отключения.

На рис. 3.12 изображен разрез автомата АП-50-3МТ. Все части его закрыты кожухом, выполненным из пластмассы и состоящим из основания *4* и крышки *5*. Коммутирующее устройство состоит из неподвижных *6* и подвижных *8* контактов. Гибкие проводники *10* соединяют подвижные контакты с тепловыми расцепителями *3*, которые, в свою очередь, соединены с электромагнитными расцепителями *2*. Держатели подвижных контактов монтируются на изолированной траверсе *11*, кинематически связанной с механизмом свободного расцепления (этот механизм на рисунке не виден), и оперативными кнопками «*Вкл*» и «*Откл*». Контакты каждого полюса заключены в дугогасительную камеру *9*. Гашение дуги происходит путем дробления и деионизации ее поперечными стальными пластинами *7*.

При возникновении в какой-либо фазе перегрузки или КЗ срабатывает тепловой или электромагнитный расцепитель, соответствующий данному полюсу, и поворачивает общую для всех полюсов отключающую рейку *1*. Механизм свободного расцепления срабатывает, и все полюсы автомата размыкаются одновременно, независимо от положения в этот момент кнопки управления.

Автомат АП-50 имеет приспособление для регулировки тока уставки теплового расцепителя. Перемещением специального рычага вниз ток уставки может быть уменьшен до номинального, следующего по шкале уставки с точностью до 20 %. Например, уставку на 25 А можно изменить до 16 А; на 16 А - до 10 А и т.д. Автоматы, изготавливаемые в пластмассовом

кожухе, имеют защищенное исполнение, в дополнительном металлическом кожухе - пыленепроницаемое. Технические данные автоматов АП-50 с комбинированным расцепителем приведены в табл. 4 прил.1.

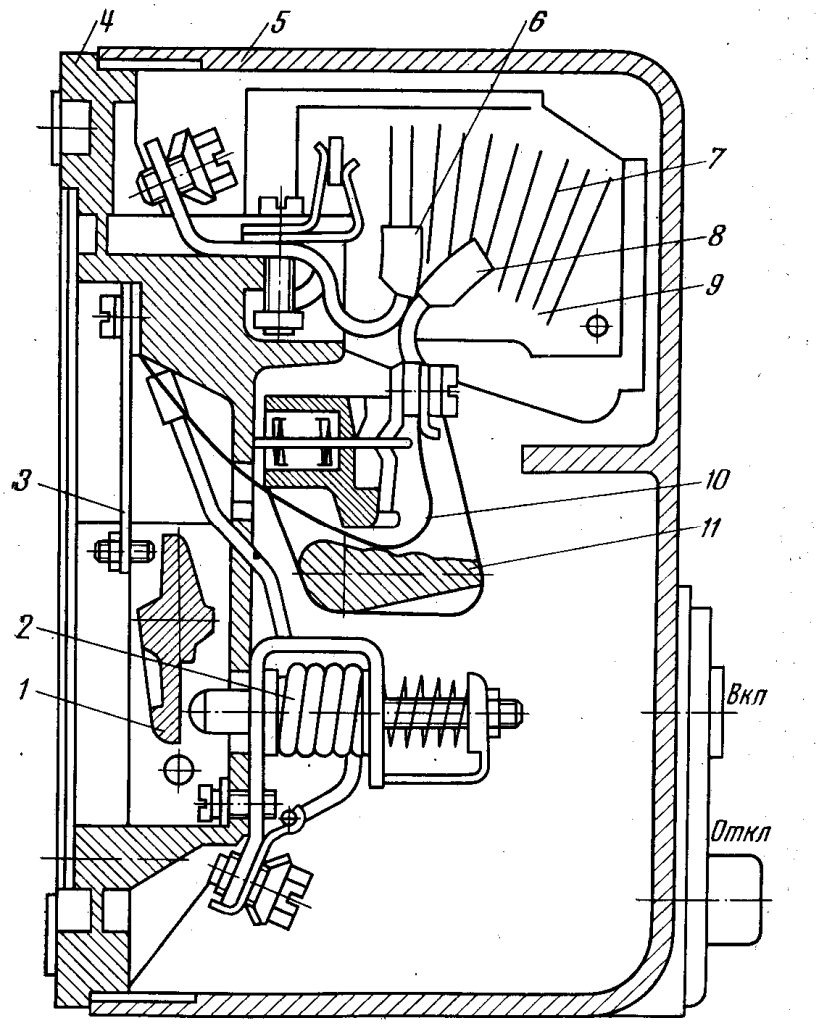


Рис. 3.12. Автомат АП-50-3МТ:
1 – отключающая рейка; *2* – электромагнитный расцепитель; *3* – тепловой расцепитель; *4* – основание; *5* – крышка; *6* – неподвижный контакт; *7* – стальные пластины; *8* – подвижный контакт; *9* – дугогасительная камера; *10* – гибкий проводник; *11* - траверса

Невысокая коммутационная способность автоматов АП-50 привела к разработке и внедрению в серийное производство автоматов АК-63, рассчитанных на номинальные токи от 0,63 до 63 А. Они имеют в 2,5 раза большую коммутационную способность, чем АП-50. Автоматы изготавливаются на 500 В переменного или 220 В постоянного напряжения одно-, двух- и трехполюсными с электромагнитными расцепителями максимального тока и с гидравлическим замедлителем или без него. Автоматы с замедлителем отключают ток перегрузки с выдержкой времени. При переменном токе и с замедлителем отсечка автомата отрегулирована на 14-кратный ток, а при отсутствии замедлителя - на 3- или 14-кратный ток.

Однополюсные автоматические бытовые выключатели типа АБ-25М предназначены для защиты однофазных сетей переменного тока до 220 В (в жилых и общественных зданиях, служебно-бытовых и производственных помещениях промышленных предприятий) от токов перегрузки и токов КЗ, а также для включения и отключения этих сетей вручную. Автоматы изготавливаются с нерегулируемыми тепловыми расцепителями на номинальные токи 15, 20 и 25 А.

Предельная коммутационная способность автоматов АБ-25М - не менее 1000 А (амплитудное значение) при напряжении 220 В и $\cos\varphi = 0{,}9$. Основной недостаток этих автоматов заключается в том, что они не позволяют осуществлять защиту при токе менее 15 А.

Автоматы типа АЕ-1000 и АЕ-2000 в дальнейшем должны заменить все ранее разработанные автоматы в диапазоне номинальных токов до 100 А.

Однополюсные автоматы АЕ-1000 на 220 В предназначены для защиты сетей жилых и общественных зданий. Они исполняются с тепловыми или электромагнитными мгновенного действия (или комбинированными) расцепителями на номинальные токи 6,10 и 15 А. Их отключающая способность равна 1,5 кА (амплитудное значение) при коэффициенте мощности не ниже 0,9. Аналогичны назначение и характеристики трехполюсных автоматов этого типа.

Серия одно-, двух- и трехполюсных автоматов АЕ-2000 на номинальные токи 25, 63 и 100 А предназначается для применения в промышленности.

Технические характеристики однополюсных АЕ-1000 и трехполюсных АЕ-2000 приведены в табл. 6 прил.1.

3.3. ТЕПЛОВЫЕ РЕЛЕ

Тепловые реле обычно применяются для защиты электродвигателей с длительным режимом работы (рабочий период составляет не менее 30 мин) от опасного нагрева при длительных перегрузках.

Тепловое реле (рис. 3.13) состоит из четырех основных элементов: нагревателя *7*, включаемого последовательно в защищаемую от перегрузки сеть; биметаллической пластинки *8* из двух спрессованных металлических пластин с различными коэффициентами линейного расширения; системы рычагов и пружин; контактов *6* и *5*. Когда через нагревательный элемент *7* проходит ток, превышающий номинальный ток электродвигателя, выделяется такое количество тепла, что незакрепленный (на рисунке левый) конец биметаллической пластинки изгибается в сторону металла с меньшим коэффициентом линейного расширения (т.е. опускается) и выводит защелку *1* из зацепления. В этот момент под действием пружины *3* верхний конец рычага *2* поднимается, размыкает контакты *6* и *5*, разрывает цепь управления магнитного пускателя. Кнопка *4* служит для ручного возврата

рычага *2* в исходное положение после срабатывания реле. Для регулирования тока уставки служит специальное устройство *9*.

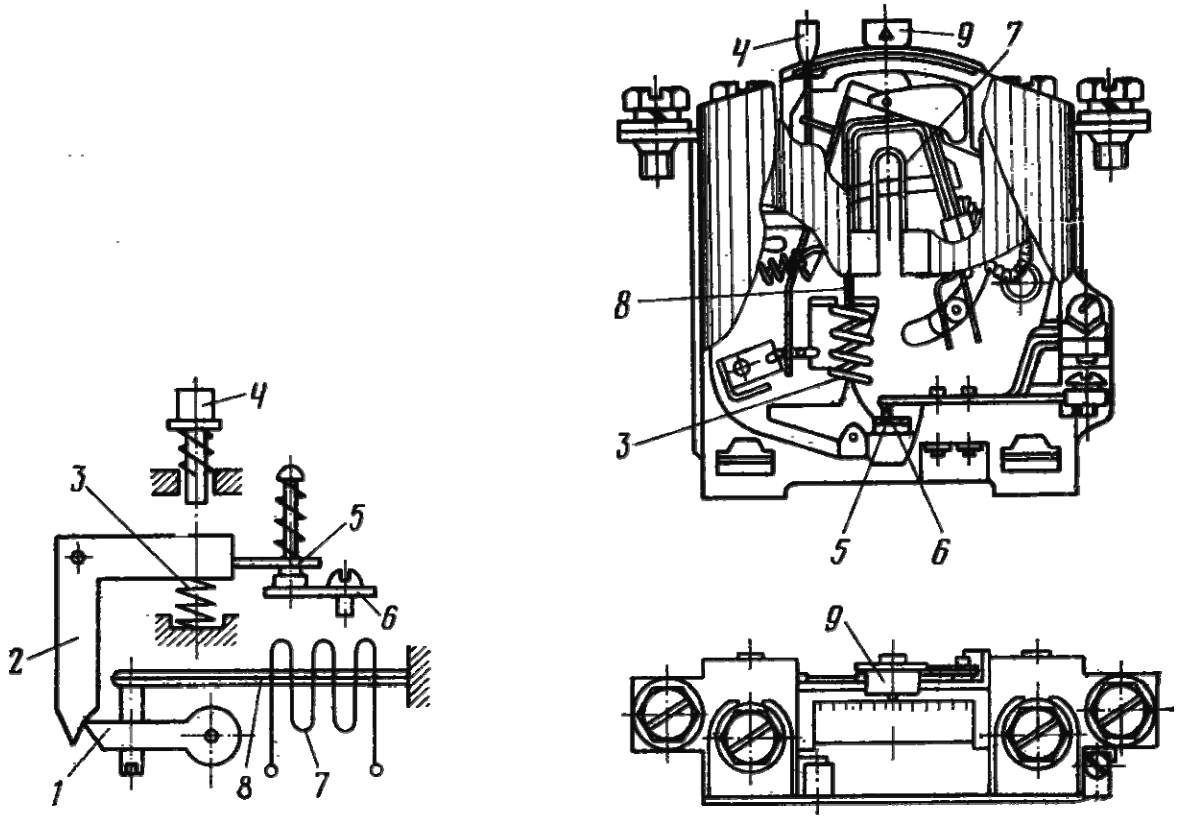


Рис. 3.13. Схема (*а*) и конструкция (*б*) теплового реле типа ТРП:
1 – защелка; *2* – рычаг; *3* – пружина; *4* – кнопка;
5 и *6* – контакты; *7* – нагреватель; *8* – биметаллическая пластинка;
9 – регулировочное устройство

В тепловых реле, встраиваемых в магнитные пускатели, нагревание биметаллического элемента происходит от тока в самом биметаллическом элементе (расцепитель с непосредственным нагревом) или в специальном нагревательном элементе (расцепитель (см. рис. 3.8) с косвенным нагревом), или комбинированно, т.е. в том и другом элементе (расцепитель со смешанным нагревом).

Тепловые реле используют обычно и для защиты электродвигателя от работы на двух фазах. В этих случаях применяют два одноэлементных тепловых реле или одно двухэлементное. Тепловые реле имеют следующие параметры.

Номинальное напряжение реле $U_{н.р}$ - наибольшее из номинальных напряжений сетей, в которых допускается применять данное реле.

Номинальный ток реле $I_{н.р}$ - наибольший длительный ток, который не вызывает срабатывания реле.

Номинальный ток нагревателя $I_{н.нагр}$ - наибольший длительный ток, при котором реле с данным нагревателем не срабатывает (для реле со сменными нагревателями).

Номинальный ток уставки реле (для реле с регулятором) $I_{н.уст.р}$ - наибольший длительный ток, который при данной настройке реле не вызывает срабатывания. Обычно $I_{н.уст.р} = (0{,}6\text{-}1)\ I_{н.р(н.нагр)}$.

Ток срабатывания теплового реле $I_{ср.р}$ - наименьший ток, при котором срабатывает тепловое реле. Обычно $I_{ср.р} = (1{,}2\text{-}1{,}3)\ I_{н.р(н.нагр)}$.

Для реле с регулятором значения $I_{н.р}$ и $I_{н.нагр}$ соответствуют нулевому (среднему) положению поводка регулятора (току нулевой уставки). Для реле со сменными нагревателями номинальный ток реле равен наибольшему из номинальных токов нагревателей, которые могут быть установлены в данном реле.

Широкое использование тепловых реле для защиты электродвигателей объясняется тем, что их защитные характеристики имеют такой же вид, как и перегрузочные характеристики электродвигателей. На рис. 3.14 показано типичное взаимное расположение перегрузочной характеристики электродвигателя *1* и защитных характеристик теплового реле *2* и *3*. Защитная характеристика *2* теплового реле соответствует случаю, когда номинальный ток реле равен номинальному току электродвигателя. Согласно рис. 3.14, существует значительная зона перегрузок, называемая зоной перезащищенности (зона А), где реле срабатывает раньше, чем электродвигатель достигает допустимой температуры. При больших перегрузках, соответствующих режиму заторможенного электродвигателя, когда реле не обеспечивает своевременного отключения электродвигателя, существует зона недозащищенности (зона Б).

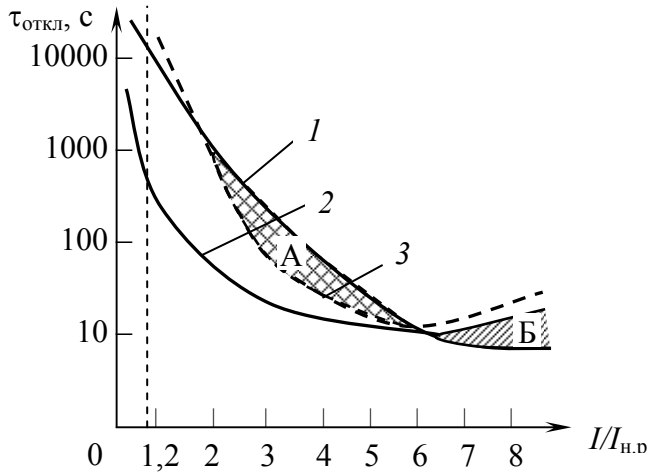


Рис. 3.14. Взаимное расположение перегрузочной характеристики электродвигателя *1* и защитных характеристик теплового реле *2* и *3*

Для уменьшения зоны А и лучшего использования перегрузочной способности электродвигателя ток срабатывания реле выбирают равным $I_{ср.р} = (1{,}15 + 1{,}2)I_н$. В этом случае защитная характеристика реле займет положение *3*. Незащищенность в области больших перегрузок (зона Б) может быть компенсирована применением наряду с тепловым реле плавких предохранителей.

В настоящее время применяют реле серий: ТРП, ТРН, ТРА, ТРВ, ТРГ, ТРТ. Ряд реле (серии ТРП, ТРН и др.) оснащены регулятором, позволяющим в довольно широких пределах плавно изменять значение тока срабатывания. Некоторые серии тепловых реле (например, серии ТРН) имеют температурную компенсацию, поэтому малочувствительны к колебаниям температуры среды. Однофазные реле серии ТРП, рассчитанные на токи от 1 до 600 А, применяются вместо тепловых реле серии РТ в магнитных пускателях серии ПА и станциях управления. Двухфазные реле с термокомпенсацией серии ТРН, рассчитанные на токи 0,4 - 40 А, предназначаются для магнитных пускателей серии ПМИ, П-6, ПА-300, ПМЕ, станций управления.

Нагревательные элементы реле типов ТРН-10А (8А) и ТРП-10 (8) при защите электродвигателей с $I_н \le 600$ А включаются через трансформатор ТК-20 при условиях:

$I_н \le 146$ А; применяется трансформатор с коэффициентом трансформации $K_т = 300 / 5$;

$I_н \le 300$ А; трансформатор с $K_т = 600 / 5$;

$I_н \le 600$ А; трансформатор с $K_т = 1000 / 5$.

При таком включении выбор реле и нагревателей производится так же, как при отсутствии трансформаторов тока, но в расчетных формулах (см. примечание 4 к табл. 7 прил. 1) вместо $I_н$ электродвигателя необходимо подставлять величину $I_н = I / K_т$.

При выборе тока тепловых реле весьма распространенных магнитных пускателей серий ПМЕ и ПА (взамен серии П) следует руководствоваться данными примечания 5 табл. 7 прил. 1.

3.4. ВЫБОР АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ

Плавкие предохранители и автоматы имеют различные достоинства и недостатки, которые следует учитывать при защите электроустановок от токов перегрузок и токов КЗ, особенно электроустановок пожаровзрывоопасных производств. Поскольку предохранитель является однофазным аппаратом, при перегрузках может перегореть плавкая вставка только в одной из фаз трехфазной сети. Трехфазный электродвигатель будет работать на оставшихся двух фазах. Обмотки электродвигателя быстро нагреваются (в течение нескольких минут) и при отсутствии защиты от перегрузки тепловыми реле могут быть повреждены.

Предохранители хуже, чем автоматы защищают установку от небольших перегрузок, так как у них отношение $I_{\infty}/I_{\text{н.вст}}$ большее, т.е. инерционность выше. При этом и время, необходимое для замены плавких вставок и восстановления питания отключенной установки, достаточно велико. Из-за этого происходят большие простои оборудования, чем при использовании автоматов.

Конструкция некоторых типов предохранителей позволяет применять нестандартные (некалиброванные) плавкие вставки, «жучки» и т.п. При таких кустарных вставках весьма вероятны местные перегревы, порча и даже разрыв патронов (например, предохранителей типа ПР). Они перестают быть надежными аппаратами защиты и могут привести к авариям, пожарам и взрывам. Однако по сравнению с автоматами предохранители имеют и некоторые преимущества. Они дешевы, конструктивно просты и срабатывают при сверхтоках безотказно. Предохранители лучше ограничивают большие токи КЗ и обладают большей разрывной способностью, чем установочные автоматы.

Автоматы рекомендуется применять в тех установках, в которых необходимо быстрое восстановление питания. Автоматы имеют более устойчивые и постоянные защитные характеристики, обеспечивают надежное отключение и селективную защиту от сверхтоков, позволяют сравнительно точно установить определенный ток срабатывания. Они удобны в эксплуатации, надежны и безопасны. Возможность неполнофазных отключений при защите автоматом отсутствует. В зарубежной практике часто используют совместную установку автоматов и токоограничивающих предохранителей, а некоторые фирмы даже встраивают такие предохранители в корпуса автоматов.

Требования к аппаратам защиты

Аппараты защиты должны удовлетворять следующим требованиям.

1. Не нагреваться сверх допустимой для них температуры в условиях нормальной эксплуатации.

2. Не отключать электроустановки при кратковременных перегрузках (пусковые токи, «пики» токов технологических нагрузок, токи при самозапуске и т.п.).

Номинальные токи плавких вставок предохранителей и токи уставок автоматов, служащих для защиты отдельных участков сети, следует выбирать по возможности минимальными по расчетным токам этих участков или нормальным токам электроприемников. Соблюдение этих условий обязательно во всех случаях. Длительный перегрев аппаратов защиты резко ухудшает их защитные свойства, например, возможность срабатывания при нагрузках, свойственных нормальной эксплуатации электроустановок,

отклонение защитных характеристик от стандартных, свойственных нормальному температурному режиму работы, и т.д.

При ненормальном температурном режиме аппараты защиты могут срабатывать неселективно. Не оправданные условиями эксплуатации отключения электроустановок приводят к расстройству режима технологического процесса, а иногда могут явиться причиной аварии, пожара и взрыва. Для удовлетворения первого условия необходимо выбирать аппарат защиты так, чтобы номинальный ток самого аппарата и плавкой вставки или расцепителей были равны расчетному току сети, т.е.

для предохранителей

$$\begin{matrix} I_{\text{н.пр}} \\ I_{\text{н.вст}} \end{matrix} \geq I_{\text{р}}; \tag{3.8}$$

для автоматов и тепловых реле магнитных пускателей

$$\left.\begin{matrix} I_{\text{н.а}} \\ I_{\text{н.эл.м,н.тепл}} \\ I_{\text{н.р(н.нагр)}} \end{matrix} \geq I_{\text{р}}; \right\} \tag{3.9}$$

Для удовлетворения второго требования необходимо учитывать режим работы установки и расчетные токи сети.

Выбор плавких вставок, если имеются их характеристики, производится следующим образом: на семейство кривых *1, 2, 3, 4* (рис. 3.15) наносят пусковую токовую характеристику электродвигателя *5*. Вставка должна быть выбрана с такой характеристикой, чтобы все ее точки лежали выше кривой пусковой характеристики электродвигателя, в данном случае - с характеристикой *2*. Способ выбора предохранителей при отсутствии их защитных характеристик рассматривается в п. 4.4.

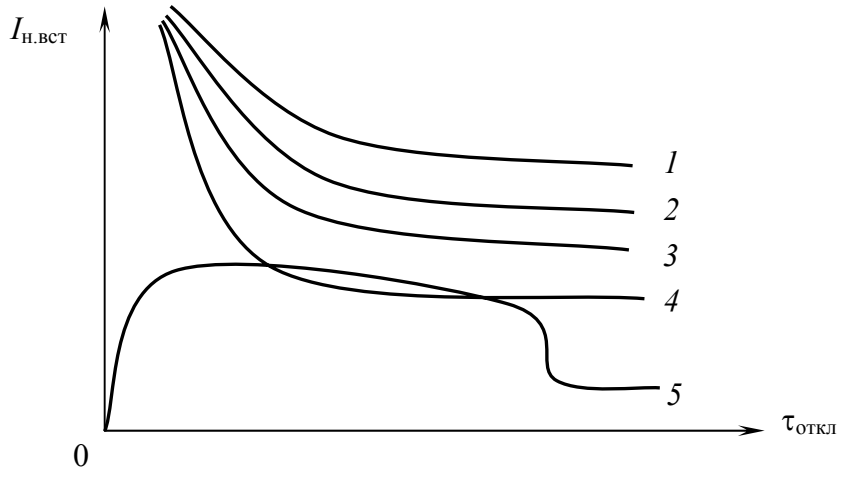


Рис. 3.15. Защитные характеристики плавких вставок *1, 2, 3, 4* и пусковая характеристика электродвигателя *5*

При защите автоматами с электромагнитным или комбинированным расцепителем необходимо, чтобы ток срабатывания $I_{ср}$ (ток уставки) расцепителя превышал максимальный кратковременный ток линии $I_{макс}$ (см. гл. 4) и соответствовал условию:

для автоматов А3120, А3130, А3140, АП-50 и др.

$$I_{ср.эл.м} \geq 1{,}25\, I_{макс};$$

для автоматов А3110

$$I_{ср.эл.м} \geq 1{,}5\, I_{макс}. \qquad (3.10)$$

Коэффициенты 1,25 и 1,5 учитывают неточность в определении максимального кратковременного тока линии $I_{макс}$ и разброс характеристик электромагнитных расцепителей автоматов. Для большинства автоматов величина этого коэффициента, равная 1,25, обеспечивает невозможность ложного отключения линии при пуске электродвигателя, так как разброс характеристик автоматов не превосходит ±15 %. Для автоматов А3110 и др., разброс характеристик которых достигает ±30 %, величина коэффициента принимается равной 1,5. Ток срабатывания теплового расцепителя автомата и тепловых реле определяется по условиям:

для автоматов серии А3100, АП-50 и АБ-25, А3700 (см. также табл. 5 прил.1)

$$I_{ср.тепл} \geq 1{,}25\, I_{р}; \qquad (3.11)$$

для тепловых реле магнитных пускателей при легких условиях пуска электродвигателя (длительность пуска до 10 с)

$$I_{н.р} \geq I_{н.нагр} = I_{н}; \qquad (3.11а)$$

для тепловых реле магнитных пускателей при затяжных пусковых режимах электродвигателей

$$I_{н.р} \geq I_{н.нагр} = (1{,}05 - 1{,}2) I_{н}. \qquad (3.11б)$$

Здесь $I_{р}$ есть рабочий ток в защищаемой сети (в сети, питающей один электродвигатель, $I_{р} = I_{н}$, где $I_{н}$ - номинальный ток электродвигателя).

3. Аппараты защиты должны отключать сеть при длительных перегрузках с обратно зависимой от тока выдержкой времени.

4. Во всех случаях аппараты защиты должны обеспечивать отключение аварийного участка при КЗ в конце защищаемой линии: при однофазных КЗ - в сетях с глухозаземленной нейтралью, при двухфазных КЗ - в сетях с изолированной нейтралью.

Согласно ПУЭ, электромагнитный распределитель автомата выбирают по условию $I_{ср.эл.м} \leq 4{,}5\, I_{доп}$. Если при повреждении линии ток КЗ будет превышать ток срабатывания автомата, автомат почти мгновенно

отключит защищаемую линию и предотвратит возникновение недопустимого перегрева проводов линии током КЗ. Если же величина тока КЗ окажется меньше тока срабатывания автомата, автомат может не сработать и ток КЗ выведет из строя провода или кабель поврежденного участка линии. Длительно неотключаемые КЗ недопустимы, особенно там, где есть опасность пожара или взрыва, например во взрывоопасных зонах любого класса.

Обычно обращают серьезное внимание на опасность длительного протекания чрезмерных токов КЗ, вызывающих перегрев проводов и кабелей, воспламенение их изоляции по всей длине. Но и токи, не вызывающие перегрузки проводников, достаточной для воспламенения изоляции по всей длине провода, также могут быть опасными. Электрическая дуга в месте повреждения, если она продолжительное время не отключается, способна вызвать местное воспламенение изоляции. По мере разрушения изоляции КЗ будет перемещаться к источнику питания, пока не возрастет настолько, что кратность окажется достаточной для срабатывания предохранителей или автоматов.

При эксплуатации электроустановок во многих случаях идут на некоторое увеличение номинального тока плавких вставок и токов срабатывания расцепителей автоматов, например для устранения ложных отключений от допустимых кратковременных перегрузок либо для достижения селективности по отношению к нижестоящим аппаратам защиты. Загрубление вставок предохранителей применяется иногда для уменьшения случаев повреждений двигателей при работе на двух фазах.

Таким образом, в некоторых случаях проверка аппаратов защиты на отключение токов КЗ становится необходимой, а во взрывоопасных установках она обязательна. Отключение токов КЗ в конце защищаемой линии будет обеспечено, если выполняются следующие условия:

при защите сетей во взрывоопасных зонах

$$\begin{gathered} I_{\text{КЗ (к)}} / I_{\text{н.вст}} \geq 4; \\ I_{\text{КЗ (к)}} / I_{\text{ср.эл.м}} \geq 1{,}25\text{-}1{,}4^{*}; \\ I_{\text{КЗ (к)}} / I_{\text{н.тепл}} \geq 6; \end{gathered} \qquad (3.12)$$

при защите сетей в невзрывоопасных зонах

$$\begin{gathered} I_{\text{КЗ (к)}} / I_{\text{н.вст}} \geq 3; \\ I_{\text{КЗ (к)}} / I_{\text{ср.эл.м}} \geq 1{,}25\text{-}1{,}4^{*}; \\ I_{\text{КЗ (к)}} / I_{\text{н.тепл}} \geq 3. \end{gathered} \qquad (3.13)$$

[*] 1,25 – для автоматов на номинальные токи свыше 100 А и 1,4 – до 100 А.

Для приближенного расчета тока КЗ в сетях напряжением до 1000 В можно пользоваться следующими формулами:

ток однофазного КЗ в сетях с глухозаземленной нейтралью

$$I_{\text{КЗ (к) (1)}} = U_{\text{ф}} / z_{\text{(ф-о)}}; \qquad (3.14)$$

ток двухфазного КЗ в сетях с изолированной нейтралью

$$I_{\text{КЗ (к) (2)}} = U_{\text{л}} / 2z_{\text{ф}}, \qquad (3.15)$$

где $U_{\text{ф}}$, $U_{\text{л}}$ - номинальное фазное и линейное напряжение сети, В; $z_{\text{(ф-о)}}$, $z_{\text{ф}}$ - полное сопротивление цепи тока КЗ соответственно для петли «фаза - нуль» и для фазы, Ом.

Значения z определяются по формулам:

$$z_{\text{(ф-о)}} \approx \sqrt{(\sum r_{\text{ф}} + \sum r_{\text{д}} + \sum r_0)^2 + (\sum r_{\text{ф}} + \sum x_0)^2} + z_{\text{т1}}\ ; \qquad (3.16)$$

$$z_{\text{ф}} = \sqrt{(\sum r_{\text{ф}} + \sum r_{\text{д}} + \sum r_{\text{т}})^2 + (\sum x_{\text{ф}} + \sum x_{\text{т}})^2}\ , \qquad (3.17)$$

где $r_{\text{ф}} = \rho\ (l / S_{\text{ф}})$, $x_{\text{ф}} = al$ - активное и индуктивное сопротивления проводника фазы участка цепи, Ом; $r_0 = \rho\ (l / S_0)$, $x_0 = al$ - активное и индуктивное сопротивление нулевого проводника, Ом (здесь ρ - расчетное удельное сопротивление, равное 19 для меди и 32 для алюминия, Ом·мм^2/км; l - длина участка цепи, км; $S_{\text{ф}}$ и S_0 - сечение проводника фазы и соответственно нулевого провода, мм^2; a - среднее значение индуктивного сопротивления 1 км проводника, равное 0,07 для кабелей; 0,09 - для проводов, проложенных в трубе; 0,25 - для изолированных проводов, проложенных открыто, на роликах или изоляторах; 0,3 - для воздушных линий низкого напряжения); $r_{\text{т}} = c / S_{\text{т}}$, $x_{\text{т}} = dr_{\text{т}}$ - активное и индуктивное сопротивление фазы питающего трансформатора, Ом (здесь $S_{\text{т}}$ - мощность трансформатора, кВ·А; c - коэффициент, равный 4 для трансформаторов до 60 кВ·А; 3,5 – до 180 кВ·А; 2,5 - до 1000 кВ·А; 2,2 - до 1800 кВ·А; d - коэффициент, равный 2 для трансформаторов до 180 кВ·А; 3 - до 1000 кВ·А; 4 - до 1800 кВ·А); $r_{\text{д}}$ - добавочное сопротивление переходных контактов, Ом; $z_{\text{т(1)}}$ - расчетное полное сопротивление трансформатора току КЗ на корпус (землю), Ом.

При подсчете ожидаемых значений токов КЗ в установках до 1000 В (во избежание получения грубых преувеличений) необходимо полнее учитывать не только активное сопротивление всех элементов петли КЗ, но и активное сопротивление переходных контактов этой петли (болтовые контакты на шинах, зажимы на вводах и выводах аппаратов, разъемные контакты аппаратов и контакт в точке КЗ). Следует иметь в виду, что динамические силы тока КЗ всегда направлены на разъединение контактных соединений, поэтому переходное сопротивление последних возрастает. Необходимо также учитывать, что большие токи увеличивают переходное сопротивление в точке КЗ (так называемые динамический и термический

эффекты) и, следовательно, появляется ограничение тока КЗ. Увеличение переходного сопротивления в точке КЗ становится особенно заметным при токах 10 кА и более.

При отсутствии достоверных данных о полном числе контактов и о переходных сопротивлениях в них, включая контакт в точке КЗ, рекомендуется принимать для всех контактов добавочное активное сопротивление $r_д$, равное:

для распределительных щитов на подстанциях - 0,015 Ом;

для первичных цеховых распределительных пунктов напряжением 380 В, питаемых радиальными линиями от щитов подстанций - 0,02 Ом;

для вторичных цеховых распределительных пунктов, щитов и на зажимах аппаратов, питаемых от первичных распределительных пунктов, - 0,025 Ом;

для аппаратуры, установленной непосредственно у электроприемников (контакторы, пускатели и т.д.), получающих питание от вторичных распределительных пунктов, - 0,03 Ом.

В распределительных сетях до 1000 В активное сопротивление цепи бывает иногда больше индуктивного. Поэтому при определении тока КЗ можно пренебречь суммарным индуктивным сопротивлением короткозамкнутой цепи, если $\sum x_п \le 0{,}3 \sum r_п$, т.е. с его влиянием можно не считаться и полагать при расчетах $x_п = 0$.

Значение расчетных сопротивлений понижающих трансформаторов $z_{т(1)}$ с вторичным напряжением 400 / 230 В в формуле (3.16) для случая однофазного КЗ учитывают при мощности трансформаторов только до 630 кВ·А, если их обмотки соединены по схеме $Y / Y_о$ (см. табл. 3.1).

Если при практических расчетах сопротивлениями обмоток трансформатора $z_{т(1)}$ и индуктивным сопротивлением петли КЗ $x_п$ можно пренебречь, тогда формула (3.16) примет вид

$$z_{(ф\text{-}о)} \approx \sum r_ф + \sum r_д + \sum r_0. \qquad (3.18)$$

Если аппарат защиты не обеспечивает надежного отключения КЗ в соответствии с требованиями формул (3.12) и (3.13), на линии необходимо установить промежуточный аппарат с меньшим током срабатывания или принять меры к уменьшению сопротивления линии, например увеличить сечение нулевого провода.

Таблица 3.1

Мощность трансформатора, кВ·А	Первичное напряжение, кВ	$z_{т(1)}$, Ом
25	6 и 10	3,110
40		1,949
63	6 и 10 20	1,237 1,136
100	6 и 10 20 и 35	0,779 0,764

Окончание табл. 3.1

Мощность трансформатора, кВ·А	Первичное напряжение, кВ	$z_{т(1)}$, Ом
160	6 и 10 20 и 35	0,487 0,478
250	6 и 10 20 и 35	0,312 0,305
400	6 и 10 20 и 35	0,195 0,191
630	6 и 10 20 и 35	0,129 0,121

Примечание. При вторичном напряжении 230 / 127 В значения сопротивлений следует уменьшить в 3 раза.

Прежде всего следует рассмотреть возможность увеличения площади сечения нулевого провода на четырехпроводных и трехпроводных участках (две фазы - нуль), может быть, даже до большего значения, чем у фазных проводов. Если это не обеспечивает кратности, на маломощных ответвлениях от линии при коммунально-бытовой нагрузке можно увеличить площадь поперечного сечения и у фазных проводов. Если эти пути или даже совместное их применение не обеспечивают необходимую кратность по формулам (3.12) и (3.13), эффективное действие зануления может быть только при увеличении числа линий, отходящих от питающих подстанций, отчего линии будут менее мощными (а значит, снизится номинальный параметр аппарата защиты по формулам (3.12) и (3.13)) и более короткими, что может повысить ток однофазного КЗ в конце линии.

5. Отключающая способность $I_{пр}$ аппарата защиты должна соответствовать токам КЗ в начале защищаемого участка сети. Если она окажется меньше величины возможного тока КЗ, отключение аварийного участка может не произойти или время отключения будет недопустимо большим и сам аппарат повредится. Поэтому нужно, чтобы $I_{пр}$ был больше или равен наибольшему возможному току КЗ в начале защищаемого участка сети, т.е.

$$I_{пр} \geq I_{КЗ(н)}. \qquad (3.19)$$

В современных цеховых распределительных сетях до 1000 В токи КЗ достигают иногда величин, затрудняющих выбор аппаратов защиты, согласно формуле (3.19). В таких случаях ток КЗ может быть ограничен до допустимых пределов с помощью токоограничивающих предохранителей, снижением мощности питающих трансформаторов и т.д. Предельный ток отключения аппаратов защиты определяют по их паспортным или каталожным данным (см. прил.1). Ток трехфазного КЗ в начале защищаемого участка трехфазной сети (в месте установки аппарата защиты) независимо от режима нейтрали трансформатора определяется по формуле

$$I_{КЗ\,(н)(з)}=U_{л} / \sqrt{3}\ z_{ф}. \qquad (3.20)$$

Ток КЗ в начале защищаемого участка сети при схеме «две фазы - нуль» определяется по формуле (3.15), а в однофазных сетях - по формуле (3.14).

Селективность (избирательность) действия аппаратов защиты

Аппараты защиты должны отключать сеть и установки при появлении опасных для них токов КЗ и перегрузки в минимальное время, но по возможности селективно. Под селективным действием аппаратов защиты следует понимать такую их работу, когда на появление сверхтоков (токов КЗ, перегрузки и т.п.) реагирует только ближайший к месту повреждения защитный аппарат и не отключается последующий аппарат.

Выбор аппаратов защиты с учетом селективности их действия имеет особо важное значение для сетей электроснабжения производств со взрывоопасной технологией. Если отключится не ближайший, а вышестоящий к месту повреждения в схеме электроснабжения аппарат защиты, это приведет к отключению не одного потребителя, а группы потребителей. Следовательно, масштабы и последствия аварийного останова технологических аппаратов могут обусловить возникновение пожара или взрыва.

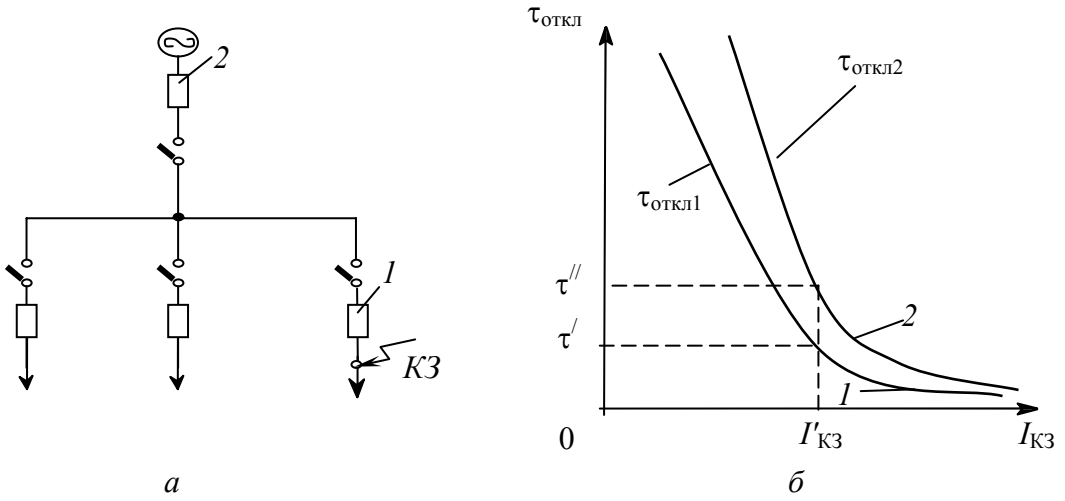


Рис. 3.16. Селективное действие аппаратов защиты:
а – схема размещения предохранителей *1* и *2*;
б – расположение защитных характеристик предохранителей *1* и *2*

Селективность действия аппаратов защиты рассмотрим на примере схемы размещения предохранителей в радиальных цеховых сетях (рис. 3.16, *а*). По условиям селективности вставка ближайшего к месту повреждения предохранителя *1* должна перегорать раньше, чем температура вставки последующего предохранителя *2* достигнет температуры плавле-

ния. Проверку селективности производят наложением на общий график одномасштабных защитных характеристик сравниваемых аппаратов (рис. 3.16, *б*). Селективность обеспечивается, когда время срабатывания последующего аппарата защиты значительно больше времени срабатывания ближайшего. С учетом разброса защитных характеристик для безусловного получения селективности, например предохранителей, необходимо, чтобы время отключения предохранителя *2* превосходило время отключения предохранителя *1* не менее чем указано в формуле

$$\tau_{\text{откл}(2)} \geq (1{,}7\text{-}3)\,\tau_{\text{откл}(1)}. \qquad (3.21)$$

Коэффициент 1,7 принимается для сетей обычного назначения, коэффициент 3 - для сетей особо ответственного назначения, например сетей взрывоопасных зон.

При одинаковых предохранителях с плавкими вставками из одного и того же материала для обеспечения селективного действия необходимо, чтобы номинальные токи плавких вставок последовательно включенных предохранителей отличались друг от друга по возможности на две ступени шкалы номинальных токов, т.е.

$$I_{\text{н.вст}(2)} / I_{\text{н.вст}(1)} \geq 1{,}6 - 2. \qquad (3.22)$$

Селективность автоматами серий А3100, АБ-25М и другими обеспечивается, если номинальные токи расцепителей смежных автоматов отличаются друг от друга на две ступени по шкале. Если же такое требование приводит к завышению сечения проводов, для не особенно ответственных случаев допускается иметь эту разницу в одну ступень.

При защите электроустановок предохранителями и автоматами (особенно без выдержки времени) селективность действия последних проверяется и подбирается по защитным характеристикам или по таблицам (см. табл. 3.2, 3.3).

Если на участке сети вышестоящим является предохранитель, а ближайшим - тепловое реле магнитного пускателя, по условиям селективности необходимо, чтобы

$$I_{\text{н.вст}} \leq 4I_{\text{н.р(н.нагр)}}. \qquad (3.23)$$

При защите участка сети автоматом с электромагнитным расцепителем максимального тока (или электромагнитным реле) и тепловым реле селективность будет соблюдена, если

$$I_{\text{ср.эл.м}} \leq 10\, I_{\text{н.р(н.нагр)}}. \qquad (3.24)$$

Для автоматов с тепловыми расцепителями селективность может быть обеспечена при условии

$$I_{\text{н.тепл}(2)} \approx 1{,}5\, I_{\text{н.тепл}(1)}. \qquad (3.25)$$

Таблица 3.2

Предохранители	Номинальные токи автоматов, А		
	А3161, А3163	А3161, А3163, А3110	А3120
	при коротких замыканиях	при перегрузках	
40	-	15	-
60	-	20	15
100	-	25	20
150	15	30	25
200	20; 25	40	30
250	30	-	-
300	40	50	40
400	50	-	50

Таблица 3.3

Номинальные токи, А	
автомата	предохранителя ПР-2 (габарит II)
15	6
20	10
25	15
40	20; 25
50	35
60	-
80	-
100	60
120	80
140	100
200	125

Для автоматов с полупроводниковыми расцепителями селективность срабатывания может быть обеспечена, если вышестоящий в схеме электроснабжения автомат будет отличаться от нижестоящего (расположенного ближе к потребителям) не менее чем на одну ступень номинальных токов расцепителей.

В случаях, когда соблюдение селективности действия защиты связано с большими затратами или затруднено по каким-либо причинам, а вероятные неселективные отключения заведомо не угрожают ни аварией, ни пожаром, ни взрывом, ни существенными убытками из-за порчи продукции, допускается отступление от соблюдения условия селективности.

Выбор мест установки аппаратов защиты в зависимости от условий пожарной безопасности и технических условий

По условиям пожарной безопасности аппараты защиты устанавливают на панелях сборок, щитов, шкафов и блоков управления так, чтобы

возникающие в них искры и электрическая дуга не могли причинить вреда обслуживающему персоналу, воспламенить или повредить окружающие предметы. В помещениях сырых и с химически активной средой аппараты защиты следует располагать в уплотненных шкафах или выносить их из этих помещений: повышенное содержание влаги и химически активных веществ в воздухе вызывает окисление и постепенное разрушение аппаратов защиты. В пожароопасных зонах классов П-I и П-II аппараты защиты должны быть установлены в закрытых шкафах *IP*54, а в помещениях класса П-IIа - в защищенных *IP*33. Лучше всего устанавливать аппараты защиты в отдельных непожароопасных помещениях распределительных устройств.

Установка шкафов с аппаратами защиты во взрывоопасных зонах всех классов запрещается, так как при нормальных или аварийных режимах могут образовываться взрывоопасные смеси, для которых электрические искры и дуги являются достаточным источником воспламенения. Исключение составляют щитки в соответствующем исполнении по взрывозащите, например осветительные щитки типа ЩОВ-2 и ЩОВ-3 в исполнении ВЗГ.

Аппараты защиты следует устанавливать во всех местах сети, где сечение жилы проводника уменьшается, или в местах, где это необходимо для соблюдения селективности. При этом аппараты защиты должны устанавливаться в местах присоединения защищаемых проводников к питающей линии. В случае необходимости расстояние между питающей линией и аппаратом защиты ответвления может быть до 6 м. Сечение проводников на этом участке должно быть меньше, чем сечение питающей линии, но не менее сечения проводников после защитного аппарата.

3.5. УСТРОЙСТВО ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ (УЗО)

УЗО предназначено для обеспечения электро- и пожарной безопасности в бытовых и промышленных электроустановках. Из всех известных средств защиты от электрического тока УЗО является единственным устройством, обеспечивающим защиту человека от поражения током, даже в случае прямого прикосновения к токоведущим частям. УЗО предотвращает возгорания и пожары, возникающие вследствие длительного протекания токов утечки и развивающихся из них токов короткого замыкания. УЗО производит отключение потребителей электрической энергии при возникновении в них токов утечки, величина которых значительно меньше токов короткого замыкания. Поэтому УЗО предупреждают нагрев проводников, обеспечивая также пожарную безопасность.

Электрическая безопасность техническими средствами может обеспечиваться тремя способами: уменьшением напряжения прикосновения; уменьшением тока, который может поразить человека; уменьшением времени воздействия напряжения и тока, поражающих человека.

Конструкция УЗО обеспечивает быстрое отключение защищаемой электроустановки от сети при протекании тока через тело человека. Если ток утечки на землю возникает в результате разрушения изоляции, то УЗО можно рассматривать как устройство пожарной безопасности.

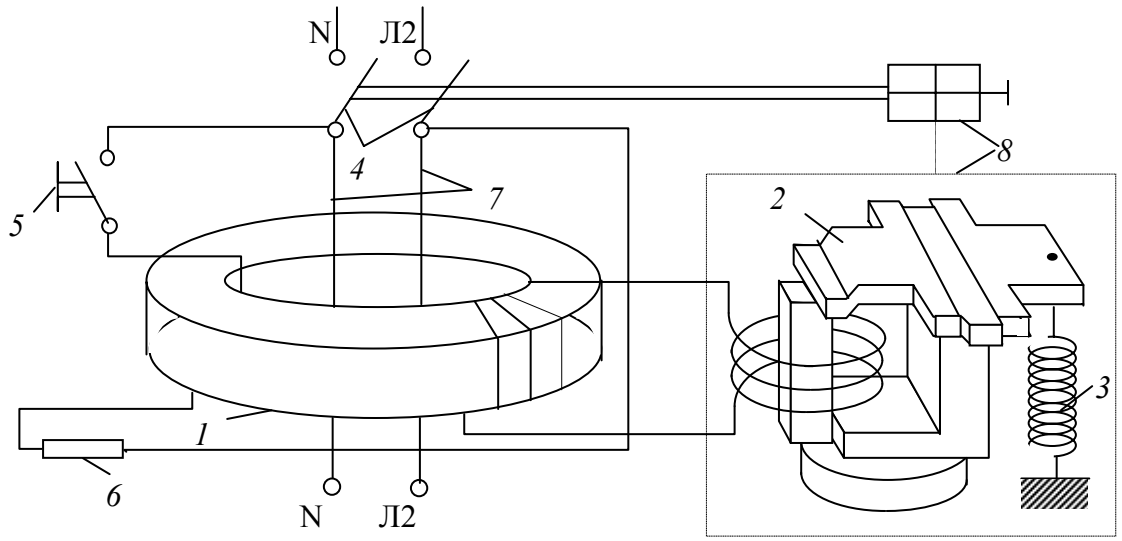


Рис. 3.17. Устройство защитного отключения:
1 – магнитопровод; *2* – магнитоэлектрическая защелка; *3* – пружина; *4* – контактная группа; *5* – кнопка теста; *6* – резистор тестовой цепи; *7* – рабочие проводники; *8* – механизм расцепителя

Элементы конструкции УЗО. Основными элементами конструкции УЗО (рис. 3.17) являются: трансформатор тока *1*; чувствительный элемент - магнитоэлектрическая защелка *2*; механический пружинный расцепитель *3*; контактная группа *4*; кнопка теста *5*; резистор тестовой цепи *6*; рабочие проводники *7*; механизм расцепителя *8*.

Цепь тестирования предназначена для осуществления периодического контроля исправности устройства, создающего ток утечки нажатием кнопки «тест».

Принцип действия УЗО. Устройство защитного отключения представляет быстродействующий выключатель, автоматически отключающий контролируемую электроустановку от сети при возникновении в ней тока утечки на землю (рис. 3.18).

Ток утечки может быть вызван прямым прикосновением человека к токоведущим частям в результате повреждения или разрушения изоляции. Срабатывание УЗО происходит за счет использования энергии тока утечки $I_{ут}$, вызывающего срабатывание магнитоэлектрической защелки и пружинного расцепителя.

До тех пор, пока ток утечки отсутствует, т.е. нет пробоя или повреждения изоляции электроприемника или нет прямого прикосновения человека к токоведущим частям, токи в прямом I_1 и обратном I_2 проводниках

нагрузки *3* равны и наводят в магнитном сердечнике *4* трансформатора тока УЗО равные, но встречно направленные магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , в результате чего ток во вторичной обмотке *5* равен нулю и не вызывает срабатывания чувствительного элемента - магнитоэлектрической защелки *6*, которая также представлена на рис. 3.17. При возникновении тока утечки, например прикосновения человека к фазному проводнику, баланс токов и магнитных потоков нарушается, во вторичной обмотке появляется ток небаланса $I\Delta$, который вызывает срабатывание защелки *6*, воздействующей, в свою очередь, на механизм расцепителя *7* и контактную систему *8*. Электромеханическая система УЗО рассчитывается на срабатывание при определенных значениях - «уставка» тока утечки. Наиболее широко применяются УЗО с уставками 10, 30 и 100 мА.

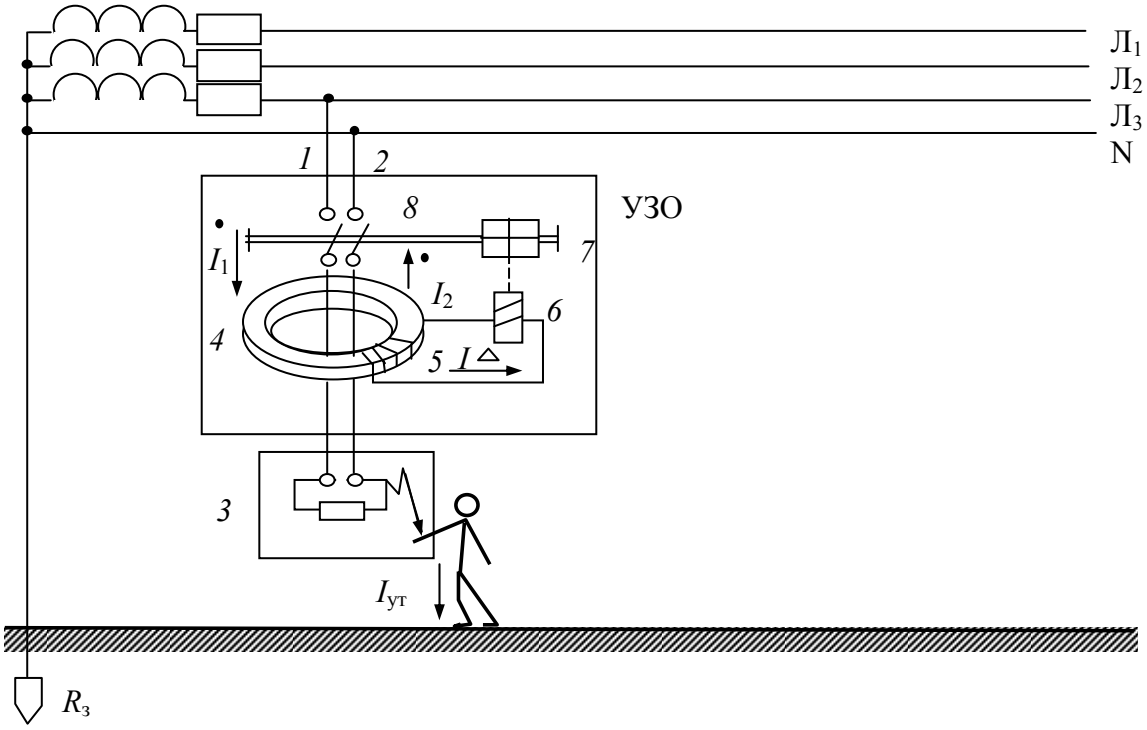


Рис. 3.18. Схема электроустановки с УЗО:
1, 2 – прямой и обратный проводники; *3* – нагрузка; *4* – магнитный сердечник трансформатора; *5* – вторичная обмотка; *6* – магнитоэлектрическая защелка; *7* – механизм расцепителя; *8* – контактная система; $Л_1$, $Л_2$, $Л_3$ – линейные проводники; N – рабочий и защитный нейтральный (нулевой) проводник

На рис. 3.19 представлена область значений *А*, которая характеризует величину опасного для человека тока и время его воздействия. Величина тока и время, в течение которого должно сработать УЗО, представлены областью *Б*.

УЗО успешно выполняют свои защитные функции в сетях с глухозаземленной нейтралью (рис. 3.20) и в сетях с изолированной нейтралью (рис. 3.21).

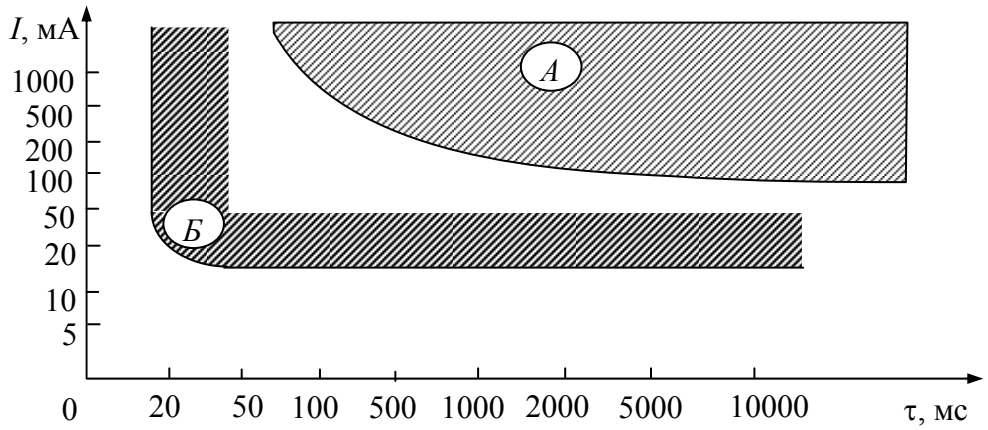


Рис. 3.19. График токопеременной зависимости физиологического воздействия на человека переменного тока (50-60 Гц) и рабочей характеристики УЗО:
А - область ощутимых воздействий тока на человека, вызывающих опасность фибрилляции сердца (вероятность менее 50 %); *Б* - зона срабатывания УЗО

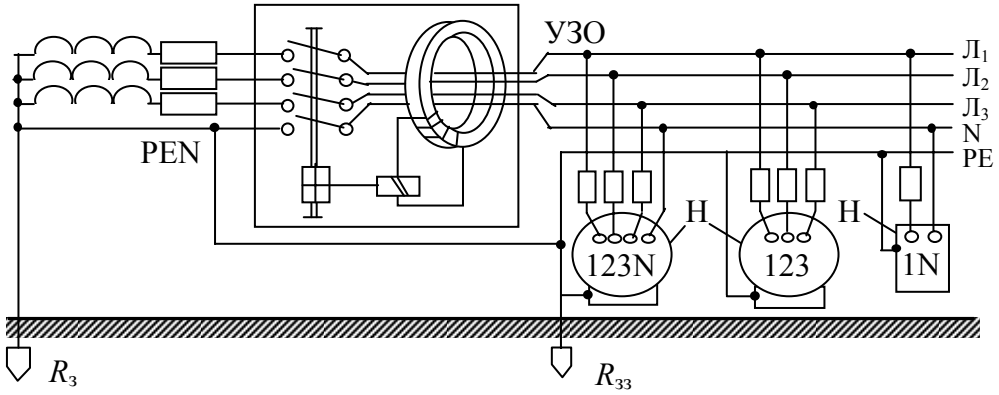


Рис. 3.20. Схема электроустановки с нулевым рабочим и защитным раздельными проводниками:
$Л_1$, $Л_2$, $Л_3$-линейные проводники; N-нейтральный (нулевой) рабочий проводник; PE-защитный нулевой проводник; H-нагрузка; $R_з$ - рабочее заземление; $R_{зз}$ - защитное заземление; PEN – рабочий и защитный нулевые проводники

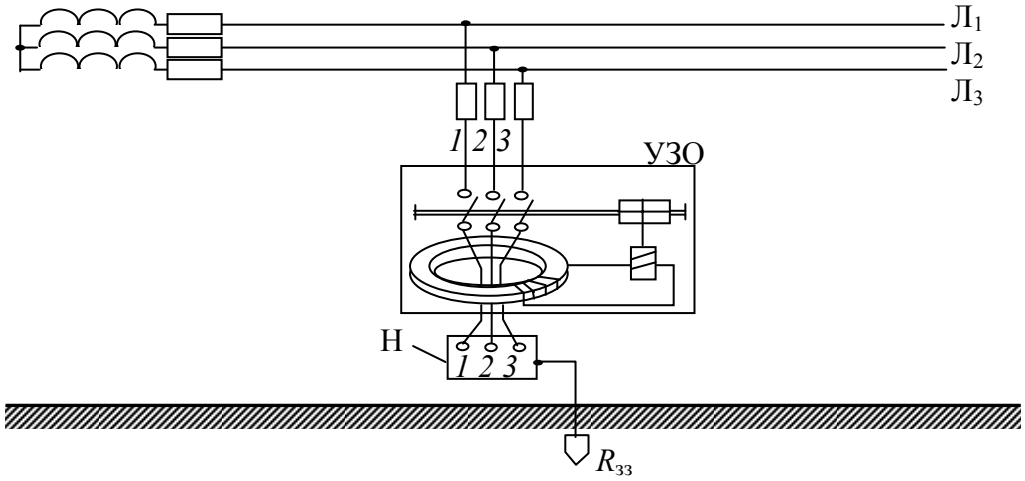


Рис. 3.21. Схема электроустановки с изолированной нейтралью:
$Л_1$, $Л_2$, $Л_3$ – линейные проводники; H – нагрузка; $R_{зз}$ – защитное заземление

Термины и определения параметров УЗО.

Номинальное напряжение - действующее значение напряжения, при котором обеспечивается работоспособность УЗО (в частности, при коротком замыкании).

Номинальный ток нагрузки - значение тока, который УЗО может пропускать в продолжительном режиме работы.

Номинальный отключающий ток - значение тока, которое вызывает отключение УЗО при заданных условиях эксплуатации.

Сверхток - любой ток, который превышает номинальный ток нагрузки.

Предельное значение неотключающего сверхтока - минимальное значение неотключающего сверхтока при симметричной нагрузке двух- и четырехполюсных УЗО или несимметричной нагрузке четырехполюсных УЗО.

Номинальная включающая и отключающая способность (коммутационная способность) - действующее значение ожидаемого тока, который УЗО способно включить, пропускать в течение всего времени размыкания и отключить при заданных условиях эксплуатации без нарушения его работоспособности.

Номинальная включающая и отключающая способность по дифференциальному току - действующее значение ожидаемого дифференциального тока, которое УЗО способно включить, пропускать в течение всего времени размыкания и отключить при заданных условиях эксплуатации без нарушения его работоспособности.

Номинальный условный ток короткого замыкания (ток термической стойкости) - действующее значение ожидаемого тока, которое способно выдержать УЗО, защищаемое устройством защиты от коротких замыканий - плавкой вставкой с номинальным током, равным току нагрузки УЗО.

Номинальный условный дифференциальный ток короткого замыкания - действующее значение ожидаемого дифференциального тока, которое способно выдержать УЗО, защищаемое устройством защиты от коротких замыканий при заданных условиях эксплуатации без необратимых изменений, нарушающих его работоспособность.

Номинальное время отключения - промежуток времени между моментом внезапного возникновения отключающего дифференциального тока и моментом выполнения функции данного устройства до полного гашения дуги.

Параметры УЗО. Конкретная модификация УЗО выбирается на основе электротехнического расчета нормальных и аварийных режимов работы электроустановки.

Технические требования на параметры УЗО приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

№ п/п	Параметр	Номинальное значение
1	Напряжение $U_н$, В	220, 380*
2	Частота $f_н$, Гц	50
3	Ток нагрузки $I_н$, А	16, 25, 40, 63*
4	Отключающий дифференциальный ток (ток утечки) $I\Delta_н$, мА	10, 30, 100*
5	Неотключающий дифференциальный ток $I\Delta_{т0}$	0,5 $I\Delta_н$
6	Включающая и отключающая (коммутационная) способность I_m, А	1500
7	Условный ток короткого замыкания (термическая стойкость) при последовательно включенной плавкой вставке 63 А, кА	10
8	Время отключения при номинальном дифференциальном токе $\tau_н$, не более, мс	30
9	Диапазон рабочих температур, °С	-25 °С+40 °С
10	Максимальное сечение подключаемых проводников, мм^2	25
11	Срок службы, не менее: электрических циклов механических циклов	 4000 10 000

* В зависимости от модификации устройства.

Требования к режимам работы. УЗО должно отключить защищаемую часть электроустановки при появлении в ней тока утечки синусоидального переменного, пульсирующего, постоянного (в зависимости от модификации), превышающего 0,5 номинального отключающего дифференциального тока.

Стандартные значения максимального времени отключения при любом рабочем токе нагрузки не должны превышать приведенных в табл. 3.5.

Номинальное время отключения $\tau_н$ УЗО приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

$\tau_н$*, с			
$I\Delta_н$	$2I\Delta_н$	$5I\Delta_н$	500 А
0,3	0,15	0,04	0,04

* $\tau_н$ - заданы для любого рабочего тока, не превышающего номинальный.

При высокой эффективности УЗО они не заменяют плавких предохранителей и автоматических выключателей.

Конструкция УЗО может отличаться способом технической реализации:

УЗО, функционально не зависящее от напряжения питания (электромеханические). Источником энергии, необходимой для функционирования – выполнения операции отключения, является ток утечки;

УЗО, функционально зависящее от напряжения питания (электронное). Их механизм для выполнения операции отключения нуждается в энергии, получаемой либо от контролируемой сети, либо от внешнего источника.

Применение электронных УЗО, для работы которых необходим источник питания, допускается только в качестве дополнительных (дублирующих).

Уставки УЗО выбираются на основе критериев электробезопасности с учетом тока нагрузки согласно табл. 3.6.

Таблица 3.6

Номинальный ток в зоне защиты, А	10, 16	25	40	63	100
Уставка при работе в зоне защиты одиночного потребителя, мА	10	10	30	30	30
Уставка при работе в зоне защиты группы потребителей, мА	30	30	30	100	100
Уставка УЗО противопожарного назначения на ВРУ (ВРЩ), мА	300	300	300	300	500

Селективность работы УЗО. Для обеспечения требований селективной работы нескольких УЗО в радиальных схемах электроснабжения необходимо учитывать следующие факторы.

В силу специфики технических параметров УЗО (в первую очередь их очень высокого быстродействия) практически невозможно обеспечить селективность действия УЗО по току при значениях уставок 10, 30, 100 мА. В этом диапазоне уставок селективность работы УЗО может быть обеспечена применением модификаций УЗО с выдержкой времени (УЗО с индексом «S»), имеющих задержку срабатывания 10-20 мс.

Селективность срабатывания по току утечки на землю может быть обеспечена при применении на вводе в качестве головного УЗО противопожарного назначения с уставками 300, 500 мА и на отходящих линиях (группах) УЗО с уставками 10,30 мА.

Таблица 3.7

Параметры	Типы устройств защитного отключения							
	УЗО 2	УЗО 10-2	УЗО 20	УЗО В	УЗЩ 10	ЗОУП 25	УЗО 25	АСТРО* УЗО
Напряжение, В	220					380		220/380
Частота, Гц	50…60	50…60	50	50…60	50	50		50…60
Номинальный ток, А	10-32	10	6,3-32	6	10	25		16-63
Номинальное значение уставки срабатывания по току утечки, мА	10, 30	10	10, 30	10	10	10	30	10, 30 100

Окончание табл. 3.7

Параметры	Типы устройств защитного отключения							
	УЗО 2	УЗО 10-2	УЗО 20	УЗО В	УЗЩ 10	ЗОУП 25	УЗО 25	АСТРО* УЗО
Время срабатывания, с	0,04	0,04	0,05	0,08	0,05	0,05	0,04	0,04
Потребляемая мощность, Вт	2,0	4,0	3,5	-	4,5	5,0	4,5	Нет
Рабочая температура, °С	-40 +55	-20 +55	-10 +40	-20 +40	-10 +35	-4 +40	-40 +55	-20 +45
Зависимость от колебаний напряжения сети	Зависит							Не зависит
Потребность в источнике питания	Требуется							Не требуется
Тип расцепителя	Электронно-электромагнитный							Электромеханический

Примечание. Для жилых, общественных и других зданий рекомендуется применять УЗО, не требующие источника питания (электромеханические). Например, АСТРО*УЗО.

Требования пожарной безопасности. Конструкция УЗО должна обеспечивать его пожарную безопасность как в нормальном режиме работы, так и при возникновении возможных неисправностей и нарушений правил эксплуатации.

При оценке УЗО на пожарную безопасность и возможность применения должны быть определены его показатели. Номенклатура показателей пожарной опасности и возможности применения определены НПБ 243-97 [44] Нормами пожарной безопасности.

Показатели пожарной опасности следует определять путем испытания стандартных образцов электроизоляционных материалов или образцов из состава деталей, комплектующих УЗО.

Конструкция УЗО должна исключать появление в процессе эксплуатации и испытаний на пожарную опасность пламени, дыма, размягчения и оплавления конструкционных материалов.

Качество УЗО должно быть гарантировано также сертификатом пожарной безопасности.

Не допускается применение УЗО для электроустановок, внезапное отключение которых может привести по технологическим причинам к возникновению ситуаций, опасных для пользователей (например, к отключению пожарной, охранной сигнализации и т.п.).

В настоящее время выпускаются УЗО двухполюсные (для однофазных электроустановок) и четырехполюсные (для трехфазных электроустановок).

Некоторые виды отечественных УЗО и их параметры представлены в табл. 3.7.

Глава 4

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

При оценке пожарной опасности наибольшего внимания заслуживают внутренние цеховые электрические сети, так как в них кабели и провода чаще всего располагаются открыто в виде пучков. Основными причинами, приводящими к загоранию горючего материала (изоляция, защитный покров оболочек) кабелей и проводов являются аварийные режимы работы электрооборудования. Например, возникновение КЗ сопровождается выбросом зажигающих частиц в виде горящих или расплавленных капель металла токопроводящих элементов. Токовая перегрузка кабелей и проводов, большие переходные сопротивления в местах их соединений, ответвлений и подключений к клеммным устройствам машин, аппаратов, светильников и других устройств приводят к перегреву токопроводящих жил и загоранию горючего материала (см. п. 1.3).

Наличие электрической защиты, выбранной в соответствии с нормами и правилами, не всегда гарантирует безопасное протекание аварийных режимов при появлении источника зажигания. Тем более, что, например, автоматические выключатели имеют надежность от 0,85 до 0,95. Кроме того, защитные характеристики автоматических выключателей и плавких предохранителей имеют значительный разброс, что в ряде случаев не позволяет обеспечить время срабатывания защиты до появления пожароопасных факторов (зажигающих частиц, нагрева проводников, воспламенения газообразных продуктов разложения изоляции и т.п.). С учетом большой протяженности сетей от них, как показывает статистика, происходит до 50 % случаев загораний и пожаров.

4.1. НАГРЕВ ПРОВОДНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

Пожарная безопасность электрических сетей определяется рядом факторов: соответствием марки проводника и способа прокладки характеру и свойствам окружающей среды, в том числе и ее пожаровзрывоопасности; соответствием сечения проводников токовой нагрузке; выбором номинальных параметров аппаратов защиты от токов перегрузки и коротких замыканий; соблюдением требований монтажа, эксплуатации и т.д.

Важным фактором обеспечения пожарной безопасности электрических сетей является допустимый нормами уровень нагрева проводников. Температура проводника, длительное время не находящегося под нагрузкой током, равна температуре окружающей среды. Если такой проводник нагрузить током неизменной величины I, его температура начнет увеличи-

ваться и постепенно достигнет установившейся величины $t_у$, соответствующей току I.

Представим отрезок провода, в котором с момента $\tau = 0$ появился ток I. Примем температуру среды равной нулю и рассмотрим превышение температуры провода t (τ) над температурой среды, т.е. перегрев провода. Тогда за время $d\tau$ в проводнике, имеющем активное сопротивление r, выделится тепловая энергия $Q_{выд} = I^2 r d\tau$. Часть этой энергии $Q_{нагр}$ будет затрачена на нагревание провода, другая часть $Q_{рас}$ будет путем лучеиспускания с поверхности провода, конвекции и теплопроводности рассеяна в окружающую среду:

$$Q_{нагр} = cmdt,$$

где c – теплоемкость провода, Дж/(кг); m – масса провода, кг;

$$Q_{рас} = \alpha t d\tau,$$

где α – коэффициент теплопередачи, Вт/ (м^2· °С).

Тогда получаем $Q_{выд} = Q_{нагр} + Q_{рас}$ или

$$I^2 r d\tau = cmdt + \alpha t d\tau. \qquad (4.1)$$

Разделив обе части уравнения (4.1) на $d\tau$, будем иметь однородное дифференциальное уравнение первого порядка с постоянными коэффициентами

$$I^2 r = P = cm(dt/d\tau) + \alpha t. \qquad (4.2)$$

Корень характеристического уравнения k получаем из выражения

$$cmk + \alpha = 0$$

или

$$k = -(\alpha/cm).$$

Общее решение запишется так:

$$t_1(\tau) = Ae^{-(\alpha\tau/cm)},$$

где A есть постоянная интегрирования, подлежащая определению.

Частное решение или установившийся перегрев получаем из уравнения (4.2), приравняв $dt/d\tau = 0$ (нет изменения перегрева).

Тогда $t_2 = t_у = P/\alpha$.

Итак, получаем:

$$t(\tau) = t_1 + t_2 = Ae^{-(\alpha\tau/cm)} + (P/\alpha). \qquad (4.3)$$

При τ = 0 перегрев равен нулю и из уравнения (4.3) имеем:

$$A + P/\alpha = 0 \quad \text{или} \quad A = -P/\alpha.$$

Таким образом, окончательно

$$t_1 = t(\tau) = (P/\alpha) - [(P/\alpha)\, e^{-(\alpha\tau/cm)}] = (P/\alpha)[1-e^{-(\alpha\tau/cm)}]$$

или

$$t(\tau) = t_y(1-e^{-\tau/T}), \qquad (4.4)$$

где $T = cm/\alpha$- постоянная времени нагрева проводника. Если $\tau = T$, за это время перегрев достигнет 0,632 t_y. Постоянную времени можно представить как время, в течение которого провод нагрелся бы до установившейся температуры t_y, если бы рассеяние тепла в окружающую среду отсутствовало. Значения T для некоторых типов проводников и условий прокладки приведены в литературе.

Этот процесс роста превышения температуры проводника от нуля до t_y может быть представлен кривой *ОВД* (рис. 4.1), уравнение которой имеет вид (4.4). По мере роста превышения температуры проводника отдача тепла в окружающую среду возрастает (кривая *ОВД*), поэтому процесс повышения температуры все больше замедляется и наконец наступает момент, когда разница между количеством тепла, отдаваемым поверхностью проводника в окружающую среду, и теплом, выделяемым в проводнике, становится неизменной. Следовательно, с достаточной точностью можно считать температуру нагреваемого проводника установившейся, если время τ равно от 4 до 5 T.

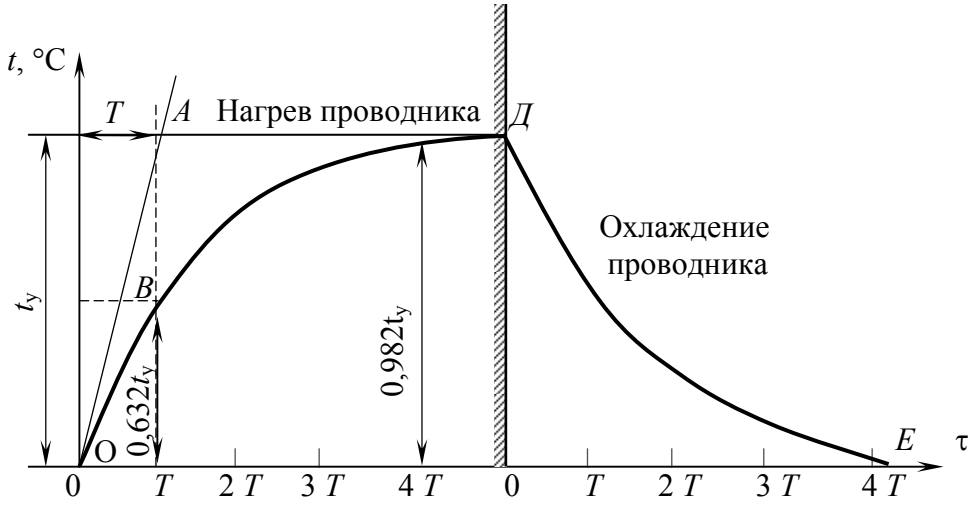


Рис. 4.1. Зависимость нагрева и охлаждения однородного проводника по формуле (4.4)

Если с проводника снять нагрузку I, превышение температуры проводника начинает понижаться от установившегося значения t_y и постепенно достигает нуля. Этот процесс охлаждения может быть изображен кривой *ДЕ*. Таким образом, можно аналитически и графически представить изменение превышения температуры проводника при любой переменной

нагрузке.

Для длительного режима работы, при котором допускаемый нагрев проводников обычно невелик, можно без заметной погрешности считать, что сопротивление проводника и коэффициент теплопроводности – величины постоянные. Но при увеличении температуры проводника увеличивается и его сопротивление. Следовательно, увеличивается и количество выделяющегося в нем тепла, хотя ток остается неизменным. Однако при повышении температуры проводника увеличивается перепад между температурой проводника и температурой среды, а это улучшает способность поверхности проводника рассеивать тепло (повышает коэффициент теплопроводности). В итоге увеличение количества выделяющегося тепла в определенной мере компенсируется увеличением теплоотдачи. При этих условиях установившееся превышение температуры проводника зависит только от тока и может быть определено выражением

$$t_{\text{у}} = t_{\text{у.н}} \, (I/I_{\text{доп}})^2, \tag{4.5}$$

где $t_{\text{у.н}}$ – допустимое превышение температуры, принятое по нормам ПУЭ для расчета длительно допустимого тока $I_{\text{доп}}$, °С; I – фактический ток, А.

Допустимое превышение температуры, принятое в ПУЭ при вычислении $I_{\text{доп}}$, определяется по формуле

$$t_{\text{у.н}} = t_{\text{ж.н}} - t_{\text{ср.н}}, \tag{4.6}$$

где $t_{\text{ж.н}}$ – длительно допустимая температура жил проводников по нормам, °С; $t_{\text{ср.н}}$ – расчетная температура среды по нормам, °С.

Чтобы обеспечить нормальный режим работы провода или кабеля, соединительных контактов и изоляции, а также пожарную безопасность, нагрев проводников ни при каких условиях не следует допускать выше температур, указанных в табл. 4.1. Нагрев проводников должен соответствовать данным табл. 4.1, даже и в том случае, когда расчетом установлено, что относительное старение изоляции за весь рассматриваемый период не выходит за пределы допустимого (не превышает единицы). При больших температурах могут быстро ухудшаться контакты, что обусловливает значительные переходные сопротивления и недопустимо большие местные нагревы. Все это приводит к резкому снижению механической прочности проводников, их устойчивости к КЗ, порче изоляции и ее воспламенению.

Таблица 4.1

Вид и материал проводника	Длительно допустимая температура жил по нормам $t_{ж.н}$, °С	Кратковременно допустимая температура жил при перегрузках $t_{п}$, °С	Максимально допустимое превышение температуры жил по нормам при токе КЗ $t_{у.н}$, °С	
Шины и голые провода:				
медные	70	125	300	
алюминиевые	70	125	200	
Кабели с бумажной пропитанной изоляцией при напряжении:			С медными жилами	С алюминиевыми жилами
до 3 кВ	80	125	200	150
до 6 кВ	65	100	200	150
до 10 кВ	60	90	200	200
Кабели и провода с резиновой и поливинилхлоридной изоляцией	65	110	150	150

Таблица 4.2

Место прокладки проводника	Температура среды по ПУЭ,°С
Открытая и защищенная прокладка проводов, кабелей и шин в воздухе (внутри помещений)	25
Один кабель с бумажной изоляцией при прокладке непосредственно в земле с удельным сопротивлением 120 Ом·см (тепловых)	15
То же, в земле (в трубах)	25
Кабели с бумажной изоляцией независимо от их числа при прокладке непосредственно в воде	15

Расчетные температуры среды $t_{ср.н}$, принятые в ПУЭ для определения длительно допустимых токов в проводниках в различных условиях их прокладки, приведены в табл. 4.2. Пользуясь табл. 4.2 и установившимся превышением температуры проводника $t_{у}$, подсчитанным по формуле (4.5) для нагрузки, отличной от длительно допустимой по нормам, можно определить фактическую температуру нагрева проводника

$$t_{ж} = t_{у} + t_{ср.н}. \qquad (4.7)$$

Расчеты по формулам (4.5) и (4.7) действительны для проводников с иной изоляцией и для иных температур среды, например для стран с тропическим климатом.

4.2. ДОПУСТИМАЯ НАГРУЗКА НА ПРОВОДНИКИ ПО НАГРЕВУ

Допустимая нагрузка на голые проводники. Нормирование предельно допустимых температур проводников (см. табл. 4.1) теоретически позволяет вывести соотношение между током и температурой нагрева жил. По этому соотношению можно определить допустимый длительный ток для данного сечения проводника в зависимости от температуры окружающей среды (см. табл.4.2) и материала жилы. Часть электрической энергии, передаваемой по проводникам, переходит в тепловую. Эта часть равна $Q = I^2 r\tau$. Тепловая энергия расходуется вначале на постепенное увеличение превышения температуры проводника, затем на поддержание установившегося превышения температуры $t_у$ во время работы, т.е. на компенсацию потерь тепла в окружающую среду. Количество тепла, отдаваемого проводником в окружающую среду, равно

$$Q_1 = \alpha F(t_ж - t_{ср.н})\tau, \qquad (4.8)$$

где α – коэффициент теплоотдачи при конвективном и лучистом теплообмене, Вт/(м^2 · °С); F – поверхность проводника, м^2; $t_ж$ – температура проводника, °С; $t_{ср.н}$ – расчетная температура окружающей среды, °С; τ – единица времени.

При установившемся режиме количество тепла, выделяемого в проводнике в единицу времени, должно быть равно количеству отданного тепла:

$$I^2 r\tau = \alpha F(t_ж - t_{ср.н})\tau,$$

откуда

$$I^2 = [\alpha F(t_ж - t_{ср.н})]/r. \qquad (4.9)$$

С другой стороны,

$$F = \pi d_1 l; \;\; r = l/\gamma S = 4l/\gamma\pi d^2,$$

где γ – удельная проводимость материала проводника, м/(Ом·мм^2); d_1 – диаметр проводника, м; l – длина проводника, м; S – площадь поперечного сечения проводника, мм^2.

Подставляя значения F и r в формулу (4.9), получаем

$$I = (\pi/2)\sqrt{\alpha d^3 \gamma (t_ж - t_{ср.н})}. \qquad (4.10)$$

Формула (4.10) позволяет определить ток по заданному перепаду температуры ($t_ж - t_{ср.н}$). По этой же формуле можно определить допустимый длительный ток $I_{доп}$ для голого проводника, исходя из заданной по нормам предельной температуры проводника $t_{ж.н}$ и расчетной температуры среды $t_{ср.н}$:

$$I_{доп} = (\pi/2)\sqrt{\alpha d^3 \gamma (t_{ж.н} - t_{ср.н})}. \qquad (4.11)$$

Пользуясь полученными соотношениями, можно по известным допус-

тимым значениям $I_{доп}$ и $t_{ж.н}$ определить значение I для любых других условий. Например, значение нового допустимого тока для новых допустимых условий нагрева проводника $t_ж$ получим путем деления выражений (см. формулы (4.10) и (4.11)):

$$I = I_{доп}\sqrt{(t_ж - t_{ср.н})/(t_{ж.н} - t_{ср.н})}. \qquad (4.12)$$

Аналогичные пересчеты можно сделать в случае изменения температуры окружающей среды $t_{ср}$ по сравнению с расчетной $t_{ср.н}$:

$$I = I_{доп}\sqrt{(t_{ж.н} - t_{ср})/(t_{ж.н} - t_{ср.н})} = I_{доп}K_t, \qquad (4.13)$$

где $K_t = (t_{ж.н}\text{-}t_{ср})/(t_{ж.н}–t_{ср.н})$ – поправочный коэффициент на измененную температуру окружающей среды по сравнению с расчетной [1].

Зная допустимый ток для проводника из данного материала (например, меди), можно определить допустимый ток для проводника из другого материала (например, алюминия). Для этого величину допустимого тока на алюминиевом проводнике $I_{а.доп}$, вычисленную по формуле (4.11), следует разделить на величину $I_{м.доп}$ при всех прочих равных условиях, т.е.

$$I_{а.доп}/I_{м.доп} = \sqrt{\gamma_а / \gamma_м}\ ,$$

где $\gamma_а = 31$ м/(Ом·мм^2); $\gamma_м = 53$ м/(Ом·мм^2). Тогда

$$I_{а.доп} = 0{,}77\ I_{м.доп}. \qquad (4.14)$$

Несмотря на то что допустимые токи для голых проводников, исходя из $t_{ж.н}$, $t_{ср.н}$ и материала жил, можно определить по формулам (4.11) - (4.14), в практических расчетах обычно пользуются готовыми таблицами допустимых длительных токов.

Допустимая нагрузка на изолированные проводники. Тепловые процессы в изолированных проводниках (провода и кабели) протекают так же, как и в голых проводниках. Однако электрическая изоляция и защитные оболочки несколько меняют условия охлаждения. При некоторых допущениях можно вывести зависимости для изолированных проводов и кабелей, аналогичные формулам (4.10) - (4.14). В практических же расчетах пользуются готовыми таблицами допустимых длительных токов (см. табл.1.3.4 – 1.3.28 [1]).

Расчетные допустимые длительные токи кабелей приняты для прокладки в траншее на глубине 0,7 – 1 м (не более одного кабеля) при температуре земли +15 °С. При иных температурах и числе кабелей вводятся поправочные коэффициенты (см. табл. 1.3.3 и 1.3.26 [1]). Допустимые токи одиночных кабелей, прокладываемых в трубах в земле без искусственной

вентиляции, должны приниматься такими же, как и для кабелей, прокладываемых в воздухе. Сечения кабелей на трассах с разными условиями охлаждения должны быть выбраны по участку трассы с худшими условиями охлаждения, если длина такого участка превышает 10 м. При большой протяженности кабельной трассы рекомендуется применять для участков с худшими условиями охлаждения кабельную вставку большего сечения, чтобы не увеличивать сечение всего кабеля.

При определении допустимых длительных токов для изолированных и неизолированных проводов и шин, проложенных в среде, температура которой существенно отличается от приведенной в табл. 4.2, вводятся поправочные коэффициенты (табл. 1.3.3 [1]).

4.3. ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Короткие замыкания в принципе возможны во всех электроустановках, в цепях или узлах которых протекает электрических ток. В параграфе 1.3 приведены причины, приводящие к коротким замыканиям в различных электроустановках.

В подавляющем большинстве случаев в результате коротких замыканий возникают токи, во много раз превышающие номинальные значения. Несмотря на кратковременность режимов коротких замыканий (секунды или доли секунды), а следовательно, и кратковременность протекания токов короткого замыкания, они во многих случаях способны вызвать как пожар электроустановки, так и пожар на объекте за счет обильного выделения тепла раскаленными проводниками или раскаленными частицами металла расплавленных проводников.

В проводнике при протекании по нему постоянного электрического тока теряется мощность

$$P = I^2R, \tag{4.15}$$

где I – действующий ток; R – сопротивление проводника.

При постоянном токе $R = \rho(l/S)$, где ρ – удельное сопротивление проводника, l, S – соответственно длина и поперечное сечение проводника.

При переменном токе потери возрастают за счет поверхностного эффекта и эффекта близости. Они учитываются коэффициентом дополнительных потерь $K_Д$

$$P = I^2RK_Д. \tag{4.16}$$

Протекание тока в течение времени τ приведет к выделению энергии

$$Pd\tau = I^2RK_Дd\tau. \tag{4.17}$$

Часть этой энергии расходуется на нагревание проводника, часть будет отведена в окружающее пространство (SK_Ttdt).

Для любого момента времени будет справедливо следующее уравнение теплового баланса:

$$Pd\tau = Mcdt + SK_Ttdt, \tag{4.18}$$

где M – масса проводника, кг; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); S – поверхность теплоотдачи проводника, м^2, t – превышение температуры проводника по отношению к окружающей среде, К; K_T – коэффициент теплоотдачи, Вт (м^2· К).

Превышение температуры проводника изменяется во времени по закону показательной функции (экспоненты). При коротком замыкании потери в проводнике возрастают в сотни раз.

Уравнение теплового баланса для случая короткого замыкания будет иметь вид

$$Pd\tau = Mcdt, \tag{4.19}$$

откуда

$$dt = (P/Mc)d\tau = (\rho K_Д/\gamma c)(i/S)^2 d\tau, \tag{4.20}$$

где i – мгновенный ток; ρ – удельное сопротивление; γ – плотность материала проводника; S – сечение проводника; $K_Д$ – коэффициент дополнительных потерь.

Для упрощения расчета будем считать величины ρ, c и i постоянными во времени. Тогда нарастание температуры при коротком замыкании составит:

$$t_{КЗ} = (\rho_г K_Д/\gamma c_г)I^2 t + t_д, \tag{4.21}$$

где I^2 – плотность тока; $t_д$ – допустимое превышение температуры над температурой окружающей среды в момент короткого замыкания (в начале); $\rho_г, c_г$ – значения для температуры нагретого проводника.

Нагрев проводника при коротком замыкании происходит практически по закону, показанному прямой на рис. 4.2. Охлаждение проводника после отключения короткого замыкания происходит по тем же законам, что и при нормальных режимах.

Следует отметить, что расчет токов короткого замыкания в сетях напряжением до 1000 В отличается от расчета короткого замыкания в сетях напряжением выше 1000 В тем, что в сетях напряжением выше 1000 В обычно учитывают только индуктивное сопротивление отдельных элементов цепи (генераторов, трансформаторов, линий, реакторов и т.д.), а их активное сопротивление учитывают лишь в отдельных случаях. В сетях на-

пряжением до 1000 В учитывается активное сопротивление даже весьма небольших участков питающих присоединений и шин. Учитывается активное сопротивление также таких элементов, как первичные обмотки многовитковых трансформаторов тока, силовых трансформаторов, токовых катушек, контактов автоматов, рубильников и т.д. Учитывается также и индуктивное сопротивление этих элементов.

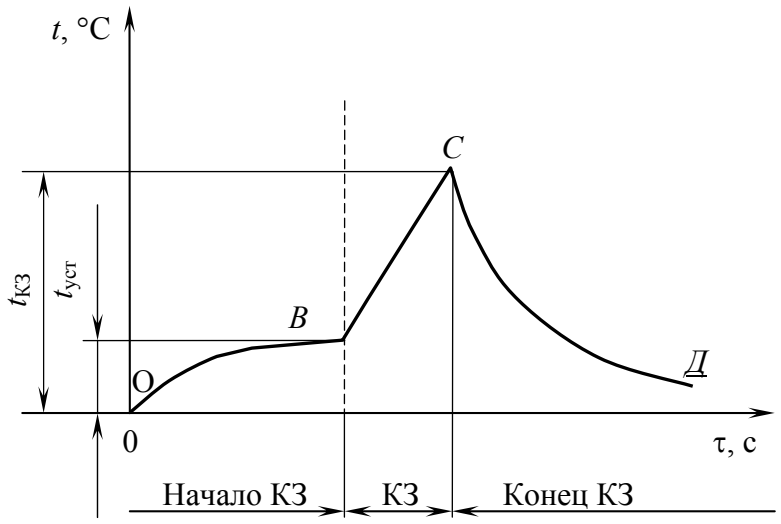


Рис. 4.2. Нагревание однородного проводника при коротком замыкании:
ОВ – нагревание при номинальном токе; *ВС* – то же при коротком замыкании; *СД* - охлаждение

Для потребителей напряжением до 1000 В мощность понижающих трансформаторов обычно невелика и редко превосходит 750–1000 кВА. Так как мощность питающих источников чаще всего $S_{сист} \geq 50\ S_{тр}$, это позволяет считать периодическую составляющую тока (и напряжение на выводах понижающего трансформатора) величиной, неизменной в течение всего процесса короткого замыкания: $I_{КЗ} \approx I_{уст}$.

Для практических целей оценка величин токов короткого замыкания в сетях напряжением до 1000 В может производиться по методике, изложенной в параграфе 3.4.

4.4. ПРОТИВОПОЖАРНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Внутрицеховые сети напряжением до 1000 В рассчитывают главным образом на допустимый ток по условиям нагревания проводников и на допустимую потерю напряжения. Такие расчеты необходимы для предупреждения опасного перегрева проводников, т.е. для создания условий пожарной безопасности и обеспечения электроприемников электроэнергией надлежащего качества. По экономической плотности тока проводники таких

сетей не проверяются.

Из двух сечений, определенных указанными расчетами, принимается большее. Принятое сечение должно быть не меньше сечения, регламентированного условиями механической прочности для данных условий прокладки. Без этого не может быть гарантирована не только пожарная безопасность, но и электробезопасность электрических сетей, осветительной или силовой установки в целом.

При проектировании электрических сетей одновременно с выбором минимально допустимого сечения проводников выбирают номинальные параметры аппаратов защиты.

Расчет сетей по условиям нагрева. Выбор аппаратов защиты

Защита электрических сетей плавкими предохранителями. При выборе сечения проводников сетей и номинальных токов плавких вставок предохранителей необходимо соблюдение следующих правил.

Правило 1. Для осветительных сетей номинальный ток плавкой вставки предохранителя во всех случаях должен быть больше или равен рабочему току, т.е.

$$I_{\text{н.вст}} \geq I_{\text{р}}. \tag{4.22}$$

Правило 2. Для осветительных сетей, не подлежащих обязательной защите от токов перегрузки, номинальный ток плавкой вставки предохранителя должен быть меньше или равен длительно допустимому току для выбираемого сечения, т.е.

$$I_{\text{н.вст}} \leq I_{\text{доп}}. \tag{4.23}$$

Для силовых сетей характерны электроприемники со значительными пусковыми токами, превышающими их номинальные токи в 4-8 раз (например, у асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором). Пусковой ток электродвигателя при разгоне ротора падает в течение 10 с до рабочего тока при легком пусковом режиме (электродвигатели металлообрабатывающих станков, вентиляторов, насосов и т.п.) и в течение 40 с – при тяжелом пусковом режиме (электродвигатели центрифуг, дробилок, транспортерных устройств, кранов и т.п.). В то же время (см. параграф 3.1) плавкий элемент вставки должен, не расплавляясь, выдерживать ток, равный $(1{,}3—1{,}6)I_{\text{н.вст}}$ в течение 1 ч.

Таким образом, в силовых сетях выбор $I_{\text{н.вст}}$ следует производить по правилу 3.

Правило 3. В силовых или смешанных сетях номинальный ток плавкой вставки должен быть больше или равен максимальному кратковременному току, протекающему через предохранитель, деленному на ко-

эффициент α, т.е.

$$I_{\text{н.вст}} \geq I_{\text{макс}}/\alpha, \qquad (4.24)$$

где $I_{\text{н.вст}}$ – расчетная величина номинального тока плавкой вставки, А; α – коэффициент, зависящий от режима перегрузки предохранителя, его типа и условий пуска электродвигателей. Значения α приведены в табл. 4.3; $I_{\text{макс}}$ – наибольшая величина кратковременного тока, протекающего через предохранитель (зависит от вида защищаемой сети), А.

Таблица 4.3

Типы и марки предохранителей		Материал вставки	Рекомендуемые значения	
			для легких условий пуска электродвигателя и самозапуска его при холостом ходе аппарата	для тяжелых условий пуска электродвигателя и самозапуска его при нагруженном аппарате
Инерционные	Ц-27, Ц-33 при $I_{\text{н.вст}} \leq 35$ А, СПО и ПТ	Свинец Медь	Выбирают только по правилу 1 $I_{\text{н.вст}} \geq I_{\text{р}}$	3,75
Малоинерционные	ПР-2, П при $I_{\text{н.вст}} \geq 35$ А	Цинк Медь	3	2
Безынерционные	Ц-33 при $I_{\text{н.вст}} = 60$ А; КП, НПН, НПР, П при $I_{\text{н.вст}} < 35$ А	Серебро Медь	2,5	1,6
Быстродействующие	ПНБ-2		По номинальному току электроприемника	

При отсутствии данных, позволяющих воспользоваться табл. 4.3 для электродвигателей с короткозамкнутым ротором, α принимается равным 2,5; для электродвигателей ответственных механизмов (с целью особо надежной отстройки предохранителей от пусковых токов) допускается принимать α равным 1,6 (независимо от условий пуска электродвигателя). Для ответвлений к одиночным асинхронным электродвигателям

$$I_{\text{макс}} = I_{\text{пуск}} = I_{\text{н}} K_{\text{п}}, \qquad (4.25)$$

где $I_{\text{пуск}}$ – пусковой ток электродвигателя; $I_{\text{н}} = P_{\text{н}} 10^3 / \sqrt{3U_{\text{н}}} \cdot \cos\varphi_{\text{н}} \eta_{\text{н}}$ – номинальный ток электродвигателя; $K_{\text{п}}$ – кратность пускового тока (для электродвигателей с короткозамкнутым ротором $K_{\text{п}}$ = 4-8; с фазным ротором $K_{\text{п}}$ = 1,5-2,5).

Для сетей, питающих n электродвигателей,

$$I_{\text{макс}} = \Sigma I_{p(n\text{-}1)} K_0 + I_{\text{пуск}}, \quad (4.26)$$

где – $\Sigma I_{p(n\text{-}1)}$ – сумма рабочих токов всех электродвигателей без одного, имеющего наибольший пусковой ток; K_0 – коэффициент одновременности, учитывающий присоединенную мощность фактически работающих электродвигателей; $I_{\text{пуск}}$ – пусковой ток электродвигателя, имеющего наибольшую его величину.

Рабочий ток электродвигателей определяется по формуле

$$I_{\text{р}} = I_{\text{н}} K_{\text{з}}, \quad (4.27)$$

где $K_{\text{з}}$ – коэффициент загрузки электродвигателей, т.е. отношение действительной загрузки электродвигателя к номинальной (при отсутствии сведений о загрузке электродвигателя и для ответвлений к одному электродвигателю $K_{\text{з}}$ принимается равным 1).

При расчете ответвлений с короткозамкнутым электродвигателем во взрывоопасных зонах (за исключением В-16 и В-Iг) рабочий ток электродвигателя определяется по формуле

$$I_{\text{р}} = 1{,}25 I_{\text{н}}. \quad (4.28)$$

После определений $I_{\text{н.вст}}$ по формулам (4.23), (4.24) и соответствующему каталогу или табл.1 прил.1 выбирают $I_{\text{н.вст}}$ равным или ближайшим большим для данного типа предохранителя. Необходимое сечение провода или кабеля сети определяют по таблицам допустимых длительных токов нагрузок [1] с учетом правила 4.

Правило 4. Допустимый длительный ток провода или кабеля должен быть равен рабочему току электроприемников или большем его, т.е.

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{р}}. \quad (4.29)$$

Рабочий ток нагрузки в осветительных и силовых сетях определяется расчетом. Выбранный предохранитель в зависимости от вида защищаемой сети должен удовлетворять формулам (3.8), (4.22), (4.23), (4.24), а по условию надежности отключения токов КЗ, отключающей способности и селективности действия – формулам (3.12), (3.13), (3.19), (3.22), (3.23) и (3.24).

Защита электрических сетей автоматическими выключателями или тепловыми реле. Выбор номинальных токов тепловых расцепителей $I_{\text{н.тепл}}$ или нагревательного элемента теплового реле магнитного пускателя $I_{\text{н.нагр}}$, а также номинальных токов электромагнитных расцепителей $I_{\text{н.эл.м}}$ следует производить по формуле (3.9). Чтобы избежать ложного отключения сети, правильность выбора указанных параметров необходимо проверить по формулам (3.10) и (3.11). Выбор сечений проводов и кабелей при защите сетей автоматами производится так же, как и в случае защиты сетей предохранителями, т.е. по правилу 4.

Выбранный автомат в необходимых случаях должен быть проверен на

отключение аварийного участка при КЗ в конце защищаемой сети по формулам (3.12) и (3.13), а его отключающая способность должна соответствовать токам КЗ в начале защищаемого участка сети (согласно формуле (3.19)). Кроме того, автоматы проверяют на селективность действий (см. параграф 3.4).

Особенности выбора сечений проводников сетей, подлежащих обязательной защите от перегрузки. Защите от токов перегрузки подлежат:

сети внутри помещений с открыто проложенными незащищенными проводами с наружными горючими оболочкой или изоляцией, а также выполненные защищенными проводниками, проводниками, проложенными в трубах, несгораемых строительных конструкциях и т.п.

осветительные сети в жилых и общественных зданиях, торговых помещениях, служебно-бытовых помещениях промышленных предприятий, включая сети для бытовых и переносных электроприемников, а также в пожароопасных зонах;

силовые сети на промышленных предприятиях, в жилых и общественных зданиях, торговых помещениях в случае, когда по условиям технологического процесса или режиму работы может возникать длительная перегрузка проводов и кабелей;

сети всех видов во взрывоопасных зонах (за исключением зон В-1б и В-Iг) независимо от условий технологического процесса или режима работы. Во всех остальных случаях сети защищаются лишь от токов КЗ.

Сечения сетей, защищаемых от перегрузки, следует выбирать также по правилу 4. При этом допустимый длительный ток проводников $I_{доп}$ должен быть не менее:

а) 125 % номинального тока плавкой вставки или тока уставки автоматического выключателя, имеющего только максимальный мгновенно действующий (электромагнитный) расцепитель, для проводников с резиновой и аналогичной по тепловым характеристикам изоляцией. Такой способ определения допустимого тока распространяется на проводники, прокладываемые вне взрывопожароопасных зон промышленных предприятий. Для них применима формула (4.23). Это объясняется тем, что плавкие вставки предохранителей, а также электромагнитные расцепители автоматов сравнительно малочувствительны к малым перегрузкам, поэтому сечение проводников приходится выбирать не по рабочему току, а по току, близкому к току срабатывания защиты, т. е.

$$I_{доп} \geq 1{,}25\, I_{н.вст},$$

$$I_{доп} \geq 1{,}25\, I_{ср.эл.м}; \qquad (4.30)$$

б) 100 % номинального тока плавкой вставки или тока уставки авто-

матического выключателя, имеющего только максимальный электромагнитный расцепитель, для кабелей с бумажной изоляцией;

в) 100 % номинального тока теплового расцепителя автоматического выключателя с нерегулируемой характеристикой (независимо от наличия или отсутствия отсечки) для проводников всех марок, т.е.

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{н.тепл}}; \tag{4.31}$$

г) 100 % тока трогания тепловых расцепителей автомата с регулируемой характеристикой для проводов и кабелей с резиновой и аналогичной по тепловым характеристикам изоляцией;

д) 100 % номинального тока электродвигателя для проводников ответвлений к короткозамкнутым электродвигателям в невзрывоопасных помещениях, а также в зонах классов В-1б и В-1г;

е) 80 % тока трогания тепловых расцепителей автомата с регулируемой характеристикой для кабелей с бумажной изоляцией.

Если допустимый длительный ток в проводнике, определенный по пунктам а, б, в, г, д, е, не совпадает с данными таблиц допустимых нагрузок, возможно применение ближайшего меньшего сечения, но не менее, чем это требуется по формуле (4.29).

Особенности выбора сечения проводников сетей, защищаемых только от токов КЗ. Эти сечения выбирают таким образом, чтобы исключался недопустимый их перегрев. Недопустимый перегрев проводников будет тогда, когда номинальные токи плавких вставок предохранителей или уставок автоматов окажутся намного больше допустимых токов проводников. Поэтому номинальные токи плавких вставок предохранителей и уставок в проводниках должны иметь кратность:

при защите предохранителями

$$I_{\text{н.вст}} / I_{\text{доп}} \leq 3; \tag{4.32}$$

при защите автоматами только с максимальными электромагнитными расцепителями (отсечка)

$$I_{\text{ср.эл.м}} / I_{\text{доп}} \leq 4{,}5; \tag{4.33}$$

при защите автоматами с тепловыми расцепителями без регулирования тока срабатывания (независимо от наличия или отсутствия отсечки)

$$I_{\text{н.тепл}} / I_{\text{доп}} \leq 1; \tag{4.34}$$

при защите автоматами с тепловыми расцепителями, имеющими регулировку тока срабатывания (если у автоматов есть электромагнитные расцепители, кратность их тока срабатывания не ограничивается)

$$I_{\text{ср.тепл}}/I_{\text{доп}} \leq 1{,}5. \tag{4.35}$$

Допускаемое загрубление защиты по формулам (4.32) и (4.33) следует применять в тех случаях, когда в этом есть необходимость, т.е. в таких местах и сетях, в которых воспламенение изоляции не грозит пожаром или взрывом, и только для проводников, проложенных в трубах или имеющих негорючие оболочки. В некоторых случаях, например для надежной отстройки от токов самозапуска электродвигателей, допускается завышение номинальных токов плавких вставок предохранителей и уставок автоматов по сравнению с величинами, приведенными в формулах (4.32) и (4.33), если кратность тока КЗ по формуле (3.13) не менее 5 для предохранителей и не менее 1,5 для автоматов с электромагнитными расцепителями.

Расчет сетей по потере напряжения

Влияние напряжения на работу электроприемников. Нормальная работа электроприемников протекает при номинальном напряжении, соответствующем их паспортным данным. Любое отклонение подведенного напряжения от номинального ухудшает работу электроприемников и условия техники безопасности, а иногда увеличивает пожаровзрывоопасность применяемого электрооборудования. Например, понижение номинального напряжения на 10 % у асинхронных электродвигателей при номинальной нагрузке на валу приводит к увеличению тока статора и повышению температуры обмотки. Наоборот, повышение напряжения сверх номинального на 10 % вызывает увеличение вращающего момента и пускового тока, уменьшение коэффициента мощности. Значительное снижение напряжения может привести к остановке или невозможности запуска электродвигателя, приводящего в движение механизм с тяжелыми условиями пуска.

У электрических ламп накаливания понижение напряжения по сравнению с номинальным на 5 % вызывает уменьшение светового потока лампы на 17 %, а повышение напряжения на 3 % сокращает срок службы ламп с нормированных 1000 до 555 ч. Изменение напряжения влияет также на срок службы газоразрядных ламп и пускорегулирующих аппаратов (ПРА). У электронагревательных приборов (утюги, электрокамины, плитки и т.п.) при повышении напряжения сокращается срок службы, при понижении – резко уменьшается мощность, отдаваемая приборам. Следовательно, увеличивается время, необходимое для нагревания приборов.

Так как напряжение сильно влияет на работу электроприемников, необходимо так проектировать и эксплуатировать сеть, чтобы электроприемники работали под напряжением, близким к номинальному. Отклонение напряжения на зажимах электродвигателей от номинального должно быть не более ± 5 % (в отдельных случаях допускаются отклонения выше номинального до 10 %). Снижение напряжения у наиболее удаленных ламп

внутреннего рабочего освещения промышленных предприятий жилых и общественных зданий, а также аварийного наружного освещения должно быть не более 5,0 % номинального напряжения ламп. Для отдельных потребителей устанавливаются специальные требования к допустимым отклонениям напряжения.

Из обычных потребителей наиболее жесткие требования к допустимому отклонению напряжения предъявляются в осветительных установках. Однако это не означает, что и потеря напряжения в осветительной сети не должна быть более 5 %. Между допустимой величиной снижения напряжения на источниках света и допустимой потерей напряжения в осветительной сети имеется существенная разница. Это объясняется тем, что в цеховых трансформаторах, питающих установки напряжением до 1000 В, вторичное напряжение при холостом ходе (без нагрузки) выше номинального на 5 % (с регулировкой в пределах ± 5 %). Например, если номинальное напряжение сети равно 380/220 В, вторичное номинальное напряжение при холостом ходе трансформатора равно 400/230 В. Следовательно, напряжение между фазными и нулевыми проводами на шинах подстанции при холостом ходе трансформатора будет 230, а не 220 В.

Когда трансформатор нагружается, ток в его обмотках вызывает потерю напряжения, которая зависит от мощности трансформатора, степени его загрузки, коэффициента мощности питаемых потребителей и некоторых других причин.

В табл. 1 прил. 2 указаны допустимые потери напряжения $\Delta U_{\text{доп}}$ в процентах в осветительной и силовой сетях при питании от трансформаторов различной мощности. В сетях напряжением 12 и 36 В потеря напряжения допускается до 10 %, считая от выводов низкого напряжения понижающих трансформаторов (независимо от их мощности).

При расчете сетей на потерю напряжения необходимо иметь в виду два случая. В первом случае по заданному сечению проводов в линии определяют потерю напряжения $\Delta U_{\text{ф}}$ и, сравнивая ее с допустимым значением $\Delta U_{\text{доп}}$, делают вывод о соответствии сечения проводов. Например, выбор сечений проводов для силовых сетей обычно производят вначале по допустимому нагреву, а затем уже проверяют на допустимую потерю напряжения. Этот случай характерен для выполнения пожарно-технической экспертизы проекта или пожарно-технического обследования действующих электроустановок.

Во втором случае по заданной величине $\Delta U_{\text{доп}}$ определяют необходимое сечение проводников сетей. Этот случай характерен для стадии разработки проектного решения, т.е. при расчете, например, осветительных сетей, для которых определяющим является расчет на допустимую потерю напряжения. Выбранное сечение проводников по этому условию затем

проверяют по допустимому нагреву.

Расчет сети по потере напряжения без учета индуктивности проводников. Потерю напряжения ΔU в трехфазовой линии с нагрузкой, сосредоточенной в конце линии (рис. 4.3), в общем случае определяют по формуле

$$\Delta U = 1{,}73\, I\, l\, (r_0 \cos\varphi_0 + x_0 \sin\varphi), \qquad (4.36)$$

где I – ток нагрузки, А; l – длина нагрузки, км; r_0 – активное сопротивление, Ом/км; x_0 – индуктивное сопротивление, Ом/км; cos φ – коэффициент мощности нагрузки.

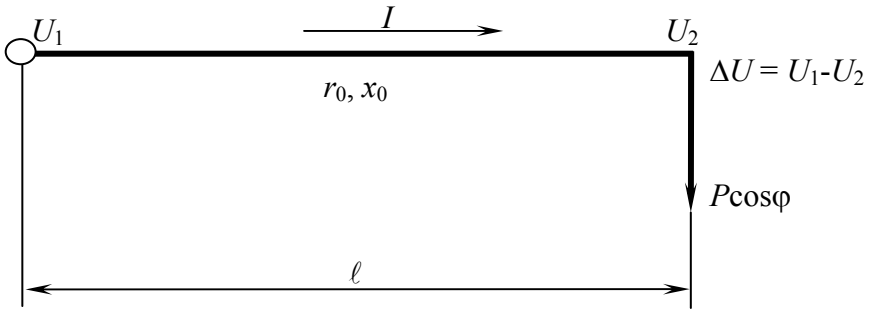


Рис. 4.3. Схема сети с нагрузкой на конце

Активное и индуктивное сопротивления r_0 и x_0 линии определяются по справочным таблицам или расчетом. Индуктивное сопротивление линии зависит от расстояния между проводами. Например, для кабельных линий и проводов в стальных трубах, у которых расстояние между жилами невелико, индуктивное сопротивление очень мало (0,06–0,08 Ом/км). У проводов, проложенных внутри зданий на роликах и изоляторах на расстоянии друг от друга 50–150 мм, индуктивное сопротивление увеличивается и составляет 0,2–0,25 Ом/км. Для сетей постоянного тока, а также для сетей только с осветительной нагрузкой и нагрузкой от электронагревательных приборов и устройств (у которых cos φ = 1, а следовательно, sin φ = 0) индуктивностью проводов всегда можно пренебречь.

Таким образом, при расчете сетей по потере напряжения индуктивностью проводников можно пренебречь в сетях: постоянного тока, переменного тока с частотой 50 Гц и cos φ =1; выполненных проводами и кабелями сечением до 6 мм^2 включительно и проводами или кабелями внутри зданий, если их сечения не превосходят указанных в табл. 4.4

Таблица 4.4

Материал проводника	Коэффициент мощности	Сечение проводников, мм^2				
		кабелей		проводов		
		до 1 кВ	6-10кВ	в трубах	на роликах	на изоляторах

Медь	0,95	70	50	50	25	16
	0,9	50	35	35	16	10
	0,85	35	25	35	10	10
	0,8	35	25	25	10	6
	0,75	25	16	16	6	6
	0,7	25	16	16	6	6
Алюми-	0,95	120	95	95	35	25
ний	0,9	95	50	50	25	16
	0,85	70	50	50	16	16
	0,8	50	35	35	10	10
	0,75	50	25	25	10	10
	0,7	35	25	25	10	6

Формула для определения необходимого сечения проводников сетей по заданной величине $\Delta U_{доп}$ может быть выведена так. Пусть линия постоянного тока имеет три нагрузки (рис. 4.4) и одинаковое сечение из металла с удельным сопротивлением ρ на всем протяжении.

Если допустимая потеря напряжения от точки 0 до 3 равна $\Delta U_{доп}$, то

$$\Delta U_{доп} = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3,$$

где в правой части равенства – потери напряжения на участках. Они равны:

$$\Delta U_1 = r_1 I_1 = \rho(2l_1/S)\, I_1; \quad \Delta U_2 = r_2 I_2 = \rho(2l_2/S)\, I_2; \quad \Delta U_3 = r_3 I_3 = \rho(2l_3/S) I_3.$$

Следовательно,

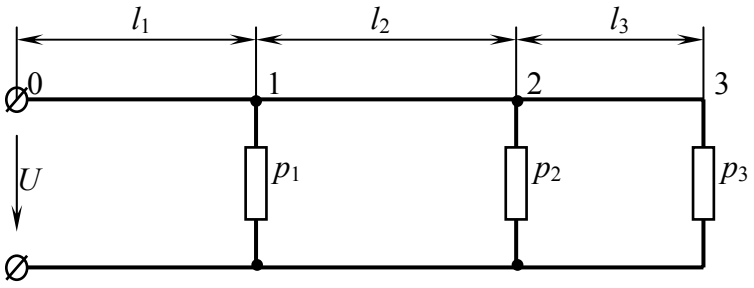
$$\Delta U_{доп} = (2\rho/S)\,(l_1 I_1 + l_2 I_2 + l_3 I_3). \quad I_1 = P_1/U_н = (p_1 + p_2 + p_3)/\,U_н;$$

$$I_2 = P_2/U_н = (p_2 + p_3)/U_н; \quad I_3 = P_3/U_н = p_3/U_н.$$

Ввиду небольшой потери напряжения $\Delta U_{доп}$ можно принять напряжение между проводами в любом месте линии равным номинальному. Тогда получим

$$\Delta U_{доп} = (2\rho/SU_н)\,[(l_1(p_1 + p_2 + p_3) + l_2(p_2 + p_3) + l_3 p_3] =$$

$$= (2\rho/SU_н)\,[P_1 l_1 + P_2(l_1 + l_2) + P_3(l_1 + l_2 + l_3].$$



а

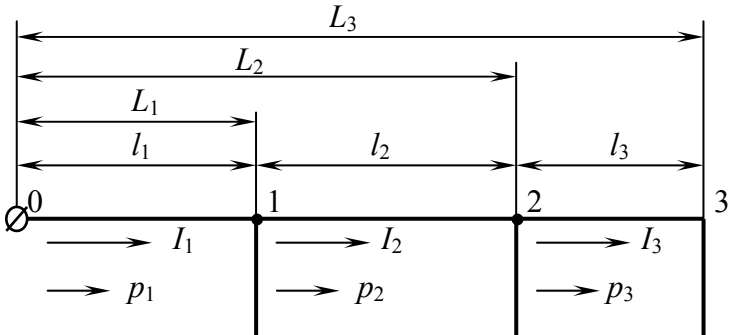


Рис. 4.4. Схема определения необходимого сечения проводника по $U_{доп}$:
а – схема линии; *б* – расчетная схема (масштабы не соблюдены)

Согласно рис. 4.4, $l_1 = L_1$; $l_1 + l_2 = L_2$ и $l_1 + l_2 + l_3 = L_3$.

Следовательно, L_1, L_2 и L_3 есть «плечи» нагрузок P_1, P_2 и P_3 (аналогично плечам механических сил при расчетах балок).

Итак,

$$\Delta U_{доп} = (2\rho/SU_н)\,(P_1 L_1 + P_2 L_2 + P_3 L_3) = \\ = (2\rho / SU_н)\sum_1^3 P_к L_к = (2\rho / SU_н)\sum_1^n M_к . \qquad (4.37)$$

Величина $\sum_1^n M_к$ представляет собой сумму моментов электрических нагрузок (мощностей) относительно начала линий.

Из формулы (4.37) получаем сечение при заданных $\Delta U_{доп}$ в В и любом числе нагрузок в Вт:

$$S = (2\rho/U_н\Delta U_{доп}) \sum_1^n P_к L_к. \qquad (4.38)$$

Если перейти к $\Delta U_{доп}$ в процентах и $P_к$ в кВт, получим

$$S = (2\rho 10^5/U_н\Delta U_{доп}) \sum_1^n P_к L_к. \qquad (4.39)$$

Обозначив $\left(\frac{2\rho 10^5}{U_н^2}\right)^{-1}$ через c, будем иметь

$$S = \sum_1^n P_к L_к/c\Delta U_{доп} \qquad (4.40)$$

или

$$S = \sum_1^n М_к/c\Delta U_{доп}, \qquad (4.41)$$

где S – сечение жилы провода или кабеля, мм^2; $\sum_1^n M_к = \Sigma P_к L_к$ – сумма моментов, кВт · м; $P_к$ – расчетная мощность нагрузки, кВт (для ламп накаливания $P = \Sigma P_н K_с$; для люминесцентных ламп $P = 1{,}25\Sigma P_н K_с$; для ртутных ламп типа ДРЛ $P = 1{,}12\Sigma P_н K_с$; для отдельных электродвигателей $P = P_Н$; для группы электродвигателей $P = \Sigma P_н K_с$); $L_к$ – расстояние от начала рассматриваемого участка линий до нагрузки, м; c – коэффициент, учитывающий напряжение, систему питания и материал проводов (см. табл.2 прил. 2); $\Delta U_{доп}$ – допустимая потеря напряжения для рассчитываемого участка линии, %.

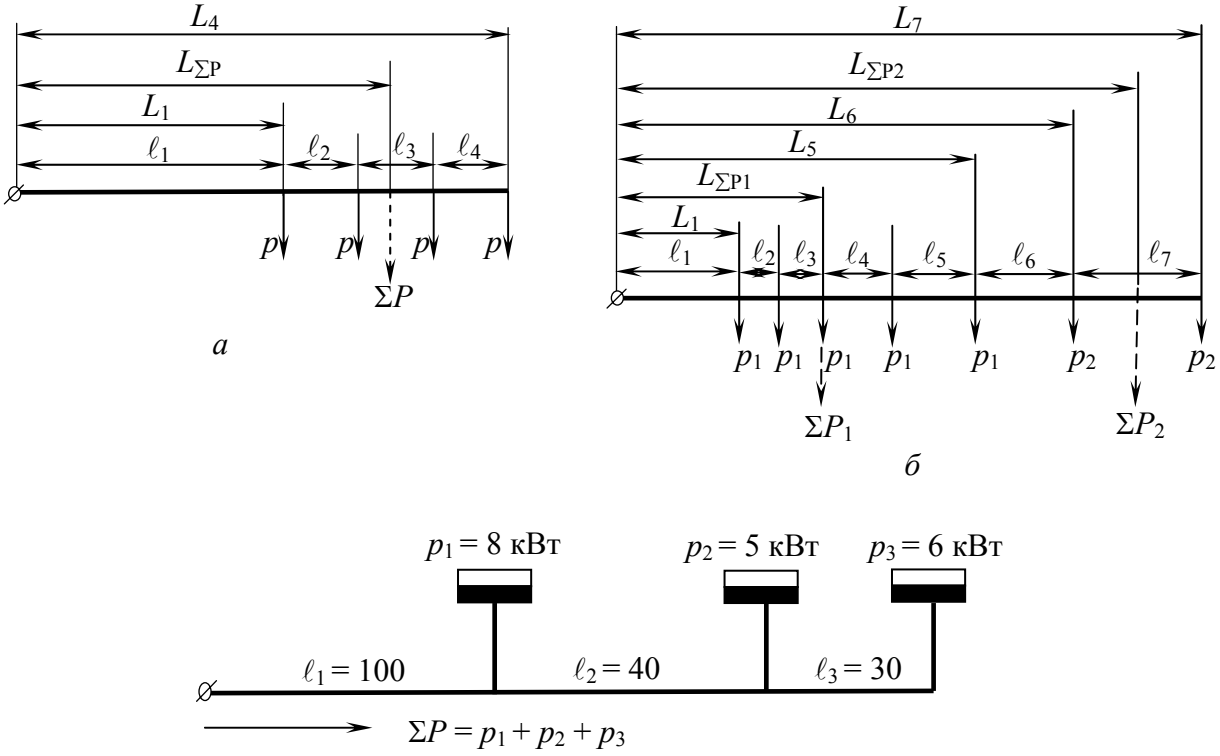
Общая допустимая потеря напряжения на всех участках осветительной (или силовой) линии от ТП до наиболее удаленной лампы рассчитываемого участка определяется по табл.1 прил.2. Так как осветительная сеть от ТП до светильников состоит обычно из двух отдельных звеньев (питающего и группового), необходимо определить, какая часть общей допустимой потери напряжения должна быть отнесена к питающей сети и какая – к групповой.

Наивыгоднейшее распределение общей допустимой потери напряжения между этими звеньями должно быть определено в каждом конкретном случае путем выполнения специальных довольного громоздких расчетов. Следует учитывать, что чем большую протяженность имеет питающая сеть, тем большую часть общей допустимой потери напряжения целесообразно к ней отнести. Во многих случаях бывает достаточно принять потерю напряжения в групповой сети, равной 1,5–2,0 %, а остальную часть терять в питающей сети.

Значение коэффициента спроса $K_с$ для расчета питающей сети рабочего освещения следует принимать: 1 – для торговых помещений, мелких зданий производственного характера и линий, питающих отдельные групповые щитки; 0,95 – для производственных зданий, состоящих из отдельных крупных пролетов; 0,9 – для библиотек, зданий административного назначения и помещений общественного питания; 0,85 – для производственных зданий, состоящих из нескольких отдельных помещений; 0,8 – для лечебных, детских и учебных учреждений, бытовых и лабораторных зданий.

При расчете групповой сети рабочего освещения зданий, всех звеньев аварийного освещения, а также сети наружного освещения следует принимать $K_с = 1$. Значение коэффициента спроса для силовых установок зависит от режима работы механизмов, приводимых в действие электродвигателями. Поэтому их устанавливают для групп технологического оборудования: станков, вентиляторов, насосов, сварочных установок, трансформаторов и т.п.

Определение суммы моментов ΣM зависит от характера распределения нагрузки и в практических расчетах может быть упрощено. Когда нагрузка равномерно распределена вдоль всей линии (рис.4.5, *а*) или по отдельным ее участкам (рис. 4.5, *б*), суммарная нагрузка прикладывается в середине сосредоточения отдельных нагрузок (аналогично для равномерно распределенных сил при расчете балок).



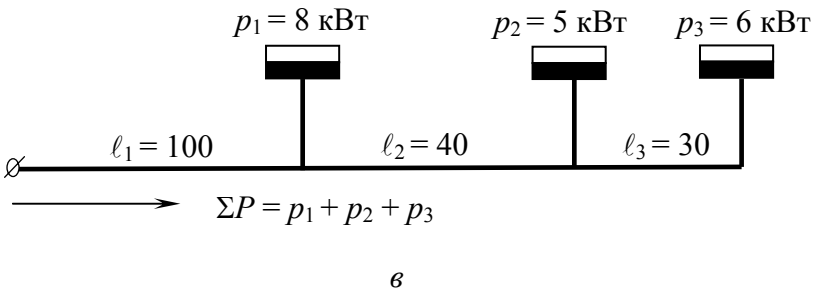


Рис. 4.5. Пример упрощенного определения моментов нагрузки:
а – при равномерном распределении; *б* – при неравномерном распределении по отдельным участкам линии; *в* – при разных сечениях и нагрузках

Для линии, согласно рис. 4.5, *а*,

$$\Sigma M = \Sigma P(l_1 + l_2 + l_{3/2}) = \Sigma P\,[(L_1 + L_2)/2] = \Sigma PL. \qquad (4.42)$$

Для линии, согласно рис. 4.5, *б*,

$$\Sigma M = M_1 + M_2 = \Sigma P_1(l_1 + l_2 + l_3) + \Sigma P_2(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6 + l_{7/2})$$

или

$$\Sigma M = \Sigma P_1[(L_1 + L_5)/2] + \Sigma P_2[(L_6 + L_7)/2] = \Sigma P_1 L_{p_1} + \Sigma P_2 L_{p_2}. \qquad (4.43)$$

Если по известному сечению проводов участка сети для него необходимо определить фактическую потерю напряжения ΔU_ϕ в процентах (например, при экспертизе проектных материалов или эксплуатируемой сети), пользуются следующей формулой, вытекающей из формулы (4.41):

$$\Delta U_{ф} = \Sigma M/cS. \qquad (4.44)$$

Часто при расчете по формуле (4.41) сечение проводов получается больше или меньше стандартного. В таких случаях выбирается ближайшее большее или меньшее стандартное сечение, а фактическая потеря напряжения определяется по формуле

$$\Delta U_{ф} = \Delta U_{доп} = (S_{р}/S_{с}), \qquad (4.45)$$

где $S_{р}$ – сечение проводов, полученное по расчету, мм^2; $S_{с}$– принятое стандартное сечение проводов, мм^2 .

Если сеть состоит из нескольких участков (рис.4.5, *в*) с различным сечением проводников и разными нагрузками, определение потерь напряжения (в процентах) производится для отдельных участков, а суммарная потеря напряжения будет суммой потерь на всех участках:

$$\Sigma\Delta U_{ф} = \Delta U_{ф1} + \Delta U_{ф2} + \Delta U_{ф3} = (M_1/cS_1) + (M_2/cS_2) + (M_3/cS_3), \qquad (4.46)$$

где

$$\Delta U_{ф1} = M_1/cS_1 = [(p_1 + p_2 + p_3)l_1]/cS_1;$$

$$\Delta U_{ф2} = M_2/cS_2 = [(p_2 + p_3)l_2]/cS_2;$$

$$\Delta U_{ф3} = M_3/cS_3 = p_3l_3/cS_3.$$

Расчетные формулы (4.37) – (4.46) позволяют определять потери напряжения в сети при заданных ее параметрах (конфигурация, протяженность, места и величины приложенных нагрузок, сечение проводов) или сечение проводов отдельных участков (по допустимым или заданным потерям напряжения, передаваемой нагрузке, протяженности участков).

Экономичность запроектированной сети может быть обоснована лишь в том случае, если расход проводникового материала в данной сети был наименьшим. Поэтому в целях экономии проводникового материала сечения проводников осветительной сети выбирают в большинстве случаев неодинаковыми на разных участках. Задача расчета сети на наименьшую затрату проводникового материала сводится в общем виде к решению вопроса, как распределить расчетные потери напряжения между отдельными участками сети, чтобы обеспечить наименьший расход проводникового материала.

Таким образом, если необходимо рассчитать разветвленную сеть (рис. 4.5, *в*) и при этом соблюсти условия, обеспечивающие минимальный расход проводникового материала, сечение каждого участка сети определяют по формуле

$$S = (\Sigma M + d\Sigma m)/c\Delta U, \qquad (4.47)$$

где S – сечение рассчитываемого участка сети, мм^2; ΣM – сумма моментов

данного участка сети и всех последующих (по направлению потока энергии) участков с тем же числом проводов в линии, что и в рассматриваемом участке, кВт·м. В этом случае все моменты участков с другим числом проводов умножают на коэффициент приведения моментов *d*. Коэффициент *d* зависит от числа проводов рассчитываемого участка и ответвлений (табл. 4.5); ΔU – расчетные потери напряжения, допускаемые от начала данного участка до последней, наиболее удаленной лампы, %.

Таблица 4.5

Линия	Ответвление	Значение коэффициента приведения моментов *d*
Трехфазная с нулем	Однофазное	1,85
То же	Двухфазное с нулем	1,39
Двухфазная с нулем	Однофазное	1,33
Трехфазная	Двухфазное (двухпроводниковое)	1,15

Формула (4.47) применяется последовательно ко всем участкам сети, начиная от участка, ближайшего к источнику питания. При выборе сечения на каждом из участков следует брать ближайшее и, как правило, большие стандартные сечения по сравнению с расчетными, полученными по формуле (4.47). По выбранному сечению данного участка и его фактическому моменту (формула (4.44)) определяют потери напряжения в участке. Последующие участки рассчитывают аналогичным путем на разность между расчетными потерями напряжения и потерями до начала данного участка.

Расчет сети по потере напряжения с учетом индуктивности проводников. Он не может быть проведен непосредственно по формуле. Рассчитывая трехпроводные сети напряжением 380 В или четырехпроводные (380/220 В), можно пользоваться таблицей, в которой для различных условий приведена потеря напряжения в процентах ΔU на 1 кВт· км. При расчете сетей напряжением 220 В или 220/127 В можно пользоваться данными этой же таблицы, увеличивая их в три раза. Тогда потеря напряжения в линии заданного сечения при заданных условиях прокладки определяется по формуле

$$\Delta U_{ф}=\Delta U_1 \Sigma M, \qquad (4.48)$$

где ΔU_1 – найденная потеря напряжения на 1 кВт · км, %; ΣM – сумма моментов для рассчитываемого участка, кВт · км. По этой потере напряжения подыскивают такое сечение, которому удовлетворяло бы соотношение

$$\Delta U_1 \le \Delta U_{ф} / \Sigma M. \qquad (4.49)$$

4.5. ПРОТИВОПОЖАРНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПРИ МОНТАЖЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Электрические сети могут быть причиной аварий, несчастных случаев и пожаров, если в процессе их монтажа не выполняются необходимые технические условия или нарушаются условия нормальной эксплуатации и ремонта. Требования к электромонтажным работам определяются действующими ПУЭ, инструкциями по монтажу [25], [26] и техническими условиями на приемку электромонтажных работ [27]. В основе указанных требований лежит строгое соблюдение соответствия проекту монтируемых проводов, кабелей, сечений токопроводящих жил и видов электропроводок. Особенно это важно при монтаже электрических сетей взрывоопасных зон: совершенно недопустимо производить самостоятельно (или с согласия заказчика) какую-либо замену конструкций сети; любая замена обязательно должна согласовываться с проектной организацией.

Так как на промышленных предприятиях широко применяется прокладка кабелей и проводов на лотках и в коробах, то для исключения горения по трассе электрической сети используют различные огнепреградительные устройства. Эти устройства, выполняемые в виде *поясов и перегородок из огнезащитного материала*, располагают по длине трассы, а также в местах ее прохода через стены и перекрытия. Эффективность таких устройств выявляют в процессе испытаний, при которых определяется их предел огнестойкости.

Следует отметить, что существующие в проектно-эксплуатационной практике конструктивные решения по устройству мест прохода электрической сети через стены и перекрытия не всегда препятствуют распространению огня. Данное обстоятельство обусловлено тем, что для заделки мест прохода кабелей и проводов применяются способы и материалы без учета особенностей передачи тепла и распространения горения в смежное от пожара помещение из-за сложности происходящего процесса: неоднородность конструкции обуславливает различные по величине тепловые потоки по токопроводящим жилам, изоляции, оболочек кабелей и огнепреградительной перегородки. Кроме того, тепловые потоки по элементам электропроводки и перегородки не стационарны и изменяются с развитием пожара.

В последнее время в России и за рубежом большое внимание уделяют созданию герметизирующих уплотнений для защиты от огня потоков кабелей и проводов в местах их прохода через стены и перекрытия. Материалы для уплотнений должны иметь длительную устойчивость в условиях пожара, не пропускать дым и огонь, сдерживать превышение температуры с противоположных сторон преграды. К таким материалам следует отнести, например, уплотнения на основе пенопласта, который сохраняет эластичность при 200 °С, а при 600 °С он образует на поверхности защитную кварцевую корку.

Испытания огнепреградительной перегородки, выполненной на основе этого материала, в условиях имитирующих реальный пожар, показали, что поверхность перегородки выдерживала 1000 °С в течение нескольких минут, а огонь и дым не распространялись в течение 1 ч. Исследованиями установлены толщины пенопласта, обеспечивающие защиту в течение 60, 90 и 120 мин.

Испытаниям подвергались также плиты из ячеистого бетона и огнезащитных составов ОПК (ТУ10-666-81) и ВПМ-2 (ТУ10-1626-77). Часть испытанных образцов имела дополнительное покрытие выходящих из перегородки участков кабелей огнезащитным составом ОПК. Предназначенные для испытаний образцы воспроизводили места прохода одиночных или пучком вплотную друг к другу кабелей через стены и перекрытия. Выходящие из перегородки участки кабелей покрывались составом ОПК.

В результате испытаний образцов выявлено, что использование составов ОПК и ВПМ-2 для заполнения зазоров дает аналогичные результаты по огнестойкости. Применение ОПК и ВПМ-2 позволяет обеспечить предел огнестойкости прохода кабелей и проводов через стену 0,75 ч при толщине огнепреградительной перегородки 0,2 м. С уменьшением толщины перегородки предел огнестойкости уменьшается. Если толщина преграды мала, то повысить предел огнестойкости можно путем покрытия выходящих из перегородки участков кабелей огнезащитным составом ОПК на участке не менее 0,1 м.

Анализ результатов испытаний показал, что на величину предела огнестойкости определенное влияние оказывает сечение токопроводящих жил кабеля: чем больше сечение жил, тем меньше предел огнестойкости.

При переходе кабелей и проводов через перекрытие они находятся в худших температурных условиях, чем при переходе через стену. Из-за того, что перекрытие имеет небольшую толщину, затрудняется защита проходящих через него кабелей и проводов. Положительный результат в этом случае был достигнут за счет дополнительного покрытия выходящих из перекрытия участков кабелей составом ОПК на длину не менее 0,1 м. Предел огнестойкости при этом повышается в два раза.

Таким образом, испытания показали, что:

на вероятность пожара от кабелей и проводов оказывает влияние наличие огнезащитных поясов и перегородок;

применение огнезащитных поясов менее эффективно, чем перегородок;

эффективность огнезащитных свойств поясов зависит от их длины;

с увеличением длины пояса и толщины перегородки скорость распространения горения уменьшается;

применение огнезащитной перегородки уменьшает скорость распро-

странения горения по кабелям и проводам по сравнению с поясами длиной 2,0 м на два порядка (более чем в 118 раз);

предел огнестойкости огнепреградительной перегородки при проходе кабелей пучком через перекрытия по сравнению со стеной несколько снижается;

повышение предела огнестойкости возможно путем покрытия огнезащитным составом выходящих из перегородки участков кабелей и проводов на длине не менее 0,1 м;

применение для огнепреградительной перегородки материалов с коэффициентом теплопроводности 0,5-0,3 Вт·м$^{-1}$· К$^{-1}$ при небольших перегрузках приводит к перегреву изоляции кабелей и проводов и повышению скорости ее старения.

Электропроводка во взрывоопасных зонах должна монтироваться особенно тщательно и надежно. Во взрывоопасных зонах всех классов наиболее надежной является электропроводка в стальных водогазопроводных трубах с соответствующим антикоррозийным покрытием. Такие проводки являются взрывонепроницаемыми или повышенной надежности против взрыва.

Однако применение стальных труб допустимо только в случае технической и нормативной обоснованности. Во взрывоопасных зонах электропроводки должны прокладываться в стальных обыкновенных трубах по ГОСТ 3262–75. Тонкостенные и некондиционные водогазопроводные трубы во взрывоопасных зонах применять не допускается.

Соединения труб между собой, с патрубками фитингов, коробок и светильников, а также с аппаратурой и вводными коробками электродвигателей должны быть выполнены только на трубной цилиндрической резьбе. Все резьбовые соединения должны иметь не менее пяти неповрежденных ниток резьбы с подмоткой на резьбу ленты ФУМ (фторлинового уплотнительного материала).

Для ответвлений и соединений проводов и кабелей, для протягивания проводов в стальных трубах должны применяться взрывозащищенные коробки серии КВП (пластмассовые) или В (чугунные, например: КПП – проходная прямая; КТО – тройниковая ответвительная; КПЛ – проходная разделительная для локальных испытаний и др.).

Коробки серий КВП и В (рис. 4.6) на протяжение 660 В имеют взрывобезопасный уровень взрывозащиты и вид взрывозащиты «взрывонепроницаемая оболочка» с маркировкой В4Т5-В или 1ExdIICT6. Допускается применять эти коробки для взрывоопасных зон любого класса.

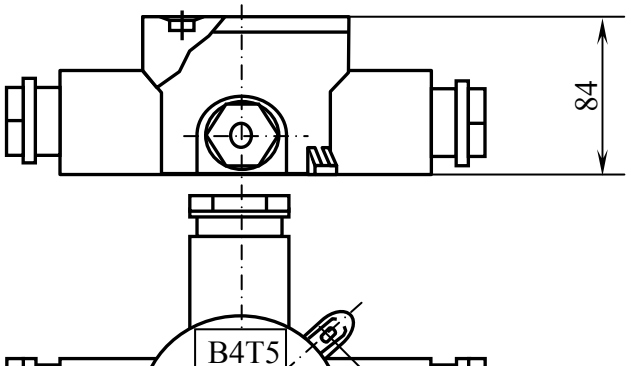


Рис. 4.6. Коробка ответвительная взрывозащищенная КВП-25
с уровнем и видом взрывозащиты В4Т5-В или 1ExdIICT6

В осветительных сетях взрывоопасных зон классов В-1а, В-1б, В-1г и В-IIа для выполнения ответвлений и соединений небронированных кабелей, прокладываемых открыто, допускаются пластмассовые коробки серии У409 со степенью защиты *IP*65.

Для предотвращения перехода взрывоопасных смесей по трубам из одного помещения в другое или наружу, а также для отделения и ограничения объема вводных устройств электрических машин, аппаратов, светильников и другого электрооборудования на трубах устанавливают разделительные уплотнения. Для этого во взрывоопасных зонах классов В-I, В-Iа применяют коробки типа КПЛ (ТУ 36-1739-74) или КПР с их локальным испытанием на герметичность, без испытания самих трубопроводов. В остальных взрывоопасных зонах разделительные уплотнения устанавливать не требуется.

Коробки КПЛ (рис. 4.7) имеют три внутренние полости, из которых две крайние предназначены для выполнения в них уплотнений проводов или кабелей уплотнительным составом УС-65, а средняя – для подачи избыточного давления воздуха 250 кПа при испытании разделительного уплотнения. При этом в течение 3 мин допускается падение давления не более чем до 200 кПа.

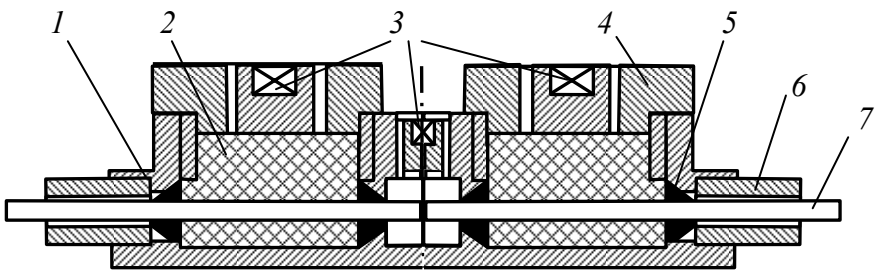


Рис. 4.7. Коробка КПЛ:
1 – корпус; *2* – состав УС-65; *3* – пробка; *4* – крышка; *5* – набивка из асбестового шнура или джута; *6* – трубопровод; *7* – провода или кабель

Разделительные уплотнения выполняют при переходе труб из одной взрывоопасной зоны в другую, если эти зоны отличаются по классу или по взрывоопасной смеси, а также при выводе труб за пределы взрывоопасной зоны (за исключением зон классов В-Iб, В-Iг и В-IIа). Устанавливают разделительные уплотнения во взрывоопасных зонах, в непосредственной близости от выхода труб, как это показано на рис. 4.8.

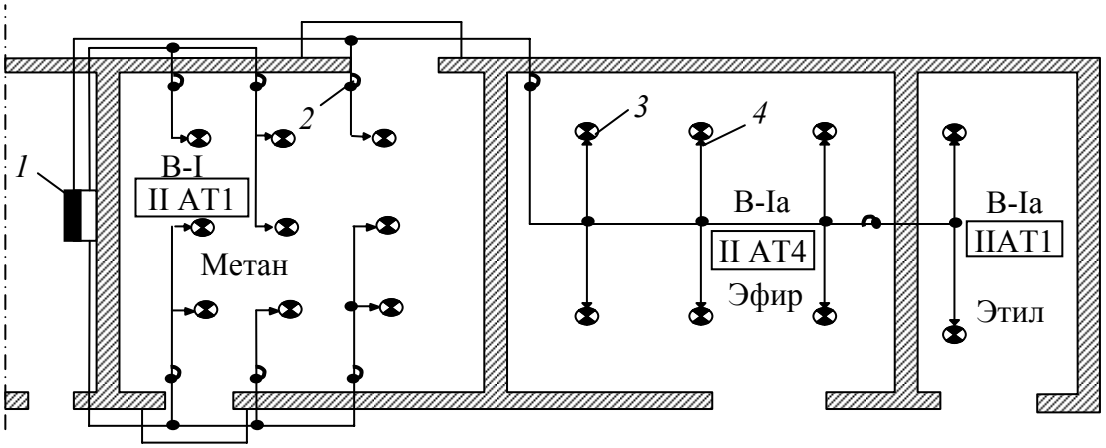


Рис. 4.8. Размещение разделительных уплотнений для осветительной сети:
1 – распределительный щит; *2* – разделительное уплотнение, выполненное в коробах КПЛ и КПР; *3* – взрывозащищенный светильник; *4* – разделительное уплотнение, выполненное прокладкой из термостойкой резины (имеющейся в светильнике)

В зонах классов В-I и В-Iа разделительные уплотнения устанавливаются на вводе трубопроводов в светильники, а на вводных устройствах электрических машин и аппаратов только в том случае, если эти устройства не имеют специальных сальниковых уплотнений, выдерживающих испытательное давление.

При монтаже следует обращать внимание на правильность устройств проходов труб через стены и перекрытия из данной зоны в соседнюю невзрывоопасную или взрывоопасную, но другого класса или с другой категорией и группой взрывоопасной смеси.

Необходимо исключить возможность распространения взрывоопасных смесей в невзрывоопасные помещения или наружу через неплотности заделки проходов или образующиеся усадочные трещины. В случае прохода сквозь стену помещений с взрывоопасными зонами классов В-I и В-Iа применяют стальные патрубки, приваренные к металлическим рамам, с навернутыми на один конец каждого патрубка коробками КПЛ, которые рас-

полагаются со стороны взрывоопасной зоны. Примеры выполнения проходов труб сквозь стены приведены на рис. 4.9.

Провода и кабели, используемые для прокладки в трубах, должны соответствовать способу прокладки. Сечение проводов и кабелей с медными жилами должно быть не менее 1,5 мм^2, с алюминиевыми – не менее 2,5 мм^2.

Чаще электрические сети во взрывоопасных зонах выполняют с применением бронированных (или небронированных) кабелей, без наружного поливинилхлоридного покрова или с ним. В зонах классов В-Iа, В-Iб, В-IIа для устройства осветительных сетей дополнительно к проводкам, проложенным в стальных трубах, и бронированным кабелям разрешается применять (при отсутствии механических и химических воздействий) открытую (беструбную) прокладку небронированных кабелей в поливинилхлоридной, резиновой и металлической оболочках.

Беструбная прокладка кабелей во взрывоопасных зонах может производиться по стенам, колоннам, фермам, на скобах, кабельных конструкциях и в лотках, а также в коробах (кроме зон классов В-II) и в кабельных каналах. В зонах В-II и В-IIа прокладывают кабель по кабельным конструкциям, имеющим узкие горизонтальные поверхности, ограничивающие скопление пыли. Кабели располагают в один вертикальный ряд с расстоянием от стены не менее 20 мм, что упрощает очистку их от пыли.

Трассы открыто прокладываемых кабелей так же, как и электромеханические трубопроводы (в зонах классов В-I и В-Iа), при совместной прокладке с технологическими трубопроводами, несущими горючие газы и пары с удельным весом менее 0,8 по отношению к воздуху, следует располагать ниже технологических трубопроводов или над ними, если удельный вес горючих газов и паров более 0,8 по отношению к воздуху.

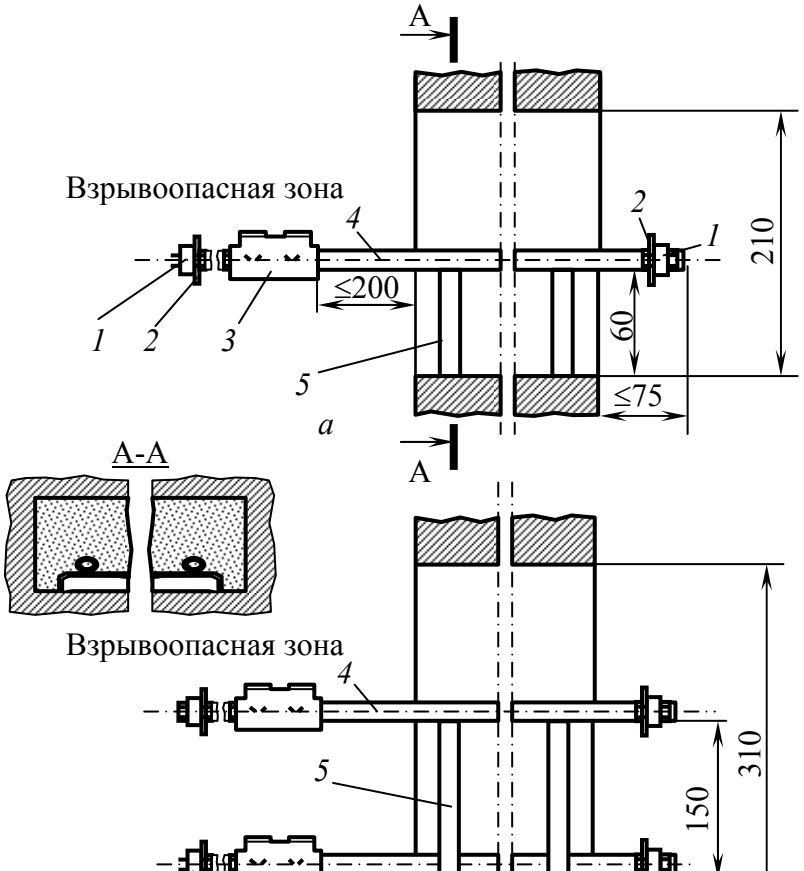


Рис. 4.9. Металлические рамы с отрезками труб и коробками КПЛ:
а – для одного ряда труб; *б* – для двух рядов труб; *1* – муфта; *2* – контргайка; *3* – коробка КПЛ; *4* – отрезок трубы; *5* – рама из стальных полос

При прокладке кабелей следует учитывать, что во взрывоопасных зонах, а также в непосредственной близости с технологическим аппаратом установок класса В-Iг запрещается располагать соединительные и ответвительные кабельные муфты. Это вызвано большей вероятностью замыканий в муфтах (с выбросом электрической дуги, раскаленных паров и газов наружу), чем в целых участках кабеля.

Проходы кабелей сквозь стены, перегородки и перекрытия следует выполнять через заделанные в них отрезки труб с уплотнением концов труб составом УС-65 (рис. 4.10). При этом в зонах класса В-I уплотнение выполняют по обе стороны прохода, а в зонах классов В-Iа – только со стороны взрывоопасной зоны более высокого класса; в зонах одного класса – со стороны зоны, содержащей взрывоопасные смеси более высокой категории и группы.

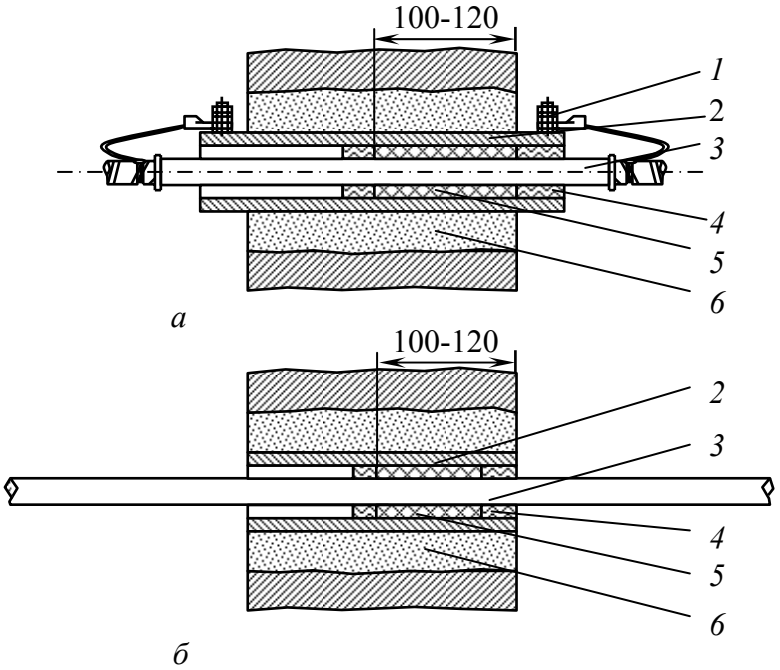


Рис. 4.10. Проходы одиночных кабелей сквозь
внутренние стены зон классов В-I и В-Iа:
а – уплотнение составом УС-65 бронированных кабелей без наружного поливинилхлоридного покрова; *б* – уплотнение составом УС-65 небронированных и бронированных кабелей с поливинилхлоридным покровом; *1* – болт заземления брони кабеля; *2* – отрезок трубы; *3* – кабель; *4* – набивка из асбестового шнура; *5* – уплотнительный состав УС-65; *6* – цементный раствор

В зонах классов В-I, В-Iа, содержащих пары или газы с удельным весом более 0,8 по отношению к воздуху, а также в зонах класса В-II, кабельные каналы следует засыпать песком. При выходе кабелей из туннелей или из колодцев канализации следует применять сальниковые уплотнения, которые требуются для исключения возможности проникновения взрывоопасных смесей в невзрывоопасные помещения и кабельные сооружения.

При выходе кабельного канала из помещения наружу или его переходе в соседнее невзрывоопасное помещение (без устройства специальных уплотнений переходов) каналы должны засыпаться песком на 1,5 м по обе стороны стены. Это устраняет накопление взрывоопасных смесей.

Надежность, безотказность, пожаровзрывобезопасность электрических сетей обеспечиваются правильным уходом и своевременными планово-предупредительными и капитальными ремонтами, систематическими осмотрами. Большое значение в бесперебойной и безаварийной работе цеховых распределительных устройств имеет состояние их контактной части, которую необходимо систематически проверять и ремонтировать.

Состояние изоляции электрических сетей определяют измерением сопротивления при текущих ремонтах, но не реже одного раза в три года. Для измерения сопротивления изоляции силовых и осветительных сетей напряжением до 500 В используют мегомметры на 1000 В. Сопротивление изоляции сетей на участке между двумя смежными предохранителями, за последними предохранителями, между любыми проводами и землей, а также любыми двумя проводами должно быть не менее 0,5 МОм. Если электросеть не выдерживает эти испытания, производится испытание изоляции напряжением 1000 В промышленной частоты в течение 1 мин. Испытания изоляции сетей напряжением 1000 В промышленной частоты могут быть заменены измерением в течение 1 мин мегомметром с напряжением 2500 В.

Кабельные сети промышленных предприятий напряжением до 1 кВ испытывают тоже мегомметром на 1000 В. Величина сопротивления изоляции кабельных сетей должна быть не менее 0,5 МОм. Наиболее распространенными приборами для измерения сопротивления изоляции сетей являются переносные магнитоэлектрические мегомметры типа М-1101 на

1000 В с верхним пределом 1000 МОм.

На базе мегомметра типа М-1101 разработан искробезопасный мегомметр типа М-1102 в исполнении РВ-И (рудничный взрывозащищенный искробезопасный), предназначенный для работы в среде со взрывоопасной смесью метана, бензина, пропана и др. Мегомметры могут использоваться только для измерения изоляции цепей, не находящихся под напряжением. *Напряжение генератора мегомметра 500-1000 В опасно для человека.*

Кроме указанных приборов, для испытания изоляции сетей повышенным напряжением можно пользоваться мегомметрами типа МС-05 и МС-06 напряжением 2500 В.

При приеме в эксплуатацию вновь сооруженной электрической сети предприятие должно иметь технический проект, согласованный с энергоснабжающей организацией, а также исполнительные чертежи и документацию: планы силовой и осветительной сети; расчетные схемы или таблицы; схему защитного заземления; протоколы испытания изоляции и защитного заземления; акты на скрытые работы и др.

4.6. ПРОФИЛАКТИКА ПОЖАРОВ НА ВВОДАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Вводом от воздушной линии электропередачи называется электропроводка, соединяющая ответвление от воздушной линии электропередачи с внутренней электропроводкой, считая от изоляторов, установленных на наружной поверхности (стене, крыше) здания или сооружения, до зажимов вводного устройства. В качестве вводного устройства чаще используется щиток, на котором устанавливаются аппараты защиты (плавкие предохранители, автоматические выключатели), счетчики электроэнергии (для жилых домов) и коммутационные аппараты (рубильники, выключатели и т.п.).

Основными причинами возникновения пожаров от тепловых действий электрического тока на вводах и вводных устройствах зданий и сооружений объектов агропромышленного комплекса являются нарушения нормативных требований [1].

В соответствии с гл. 2.1, 2.2, 2.4 правил [1] требования пожарной безопасности к ответвлениям ВЛ направлены на предотвращение аварийных пожароопасных режимов: обрывов и коротких замыканий в проводах, которые сопровождаются разлетом раскаленных частиц металлов, падением фазных проводов на заземленные предметы с последующим их разогреванием током замыкания на землю и возгоранием горючих материалов и т.п.

Пожарная безопасность ответвлений регламентируется: допустимыми расстояниями горизонтального и вертикального сближения проводов с

землей, элементами здания и проводами линий связи, радио, телефона и т.п.; допустимым сближением проводов в точках их крепления к изоляторам опоры и ввода; минимально допустимым сечением проводов ответвления в зависимости от материала токопроводящей жилы; защитой ответвления (для наиболее ответственных объектов) от грозовых перенапряжений (см. параграф 8.6).

Правила разрешают применять на ответвлениях к вводам как изолированные, так и неизолированные (голые) провода; в районах с одноэтажной застройкой ответвления выполняются проводами с атмосферной изоляцией.

Допустимые по механической прочности сечения проводов приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Материал провода	Наименьшее сечение, мм^2	
	в пролете до 10 м	в пролете от 10 до 25 м
Медь	4	6
Сталь	3	4
Алюминий и его сплавы	16	16
Самонесущие провода АВТ-1; АВТ-2; АВТУ; АВТВ; АВТВУ; САПт; САПсш; САСПт; САСПсш	4	6

Наиболее типичным нарушением правил является использование для отпаек обычных установочных проводов типа АПВ или АПР сечением 4-6 мм^2, что значительно ниже требуемой величины (16 мм^2). Наиболее пожароопасными узлами ответвлений являются места их соединений с вводами, поскольку они, как правило, выполняются обычной скруткой, которая в процессе эксплуатации быстро ослабевает, растет переходное сопротивление соединения и наступает перегрев.

В свою очередь, перегрев вызывает ускоренный рост окисной пленки (особенно это заметно при использовании алюминиевых проводов), которая еще больше увеличивает переходное сопротивление и перегрев соединения скруткой. Все это может вызвать в скрутке искрение, которое может привести к значительному нагреву проводов и воспламенению изоляции.

Особую пожарную опасность представляет скрутка проводов, выполненная из проводов с разнородным металлом, в которых окисление поверхности токопроводящих жил существенно убыстряется под действием электрохимических явлений. Поэтому для предотвращения загораний и пожаров, вызванных некачественным соединением проводов, эти соединения должны выполняться с помощью специальных зажимов или сварки. Однопроволочные провода допускается соединять скруткой, но обязатель-

но с последующей пайкой места соединения.

Соединение проводов из различных металлов и разных сечений выполняется только на опорах при помощи специальных переходных зажимов (например, типов: ЩДК-2В, ЩДК-2Б, ЩДК-2А, ОАС-1, ОАС-2 и др.). Зажимы типа ОАС являются прогрессивной конструкцией, обеспечивают хороший электрический контакт между стальными и алюминиевыми проводами, высокую механическую прочность и герметичность соединения.

При любом виде ввода от воздушных линий в здания (через стенку в изоляционных трубах и через крыши в стальных трубах) должно исключаться попадание воды внутрь труб. При выполнении вводов в здания через трубостойки необходимо обращать внимание на то, чтобы толщина стенки стальной трубы была не меньше, чем значения, приведенные в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Провода с сечением жил, мм^2		Толщина стенки трубы, мм
алюминиевые	медные	
6	-	2,5
10	4	2,8
16-25	6-10	3,2
30-50	16	3,5
70	25-35	4,0

Вводные устройства (распределительные щиты и щитки) в здания должны располагаться в местах, удобных для обслуживания, на расстоянии не более 3 м от ввода в здание. Провода питающей линии на этом участке должны быть надежно защищены аппаратами защиты, установленными во внешней сети. Для этого используются грибообразные предохранители или предохранители других типов, установленные в ящиках, защищающих их от атмосферных осадков. Прокладка этой линии в помещение незащищенными изолированными проводами допускается только в непожароопасных помещениях по несгораемым поверхностям.

Глава 5

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ, ТРАНСФОРМАТОРЫ И АППАРАТЫ УПРАВЛЕНИЯ

5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ

Электродвигатель – машина, преобразующая электрическую энергию в механическую. В зависимости от рода потребляемого тока электродвигатели подразделяются на электродвигатели *переменного* и *постоянного тока*. Электродвигатели переменного тока делятся на *асинхронные*, *синхронные* и *коллекторные*.

Асинхронный электродвигатель состоит из статора и ротора. Обмотки статора и ротора размещены в пазах их магнитопроводов. На роторе асинхронных электродвигателей располагается либо фазная, т.е. имеющая обычно столько же фаз, сколько и обмотка статора, либо короткозамкнутая. Короткозамкнутая обмотка ротора состоит из расположенных в его пазах замкнутых между собой по обеим сторонам ротора неизолированных стержней из проводникового материала. Она может быть также выполнена заливкой пазов алюминием. В зависимости от типа обмотки различают асинхронные двигатели с *фазным* и с *короткозамкнутым ротором.*

Синхронные электродвигатели применяются в электроприводах, где требуется постоянная частота вращения, однако они имеют плохие пусковые свойства и для питания обмотки возбуждения требуется постоянный ток. Применяются на мощности свыше 600 кВт, на напряжение 6 и 10 кВ и как микродвигатели мощностью до 1 кВт. Многие серии и типы синхронных двигателей применяются для привода: компрессоров, мельниц, вентиляторов, резиносмесителей и грануляторов и т.д.

Коллекторные электродвигатели переменного тока, в основном маломощные, используются для привода электрифицированного инструмента, бытовой техники, медицинского оборудования и т.п., т.е. в тех случаях, когда для их питания необходим однофазный и реже трехфазный переменный ток.

Коллекторные электродвигатели постоянного тока более распространены в промышленности, что объясняется всевозрастающим применением статических выпрямителей, а также простотой и надежностью способа регулирования частоты вращения, большими пусковыми моментами и перегрузочной способностью, чем у двигателей переменного тока.

Основными конструктивными элементами двигателей постоянного тока являются станина с закрепленными на ней главными и добавочными

полюсами, вращающийся якорь с обмоткой и коллектором и щеточный аппарат.

В настоящее время основной серией двигателей постоянного тока общего назначения является серия 2П. Исходя из требований современного электропровода создано новое поколение электродвигателей постоянного тока серии 4П. В новой серии реализована идея унификации двигателей постоянного тока с асинхронными двигателями серии 4А.

Наиболее широко распространены в электроприводах асинхронные электродвигатели трехфазного переменного тока с короткозамкнутым ротором. Асинхронные электродвигатели потребляют около 60 % всей вырабатываемой электрической энергии. Асинхронные электродвигатели выпускаются в различном конструктивном исполнении в зависимости от назначения и условий применения. Обычной является конструкция электродвигателя для установки его в горизонтальном положении. Имеются конструктивные исполнения для расположения их вертикально. Такие двигатели, как правило, изготавливаются с фланцем для крепления к вертикальной стенке приводимого в движение механизма. Выпускаются электродвигатели во встраиваемом исполнении, которые монтируются внутри станка или другого приводимого в движение объекта и являются его неотъемлемой частью.

В промышленности наиболее широко применяются асинхронные электродвигатели единой серии 4А, обладающие небольшой металлоемкостью и высокими механическими характеристиками.

Серия 4А является массовой серией асинхронных двигателей, рассчитанных на применение в различных областях промышленности. Она охватывает диапазон номинальных мощностей от 0,06 до 400 кВт. Серия выпускается в основном модифицированном и специализированном исполнении.

Двигатели в основном исполнении - это трехфазные двигатели с короткозамкнутым ротором, имеющие степень защиты *IP*44 или *IP*23.

Модифицированные и специализированные исполнения асинхронных двигателей серии 4А выполнены на базе их основного исполнения, например: двигатели с повышенным пусковым моментом (4АР); повышенным номинальным скольжением (4АС), многоскоростные (со ступенчатым регулированием частоты вращения); с частотой питания 60 Гц; а также исполнений: тропического, химостойкого, сельскохозяйственного, влагоморозостойкого, пылезащищенного и рудничного.

В серии 4А принята следующая система обозначений:

$$\underset{1}{4А}\ \underset{2}{х}\ \underset{3}{х}\ \underset{4}{х}\ \underset{5}{х}\ \underset{6}{х}\ \underset{7}{х}\ \underset{8}{х},$$

где 1 – наименование серии (4А); 2 – исполнение по способу защиты: буква Н – исполнение *IP*23, отсутствие буквы означает исполнение *IP*44; 3 – исполнение по материалу станины (статора) и щитов: А – станина и щиты алюминиевые, х – станина алюминиевая, щиты чугунные (или обратное сочетание материалов); отсутствие буквы – станина (статора) и щитов: А – станина и щиты алюминиевые, х – станина алюминиевая, щиты чугунные (или обратное сочетание материалов); отсутствие буквы – станина и щиты чугунные или стальные; 4 – высота оси вращения, мм (две или три цифры); 5 – установочный размер по длине станины: буквы *S, M* и *L* (меньший, средний или большой); 6 – длина сердечника: А – меньшая, В – большая при условии сохранения установочного размера; отсутствие буквы означает, что при данном установочном размере (*S, M* и *L*) выполняется только одна длина сердечника; 7 – число полюсов (одна или две цифры); 8 – климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150.

Необходимо также учитывать климатические факторы, так как не всякое электрооборудование может надежно работать в различных климатических районах. Поэтому на все виды электрооборудования установлены требования, определяющие *климатическое исполнение* и *категорию размещения* по ГОСТ15150 – 69, а также определены условия транспортирования, хранения и эксплуатации в части воздействия климатических факторов в отдельных микроклиматических районах.

Оборудование и изделия, предназначенные для эксплуатации в одном или нескольких микроклиматических районах (например, на суше, реках, море), выпускают в следующих климатических исполнениях: У – умеренный, УХЛ – умеренный и холодный; ТВ – тропический влажный; ТС – тропический сухой; Т – тропический (сухой и влажный); О – общеклиматическое исполнение. Исполнения ТВ, ТС, Т могут быть обозначены общим термином – Т. Все эти исполнения могут обозначаться буквами латинского алфавита, принятыми в некоторых зарубежных странах: *N, NF, TH, T, U* соответственно вышеперечисленным исполнениям.

Категории размещения оборудования и изделий при эксплуатации в воздушной среде обозначаются цифрами и могут иметь укрупненные (1, 2, 3, 4, 5) или дополнительные (1.1, 2.1, 3.1, 4.1, 4.2, 5.1) характеристики. Например: 1 – для эксплуатации на открытом воздухе (воздействие совокупности климатических факторов); 4 – для эксплуатации в помещениях (объемах) с искусственно регулируемыми климатическими условиями; 1.1 – для хранения в помещениях категории 4 и т.д.

Буквы и цифры, обозначающие климатическое исполнение и категорию размещения, вводят в условное обозначение типа (марки) оборудования и изделие после всех обозначений, относящихся к их модификации, например

взрывозащищенный электродвигатель серии В типа В200 – 4 в климатическом исполнении У с категорией размещения 2 – 5 обозначают: В200 – 4 У2 – 5.

Электродвигатели серии 4АМ являются модернизацией серии 4А. Модернизация позволила снизить уровень шума, повысить значение некоторых основных параметров, уменьшить массу. Обозначение типов двигателей серии 4АМ аналогично обозначению серии 4А со степенью защиты *IP*44 и дополнено буквой М (модернизированный).

Асинхронные двигатели общего назначения серии АИ являются новой унифицированной серией асинхронных двигателей, отвечающих перспективному уровню развития мирового электромашиностроения. Электродвигатели этой серии должны полностью заменить серию двигателей 4А, ее модификации и серию А4М.

Двигатели серии АИ в отличие от серии 4А имеют: улучшенные пусковые характеристики, повышенные показатели надежности, улучшенные виброакустические характеристики, сниженный расход активных материалов, сниженную массу двигателя. Степень защиты электродвигателей серии АИ – *IP*44 и *IP*23.

Структура обозначения типоразмеров асинхронных двигателей серии АИ аналогична серии 4А и отличается первыми тремя буквами: буквы АИ обозначают вид двигателя новой серии стран Интерэлектро.

Значительно реже применяется модификация асинхронных электродвигателей с фазным ротором с трехфазной обмоткой, выполняемой подобно статорной, с тем же числом полюсов. Обмотка соединяется звездой или треугольником; три конца обмотки выводятся на три изолированных контактных кольца, вращающихся вместе с валом машины. Через щетки, укрепленные на неподвижной части машины и скользящие по контактным кольцам, в ротор включается трехфазный пусковой или регулировочный реостат, т.е. в каждую фазу ротора вводится активное сопротивление. Асинхронные двигатели с фазным ротором применяются там, где требуется плавное регулирование скорости приводимого в движение механизма, а также при частых пусках двигателя под нагрузкой.

Электродвигатели (а также аппараты) классифицируются по степеням защиты их оболочек (табл. 5.1).

Для производств, имеющих специфическую среду, выпускаются электродвигатели в специальном конструктивном исполнении. Так, для привода производственных механизмов во взрывоопасных зонах обычно применяются *взрывозащищенные* электродвигатели. По виду и способу устройства взрывозащиты эти электродвигатели разделяются на взрывонепроницаемые, продуваемые под избыточным давлением и повышенной надежности против взрыва (защита вида «е»).

Таблица 5.1

Исполнение электродвигателя (аппарата)	Обозначение степени защиты оболочек по ГОСТ 14254 –96 [16]
Открытое	*IP*00
Защищенное	*IP*10, *IP*20, *IP*30, *IP*40, *IP*11, *IP*21, *IP*31, *IP*41, *IP*12, *IP*22, *IP*32, *IP*42, *IP*13, *IP*23, *IP*33, *IP*43, *IP*34, *IP*44
Брызгозащищенное	*IP*34, *IP*44, *IP*54
Каплезащищенное	*IP*01, *IP*11, *IP*21, *IP*31, *IP*41, *IP*51, *IP*12, *IP*22, *IP*32, *IP*42, *IP*13, *IP*23, *IP*33, *IP*43
Закрытое	*IP*54, *IP*55 и др.
Обдуваемое	*IP*54 (с обдувом)
Продуваемое	*IP*34, *IP*44, *IP*54 (с устройством для охлаждения)
Пылезащищенное	*IP*50, *IP*51, *IP*54, *IP*55, *IP*56, *IP*65, *IP*66, *IP*67, *IP*68
Водозащищенное	*IP*55, *IP*65, *IP*56, *IP*66

Наибольшее распространение получили взрывонепроницаемые электродвигатели. Широко используются электродвигатели, продуваемые под избыточным давлением. Они выпускаются на большие мощности (свыше 100 кВт) и предназначены для привода крупных насосных, компрессорных и других специальных установок.

Взрывозащита и надежность в работе взрывозащищенных электродвигателей во многом зависят от свойств используемых в них материалов. Эти материалы делятся на *конструкционные*, *активные* и *изоляционные*.

К *конструкционным* относятся материалы, из которых изготовляются механические детали и части электродвигателя (корпус, вал, подшипниковые щиты и т.д). К некоторым конструкционным материалам предъявляются специфические требования по обеспечению взрывозащиты. Например, вентилятор принудительного воздушного охлаждения (центробежный, установлен на валу, имеет направляющий кожух) выполняется из неискрящего материала ЦАМ–4–1, что исключает искрообразование при ударах его о стальной кожух и воспламенение взрывоопасной среды.

К *активным* относятся токопроводящие материалы или те, в которых протекают электрические процессы (например, листовая электротехническая сталь для изготовления сердечников статора и ротора, алюминий и т.п).

К *изоляционным* относятся материалы, предназначенные для электрической изоляции токопроводящих частей двигателей. Изоляционные материалы прежде всего должны обеспечить надежную работу электродвигателя в различных условиях эксплуатации. От них зависят и технико-экономические показатели электродвигателя. Для взрывозащищенных электродвигателей изоляция обмоток должна быть не ниже класса В (по ГОСТ 8865–70), например, микалента, микафолий, слюдинит, стеклоткань, стеклотекстолит и т.д.

Взрывозащита взрывонепроницаемых электродвигателей обеспечивается тремя факторами: взрывонепроникновением, взрывоустойчивостью и температурным режимом оболочки. Взрывонепроникновение достигается созданием взрывонепроницаемых зазоров в местах сочленения отдельных частей оболочки. К таким местам относятся сочленения: подшипниковых щитов с корпусом и валом, корпуса присоединительной коробки вводов с корпусом двигателя, крышки коробки вводов с корпусом двигателя, крышки коробки вводов с корпусом коробки и др. Все сочленения выполняются с минимальными зазорами, указанными в ГОСТ 22782.6–81 [22]. На рис. 5.1 показаны взрывонепроницаемые зазоры оболочки электродвигателя. На чертежах они обычно обозначаются словом «взрыв».

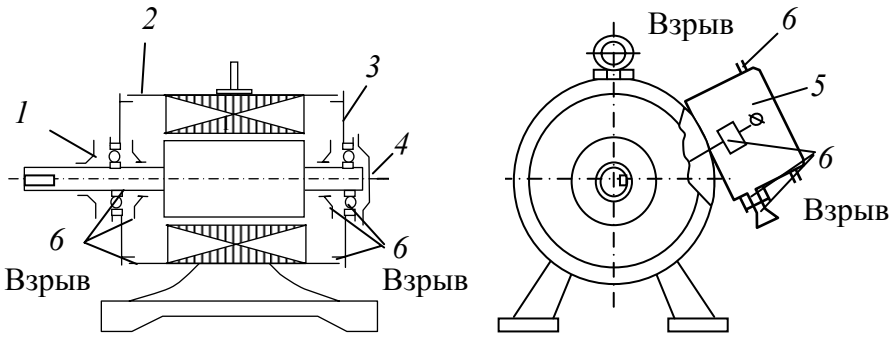


Рис. 5.1. Схематическое устройство взрывозащищенного электродвигателя:
1, *4* – крышки подшипника; *2* – корпус; *3* – подшипниковый щит; *5* – вводная коробка; *6* – взрывонепроницаемые зазоры, обозначаемые словом «взрыв»

Особое внимание уделяется обеспечению взрывонепроникновения присоединительной коробки. Это достигается путем применения сальникового уплотнения или заливки затвердевающей изолирующей массой места ввода в нее кабеля. Для ввода кабеля или проводов в трубе применяют муфты с трубной резьбой.

Взрывоустойчивость обеспечивается высокой механической прочностью корпуса электродвигателя, подшипниковых щитов, коробки вводного устройства и ее крышки. Эти части, а также крепежные элементы должны выдерживать без повреждения и остаточной деформации гидравлические испытания избыточным давлением, равным полуторакратному давлению, которое возникает вследствие воспламенения взрывоопасной смеси при нормальных условиях, но не менее $3 \cdot 10^5$ Па.

Температурный режим оболочки электродвигателя обеспечивается тем, что температура наружных поверхностей в рабочем режиме не должна превышать значений, указанных в табл. 2.12.

Взрывонепроницаемые электродвигатели изготавливаются для работы в категориях взрывоопасной смесей от IIA до IIC (от 1 до 4) и группах взрывоопасных смесей от Т1 до Т5 (от А до Д). Взрывонепроницаемые электродвигатели являются преимущественно электродвигателями с короткозамкнутым ротором.

Отечественные серии и типы взрывонепроницаемых электродвигателей приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Серия или тип электродвигателя	Мощность, кВт	$U_н$, В	Маркировка взрывозащиты	Состояние производства	Примечание
К, КО	4 - 100	380/660	ВЗГ	Серийное	Привод насосов, вентиляторов, лебедок
МА 36	125 - 250	380/660	В1Г В2Г В3Г	То же	Привод центрифуг
МА 37	160	380\660	В2Г	«	Привод насосов
ВАО	0,4 - 100	220/380, 380/660	В1Г, В2Г, В3Г В4Г В4Д	«	–
ВАСО	22 – 37 37 - 90	380/660 380/660	В3Т4 - В	«	Привод вентиляторов
ВАСО 2	22 - 75	До 660	1FxdIIBT4	«	Вертикальный
ВАОК (с фазным ротором)	17 – 55 75 - 250	380/600 380/660	В1Г В3Г В1Т4 - В	«	Привод механизмов, требующих плавного пуска
ВАОВ	400 - 2000	6000 – 10000	1ExdIIBT4	«	Привод вертикальных нефтяных насосов
ВАО 2	55 – 315 200 - 2000	380/660 6000 – 10000	В3Т4 – В В3Т5 - В	«	–
ВА3МВ1	500 - 2000	6000	1ExdIIBT4	«	Привод насосов, компрессоров, нагнетателей и других быстроходных механизмов
В	0,25 - 110	220/380 380/660	1ExdIIBT4	«	Частота оборотов 1500 – 3000 об/мин

Окончание табл. 5.2

Серия или тип электродвигателя	Мощность, кВт	$U_н$, В	Маркировка взрывозащиты	Состояние производства	Примечание

2В	1,5 – 2,2	220/380 380/660	1ExdIIBT4	Серийное	Привод подъемно-транспортных и других механизмов в химической, нефтяной и газовой промышленности и других случаях
	1,5 – 5,5	До 660	В3Т4 – В	То же	То же
	37 - 110	До 660	1ExdIIBT4	«	«
ВА132 ВА200	3 – 4,5 15,5 – 45	380/660 380/660	1ExdIIBT4 2ExdIICT4 То же	«	«
АИМ (С) АИМ (Р)	4 –22 7 - 30	До 660 До 660	1ExdIIBT4* 1ExdIIBT4 То же	«	Привод механизмов в химической, газовой, нефтеперерабатывающей и других отраслях

* Первые имеют вводное устройство с видом взрывозащиты «е», а корпус –с видом взрывозащиты *d*, т.е. для взрывоопасных зон В-Iа(2),В-Iг(2), В-Iб(2), В-IIа(22). Вторые (под чертой) – вводное устройство и корпус имеют защиту вида *d*, т.е. для взрывоопасных зон – В-I(1), В-II(21).

Электродвигатели серии ВАО всех маркировок по взрывозащите (от В1Г до В4Д включительно) имеют одинаковые установочные и монтажные размеры, стандартизированную шкалу мощностей, что обеспечивает их взаимозаменяемость, упрощает проектирование и монтаж во взрывоопасных зонах.

Серия электродвигателей ВАО включает основное исполнение и модификации. В полном обозначении электродвигателя основного исполнения, например ВАО 21–4, цифра 2 указывает на второй габарит (т.е. на условный наружный диаметр листов статора), 1 – на условную длину (первую или вторую) пакета статора, 4 – на число полюсов. Модификации серии ВАО имеют следующие обозначения: ВАОК (с фазным ротором), ВАОТ (конвейерные), ВАОЛ (лебедочные), ВАОМ (для местной вентиляции), ВАОА (для запорной арматуры) и т.д.

В настоящее время налажен серийный выпуск новых взрывонепроницаемых электродвигателей серии В, 2В, ВА, АИМ и др. Они предназначены для применения во взрывоопасных зонах классов В – I и В – II, а также В – Iа и В – Iг.

Взрывозащита электродвигателей, продуваемых под избыточным давлением, основана на непроникновении взрывоопасной среды во внутрен-

нюю полость электродвигателя. Это достигается продувкой внутренней полости электродвигателя и воздуходувов (в пределах границ взрывоопасной зоны) чистым воздухом или инертным газом и созданием в них избыточного давления не менее 100 Па. Электродвигатели могут иметь замкнутую или разомкнутую системы вентиляции. В первом случае циркулирует один и тот же объем воздуха, охлаждаемого двумя водяными воздухоохладителями. Имеется трубопровод для отвода воздуха при продувке электродвигателя перед пуском. В разомкнутой системе воздух (см. рис. 2.4) забирается вне взрывоопасной зоны, проходит в фильтрах очистку от пыли, затем прогоняется по воздуховодам и полости электродвигателя и выбрасывается наружу (выбрасывать отработавший воздух во взрывоопасную зону не рекомендуется).

Дополнительными мерами по этому виду взрывозащиты являются: нормирование температуры оболочки (она такая же, как и у взрывонепроницаемых электродвигателей); автоматическое отключение или подача сигнала и блокировка.

При падении статического давления внутри оболочки ниже 100 Па в зонах В–I и В–II должно произойти автоматическое отключение электродвигателя, а в зонах В–Iа и В–IIа допускается автоматическая подача сигнала опасности. Для этого применяются мембранные сигнализаторы давления СПДМ, которые устанавливаются за пределами взрывоопасной зоны.

Блокировка предупреждает включение электродвигателя до того, как через его оболочку совместно со всеми элементами (трубопроводами, воздухоохладителями и т.д.) системы вентиляции не будут продуты чистый воздух или инертный газ. Объем газов должен быть не менее пятикратной емкости оболочки и всей системы вентиляции. Эта блокировка выполняется при помощи реле времени, включающего электродвигатель только тогда, когда вентилятор осуществит продувку. Время выдержки реле времени определяется по формуле

$$\tau_в \geq [5(V_1 + V_2)]/Q, \qquad (5.1)$$

где V_1 – объем воздуховодов, м^3; V_2 – объем электродвигателя (вычисляется по габаритным размерам), м^3; Q - производительность вентилятора подпитки или продувки, м^3/с.

Электродвигатели в этом исполнении являются крупными машинами и применяются для привода насосов, вентиляторов, компрессоров и других общепромышленных механизмов во взрывоопасных зонах всех классов (за исключением зоны В-Iг), которые могут содержать взрывоопасные смеси всех категорий и групп. Некоторые данные отечественных типов и серий таких электродвигателей приводятся в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Серия или тип электро-двигателя	Мощность, кВт	$U_н$, В	Частота вращения, об/мин	Обозначение взрывозащиты	Примечание
СДКП2	315- 8000	6000	250-500	В4Т5-П или Н4Т5-П	Привод поршневых компрессоров
А3 АВ	32- 2000	220/380 380/660	550- 3000	В4Т5-П или В4Т5-П Н4Т5-П	Привод газовых компрессоров
СТДП	630-112500	6000-10000	3000	В4Т5-П или Н4Т5-П	
АТД2	315- 5000	6000	3000	В4Т4-П или В4Т5-П	Привод насосов, вентиляторов и других быстроходных устройств
ДАП	1250-2500	6000		Н4Т5-В	
АТД, АЗП, АРП	500-2500	3000-5000	1500 3000	Н4Т5-В	

Электродвигатели повышенной надежности против взрыва при нормальном режиме работы не могут быть причиной взрыва: у них отсутствует открытое искрение, дуги или опасные температуры. Дополнительными факторами, обеспечивающими этот вид взрывозащиты, являются: снижение допустимой температуры изолированных обмоток на 10 °С (по сравнению с допустимыми), применение электроизоляционных материалов высокого качества (степень защиты оболочки не ниже *IP*33 или *IP*54). Выпуск таких электродвигателей ограничен серией А десятого и одиннадцатого габаритов мощностью 55-320 кВт, напряжением 380/660 В и 3000 В в исполнениях НОА, НОБ, НОГ.

Электродвигатели повышенной надежности против взрыва могут применяться во взрывоопасных зонах всех классов (за исключением зон класса В-I и В-II) и всех категорий взрывоопасных смесей при соответствии ее группы.

Электродвигатели обычно поставляются комплектно с технологическим оборудованием (насосами, компрессорами, вентиляторами и т.д.). Если же они поставлены некомплектно, их выбирают по роду тока, напряжению и номинальным данным, приводимым в заводских каталогах.

Выбор электродвигателей по роду тока и напряжению несложен: род тока и напряжение определены условиями электроснабжения, мощностью самих электродвигателей и необходимостью регулирования частоты вращения.

Важной задачей при выборе электродвигателя является определение условий, в которых он будет работать. Во многих случаях окружающая среда содержит большое количество влаги, пыли, газов, паров, химических веществ. Поэтому степень защиты оболочки электродвигателя должна соответствовать окружающей среде. При выборе электродвигателя для взрывоопасных зон, кроме того, учитывают класс зоны, уровень и вид взрывозащиты, категорию и группу взрывоопасной смеси. Для пожароопасных зон также учитывают ее класс.

Тип асинхронного электродвигателя во многом определяется условиями пуска рабочего механизма, а также режимом работы. Режим работы электродвигателя определяется характером его загрузки и временем, в течение которого он может работать, не нагреваясь выше установленной температуры.

При длительном режиме работы выбор электродвигателей достаточно прост. Если нагрузка механизма постоянна (насосы, вентиляторы, компрессоры, различного ряда транспортеры), исходят из условия

$$P_{н} = P_{мех}, \tag{5.2}$$

где $P_{н}$ – номинальная мощность (по каталогу) электродвигателя, кВт; $P_{мех}$– номинальная мощность рабочего механизма, кВт.

Мощность $P_{мех}$ определяется по параметрам производственного механизма и эксплуатационным характеристикам в соответствии с технологическим процессом.

Мощность электродвигателя насоса

$$P_{мех.н} = [Q\gamma (H + \Delta H)\, k_{з}]/102\ \eta_{н}\eta_{п}, \tag{5.3}$$

где Q – производительность насоса, м^3/с; γ - плотность перекачиваемой жидкости, кг/м^3; H – высота напора, равная сумме высот всасывания и нагнетания, м; ΔH – падение напора в магистралях, м; $k_{З}$ – коэффициент запаса (рекомендуется принимать при электродвигателях мощностью до 50 кВт равным 1,2; от 50 до 350 кВт – 1,15; свыше 350 кВт – 1,1); $\eta_{н}$ – КПД насоса, равный 0,45 – 0,85 (большая цифра относится к большей мощности); $\eta_{н}$ – КПД передачи: ременной 0,85 – 0,9; клиноременной 0,97 – 0,98; при непосредственном соединении с помощью муфты – 1.

Мощность электродвигателя вентилятора

$$P_{мех.в} = QH_{с}k_{з}/1000\,\eta_{в}\eta_{п}, \tag{5.4}$$

где Q – производительность вентилятора, м^3/с; $H_{с}$ – давление, развиваемое вентилятором, Па; $k_{З}$ – коэффициент запаса, принимаемый для электродвигателя до 1 кВт равным 2; от 1 до 2 кВт – 1,5; от 2 до 5 кВт – 1,25; свыше 5 кВт – 1,1 (1,15); $\eta_{в}$ – КПД вентилятора (0,5-0,8).

Мощность электродвигателя компрессора

$$P_{\text{мех.к}} = QA/1000\,\eta_{\text{к}}\eta_{\text{п}}, \qquad (5.5)$$

где Q – производительность компрессора, м^3/с; A – работа, затрачиваемая на сжатие 1м^3 газа до определенного давления, Дж; $\eta_{\text{к}}$ – КПД компрессора (0,5 – 0,7).

Приводя в движение производственный механизм, электродвигатель совершает полезную работу по преодолению сил сопротивления, обусловленных силами трения в передачах и движущихся частях механизма, а также полезной нагрузкой на его рабочем органе.

Количество полезной работы, совершаемое в единицу времени (в секунду), называется полезной мощностью. Потребляемая мощность P_i для асинхронного электродвигателя равна

$$P_i = 10^{-3}\sqrt{3}\,U_{\text{л}}I_{\text{л}}\cos\varphi, \qquad (5.6)$$

где $U_{\text{л}}$ – линейное напряжение, питающее обмотки статора, В; $I_{\text{л}}$ – линейный ток потребления, А; cosφ - коэффициент мощности электродвигателя.

Желательно, чтобы каждый электродвигатель работал с возможно большей нагрузкой, развивая возможно большую полезную мощность. Однако увеличение нагрузки электродвигателя сопровождается увеличением температуры его частей. Наиболее чувствительной к повышению температуры элементов является изоляция обмоток электродвигателя. Чем выше рабочая температура, тем быстрее стареет и разрушается изоляция.

Приведенные на щитке электродвигателя номинальные значения мощности $P_{\text{ном}}$, тока $I_{\text{ном}}$ и скорости вращения $n_{\text{ном}}$ соответствуют номинальной нагрузке на валу, при которой электродвигатель, работая в номинальном режиме, при температуре окружающей среды + 35 °С имеет максимально допустимую температуру.

5.2. АВАРИЙНЫЕ ПОЖАРООПАСНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Аварийным режимом работы электродвигателя будем называть любой режим работы, увеличивающий температуру нагрева электродвигателя выше допустимой. Необнаруженный аварийный режим работы электродвигателя может привести к его загоранию. Аварийные режимы работы электродвигателей возникают из-за снижения или увеличения питающего напряжения при номинальной нагрузке на валу, увеличении нагрузки на валу выше номинальной, обрыве одной фазы, снижении межвиткового сопротивления изоляции статорных обмоток; ухудшении вентиляции, увеличении числа включений выше допустимого.

В подавляющем большинстве случаев аварийные отказы электродвигателей происходят из-за повреждения обмоток – 85-95 %. Основные отказы обмоток обусловлены межвитковыми замыканиями – 93 % [43].

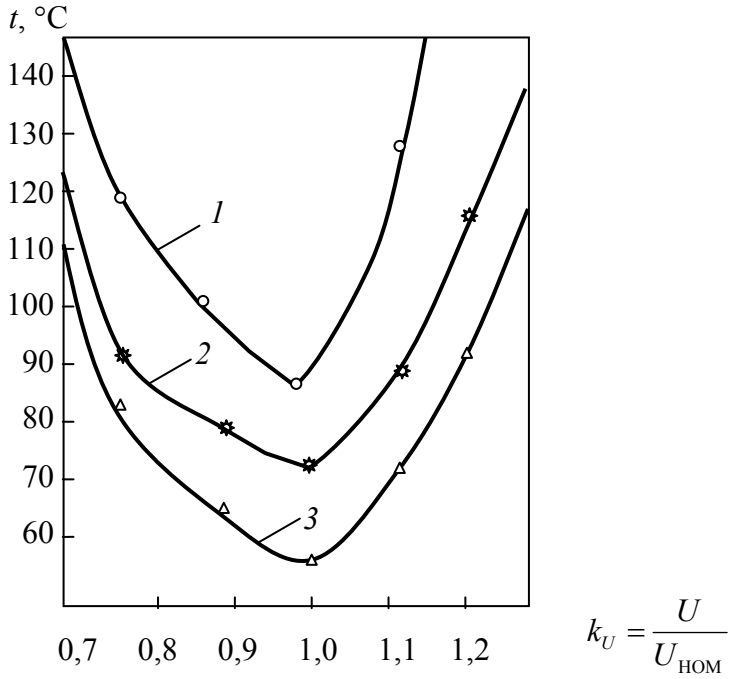


Рис.5.2. Зависимость перегрева обмотки статора двигателя от напряжения электросети при номинальной нагрузке:
1 – 4АХ80В2У3; *2* – 4АХ80А4У3; *3* – 4А100У3

На рис. 5.2 приведены зависимости температуры обмотки статора электродвигателя от напряжения питающей сети при номинальной нагрузке на валу. Из рисунка видно, что снижение питающего напряжения и увеличение его приводят к возрастанию температуры электродвигателя. Поясним физическую сущность этих явлений. Для обеспечения вращающего момента двигателя, преодолевающего номинальную механическую нагрузку на валу, требуется номинальная электрическая мощность, потребляемая обмотками статора из сети трехфазного тока. При снижении напряжения питания статорных обмоток электрическая мощность уменьшится, вращающий момент также уменьшится, ротор сбавит число оборотов, в результате чего в обмотке ротора возрастает наводимая ЭДС индукции и увеличивается соответственно ток, который, в свою очередь, увеличит свой магнитный поток. А так как магнитный поток ротора направлен навстречу магнитному потоку статора, результирующий магнитный поток должен уменьшиться, и ЭДС самоиндукции в обмотках статора также уменьшится. Следовательно, ток в статорных обмотках увеличится на величину, необходимую для компенсации потерянной электрической мощности из-за снижения питающего напряжения статорных обмоток. За

счет большего тока статора результирующий магнитный поток возрастает до прежней величины. Момент, вращающий электродвигатель, станет равным моменту нагрузки на валу; двигатель будет работать с меньшим числом оборотов.

Снижение напряжения, питающего обмотки статора, на 20 – 25 % приводит к пожароопасному увеличению тока в обмотках статора. При увеличении напряжения, питающего статорные обмотки, ток в них также увеличится, а следовательно, увеличится и температура нагрева электродвигателя.

Обрыв провода одной из трех фаз обмотки статора (при работающем под нагрузкой электродвигателе) приводит к токовой перегрузке двух оставшихся фаз. Если при этом не сработает тепловая защита, пожароопасное превышение температуры наступит за несколько минут. На рис. 5.3 приведены зависимости температуры электродвигателя для случая обрыва одной фазы и при перегрузке.

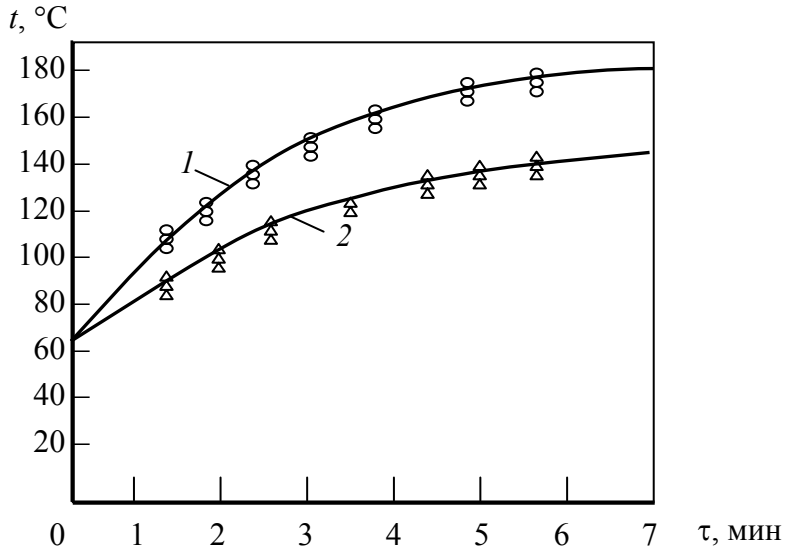


Рис. 5.3. Превышение температуры
асинхронного двигателя 4АХ80А4У3:
1 – при обрыве фазы; *2* – при перегрузке ($I_п = 2I_{ном}$)

Еще более пожароопасный режим наступает, когда электродвигатель включается в работу при обрыве одной фазы. Нарастание температуры при этом происходит в течение 10 - 20 с после включения электродвигателя под напряжение (см. рис. 5.3). Характерным признаком работы электродвигателя на двух фазах является гудение.

Пробой изоляции обмотки ротора на корпус приводит к медленному увеличению частоты вращения при пуске асинхронного двигателя. Ротор сильно нагревается даже при небольшой нагрузке. К таким же явлениям

приводит нарушение изоляции между контактными кольцами и валом ротора у асинхронного двигателя с фазным ротором.

Пробой изоляции между фазами приводит к короткому замыканию в обмотке. При КЗ обмотки статора наблюдаются сильные вибрации двигателя переменного тока, сильное гудение, несимметрия токов в фазах, быстрый нагрев отдельных участков обмотки и как результат – загорание изоляции обмотки.

Витковое короткое замыкание обмотки статора или ротора приводит к чрезмерному нагреву электродвигателя даже при номинальной нагрузке.

Отрыв стержня короткозамкнутой обмотки ротора приводит к повышенным вибрациям, уменьшению частоты вращения под нагрузкой, пульсациям тока статора последовательно во всех фазах.

Нарушение контактов пазных или сварных соединений в асинхронных двигателях эквивалентно по своему проявлению обрыву витков, стержней короткозамкнутых обмоток или фазы обмотки в зависимости от места нахождения данного соединения. Нарушение контакта в цепи щеток приводит к повышенному искрению между контактными кольцами и щетками. А в электродвигателях коллекторных переменного тока и машинах постоянного тока такое искрение имеет место между щетками и коллектором.

Недопустимое снижение сопротивления изоляции может быть в результате сильного загрязнения изоляции, увлажнения и частичного разрушения, вызванных старением изоляции, и как следствие – ее пробой и короткое замыкание.

Нарушение межлистовой изоляции сердечников магнитопроводов приводит к недопустимому повышению температуры отдельных участков магнитопровода и всего магнитопровода в целом, повышенному нагреву обмоток, выгоранию части магнитопровода (пожар в стали).

Засорение охлаждающих (вентиляционных) каналов приводит к недопустимому нагреву электродвигателя или отдельных его частей.

Выработка коллектора и контактных колец приводит к ухудшению коммутации, быстрому износу щеток и повышенному нагреву контактных колец и коллектора и сильному искрению (вплоть до «кругового огня»).

Электродвигатели чаще всего повреждаются из-за недопустимо длительной работы без ремонта (износ), плохого хранения и обслуживания, нарушения режима работы, на который они рассчитаны.

Одним из относительно слабых мест электрической машины является подшипниковый узел, особенно в скоростных машинах, 2-5 % электродвигателей отказывают из-за повреждения подшипников [43]. Более 80 % подшипников качения выходят из строя вследствие разрушений усталостного характера, а в подшипниках скольжения может быть выплавлена баббита. Все это приводит к нарушению соосности валов электродвигателя и

механизма, к появлению эксцентриситета ротора. Нередко отказ подшипниковых узлов приводит к пожароопасному температурному перегреву этих узлов и всего корпуса электродвигателя. Кроме того, возникающие в подшипниках большие трения увеличивают тормозной момент (нагрузку) на валу, отчего возрастает ток в обмотках статора и температура нагрева возрастает до пожароопасной.

Условия нагрева различных частей электродвигателей разные: нагрев подшипников определяется в основном потерями энергии в них и мало зависит от нагрева обмоток; нагрев обмотки статора определяется не только потерями энергии в самой обмотке, но и потерями в обмотке ротора и в стали магнитопроводов. Для приближенной оценки нагрева электродвигателя можно воспользоваться упрощенной моделью нагрева однородного тела, потери энергии в котором равны потерям в данном электродвигателе.

Предположим, потери мощности в электродвигателе, включая все потери, равны P. Тогда за элементарный промежуток времени потери энергии составят Pdt. При теплоемкости электродвигателя c энергия, идущая на нагрев тела от повышения температуры на dT, составит cdT. Другая часть этой энергии отдается в окружающую среду, например, окружающему воздушному пространству путем прямой теплопередачи, излучения и конвекции.

Отдача тепла зависит от разности температур нагретого тела и окружающего пространства, превышения температуры T и площади охлаждаемой поверхности S. Отдача теплоты прямой теплопередачей пропорциональна T. Количество теплоты, отдаваемой излучением, для абсолютно черного тела пропорционально разности температур нагретого тела и окружающей среды в четвертой степени. В узком диапазоне температур можно считать отдачу теплоты приблизительно T. Отдача теплоты конвекцией изменяется по сложному закону с изменением T. В узком диапазоне температур можно также считать отдачу теплоты пропорциональной T. При этих упрощениях можно определить отдачу теплоты телом за элементарный промежуток времени $kSTdt$, где k – коэффициент теплоотдачи, равный количеству энергии в джоулях, отдаваемой с охлаждающейся поверхности площадью 1 м^2 за 1 с при превышении температуры на один градус.

Уравнение нагрева однородного тела выглядит так:

$$Pdt = cdT + kSTdt. \tag{5.7}$$

Разделив обе части уравнения на $kSdt$, получим

$$T + (c/kS)\,(dT/dt) = P/kS. \tag{5.8}$$

По окончании процесса изменения температуры $dT/dt = 0$ и $T_{уст} = P/(kS)$, т.е. правая часть последнего выражения при P=const определяет установившееся превышение температуры $T_{уст}$.

Величину $c/(kS)$, измеряемую в Дж·°С·с, назовем постоянной времени нагрева $\tau_н$. С учетом этих замечаний получим

$$T + [\tau_н(dT/dt)] = T_{уст}. \quad (5.9)$$

Решение этого уравнения будет иметь следующий вид:

$$T = T_1 e^{-\frac{t}{\tau}} + T_2 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (5.10)$$

где T_1 – начальное превышение температуры тела; T_2 – конечное установившееся превышение температуры при данных потерях P.

Если $T_1 = 0$, т.е. температура электродвигателя в начале работы не отличалась от температуры окружающей среды, электродвигатель к началу работы полностью охладился, и выражение для T имеет вид

$$T = T_2 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}). \quad (5.11)$$

Превышение температуры при работе возрастает по экспоненциальному закону; постоянная времени $\tau_н$ может быть определена графическим построением. Установившееся превышение температуры достигается при $t \to \infty$, практически температура устанавливается по истечении времени $t \le (3 - 4)\tau_н$.

Постоянные времени нагрева имеют значение от нескольких минут, для электродвигателей малой мощности, до нескольких часов, для мощных электродвигателей.

Как видно из краткой характеристики отказов двигателей, их можно разделить на две категории (по причине появления отказа) – электрические и механические. Все они могут обусловливать аварийные пожароопасные режимы их работы. Поэтому в процессе эксплуатации электродвигателей важное значение имеет выполнение и соблюдение сроков планово-предупредительных осмотров и ремонтов [10].

Взрывозащищенные электродвигатели имеют худшие условия охлаждения. Поэтому контроль и профилактика условий и режимов эксплуатации взрывозащищенных электродвигателей должны быть безупречными в соответствии с установленными для конкретных условий регламентами и требованиями гл. 3.4 [10].

5.3. ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Применительно к силовым трансформаторам следует различать номинальную мощность и нагрузочную способность. Номинальная мощность

данного трансформатора однозначна. Это – некоторая вполне определенная мощность, которую он при экономически рациональном КПД может отдавать постоянно, без перерыва, в течение всего своего нормального срока службы. Нагрузочная способность – это мощность, которую трансформатор может отдавать только в течение заданного короткого промежутка времени. Величина этой мощности зависит от условий эксплуатации, в которых трансформатор находится в рассматриваемый момент, и от того, должна ли она допускаться без ущерба для его нормального срока службы или же за счет некоторого увеличения естественного износа его изоляции.

В реальных условиях эксплуатации, как правило, силовые трансформаторы загружаются неравномерно. Отклонение от среднесуточной нагрузки достигает 50-75 %.

Перегрузка трансформатора свыше 75 % от номинальной допускается лишь на несколько минут и в редких случаях – на несколько часов. И наконец, в промышленных условиях имеют место перегрузки, связанные с пусковыми токами электродвигателей, длительность которых составляет 10-40 с. В связи с тем, что пусковые токи могут быть систематическими, перегружающие трансформаторы на 300-500 %, на предприятиях разрабатываются соответствующие структуры и графики электроснабжения, снижающие значительные перегрузки, повышающие общий срок службы питающих трансформаторов.

Образующиеся в трансформаторе (в обмотках и магнитопроводе) во время работы потери энергии превращаются в тепло. Значение установившегося при данной нагрузке превышения температуры над температурой окружающей среды зависит от величины теплоотдающей поверхности трансформатора и от интенсивности теплоотдачи.

Общее дифференциальное уравнение нагревания и охлаждения трансформатора, если принять его за однородное тело, ничем не отличается от уравнения (5.11).

В случае коротких замыканий интенсивный перегрев обмоток приводит к увеличению активного сопротивления проводов обмоток; потери тепла возрастают. Эту особенность следует учитывать при расчетах превышения температуры трансформаторов.

5.4. СНИЖЕНИЕ ПОЖАРООПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ТРАНСФОРМАТОРОВ

Пожарная опасность электродвигателей, трансформаторов, электропроводки и других электротехнических изделий в значительной степени определяется надежностью электроизоляции. Основной характеристикой

электроизоляции электротехнических изделий является ее электрическая прочность, которая (в зависимости от условий эксплуатации и вида изделия) определяется механической прочностью, эластичностью, исключающей возможность образования остаточных деформаций, трещин, расслоений под воздействием механических нагрузок. Однородность и монолитность структуры изоляции, ее высокая теплопроводность исключает вероятность возникновения местных нагревов, приводящих к уменьшению электрической прочности.

Разрушение изоляции происходит в основном в результате нагрева токами нагрузок и воздействий температур внешней среды, вибраций и других механических воздействий. Повышение температуры на каждые 8-9 °С в среднем вдвое сокращает срок службы изоляции. На старение изоляции влияет и электрическое поле.

Электроизоляционные материалы по нагревостойкости, т.е. способности выдерживать заданную рабочую температуру и выполнять свои функции, делятся по ГОСТ 8865-70 на семь классов V, A, E, B, F, H, C.

Наиболее употребительны материалы классов A, E, B, F. В класс A входят пропитанные волокнистые материалы из целлюлозы и шелка; в класс B – материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с органическими связующими и пропитывающими составами. Для изоляции обмоток применяются материалы классов A, E, B, F, H, для которых в табл. 2.14 приведены допустимые температуры.

Срок службы старения изоляции $t_{ст}$ в зависимости от температуры T равен [48]

$$t_{ст} = A \exp(-\nu T), \qquad (5.12)$$

где A - срок службы изоляции при T=0 (некоторая условная величина); ν - коэффициент, характеризующий степень старения в зависимости от класса изоляции.

Для расчетов срока службы изоляции обычно пользуются установленным экспериментально более простым «восьмиградусным правилом». Согласно этому правилу, длительное превышение температуры проводника сверх допустимого на каждые 8 градусов приводит к ускорению износа его изоляции вдвое. Этот закон относительно старения изоляции может быть выражен зависимостью

$$И = 2^{(t_у - t_{у.н})/8}, \qquad (5.13)$$

где $И$ – величина относительного старения изоляции; $t_у$, $t_{у.н}$ – установившееся превышение температуры нагрева проводника над температурой окружающей среды (соответственно фактическое и длительно допустимое по нормам), °С.

Так, согласно ПУЭ, температура проводов с резиновой изоляцией может превышать температуру воздуха (25 °С) на 40 °С. Если скорость старения изоляции при таком перегреве принять за единицу, то при нагреве, например, на 48 °С $И = 2^{(48-40)/8} = 2$.

Следовательно, изоляция при таком превышении допустимого нагрева состарится соответственно в два раза быстрее, чем при перегреве на 40 °С.

Свойства полимерных диэлектриков определяются структурами молекул, т.е. длиной макромолекулы и силой межмолекулярных взаимосвязей, которые, в свою очередь, пропорциональны концентрации молекул, участвующих в химической реакции.

Мера прочности изоляции E/E_0 пропорциональна скорости химической реакции, зависящей от температуры:

$$\ln(E/E_0) = -kt, \tag{5.14}$$

где E/ E_0 – значения рабочей характеристики для моментов времени 0 и t соответственно.

В соответствии с уравнением (5.14) срок службы изоляции при неизменной температуре определяется из уравнения [48]

$$\ln t_{ст} = B/T + \ln k_0 + \ln(E/E_0). \tag{5.15}$$

Логарифм меры механических, физических и диэлектрических характеристик связан прямолинейной зависимостью со временем теплового старения изоляции. Если выбрать как меру теплового старения определенное значение какой-либо рабочей характеристики диэлектрика (например, указанное выше отношение E/E_0), время $t_{ст}$, по истечении которого изоляция достигает этого состояния, может быть определено из уравнения

$$\ln t_{ст} = (B/T) + y \tag{5.16}$$

или

$$t_{ст} = \exp[(B/T) + y]. \tag{5.17}$$

Эта зависимость срока службы от температуры, подтвержденная опытами с изоляцией электротехнических изделий, показывает начальный разброс коэффициентов B и y для одного и того же типа изоляции, что объясняется не только некоторыми различиями условий экспериментов, но, главным образом, тем, что механическая и электрическая прочность материалов носит случайный характер, поэтому указанные зависимости можно интерпретировать только как зависимости между средними значениями срока службы и прочности в одинаковых температурных условиях. Время, за которое изоляция достигнет некоторого критического значения рабочей характеристики для определенных температурных условий, является случайной величиной

$$t_{ст} = (1/k_0) \ln(E/E_0) \exp(B/T). \tag{5.18}$$

Существенным фактором, способствующим интенсивному старению изоляции, является механическая нагрузка на нее, в особенности обусловленная электродинамическими процессами при резких изменениях тока. Предел механической прочности быстро снижается по мере нагрева. Электродинамические силы, воздействующие во время изменений тока, пропорциональны квадрату мгновенного значения тока.

Влияние вибрационных нагрузок на старение изоляции и потери прочности до наступления электропробоя еще недостаточно изучено. Обычно на электрооборудование устанавливается гарантийный срок службы, но не указывается, с какой степенью надежности и, тем более, пожарной безопасности оно должно работать в течение этого срока.

5.5. ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ УПРАВЛЕНИЯ

Электрические аппараты управления – это слаботочные (с точки зрения собственного потребления) электротехнические устройства, предназначенные для управления сильноточными электроустановками. Основными видами аппаратов управления являются: контакторы, магнитные пускатели, контроллеры.

По принципу коммутации силовых цепей аппараты управления подразделяются на контактные и бесконтактные. Первые имеют подвижные контактные части, размыкающие и замыкающие сильноточные электрические цепи. Бесконтактные аппараты не имеют подвижных коммутирующих контактов. Как правило, последние используют управляемые полупроводниковые или магнитные элементы, коммутирующие сильноточные цепи за счет изменения своего сопротивления под действием слаботочных сигналов. К аппаратам управления предъявляются следующие общие требования.

1. Каждый аппарат потребляет электрический ток, определенную электрическую мощность, значительная часть которой преобразуется в тепло. При этом температура не должна превышать некоторого определенного значения, устанавливаемого для данного аппарата и его деталей.

2. В каждой электрической цепи может быть ненормальный (перегрузка) или аварийный (короткое замыкание) режим работы. Ток, протекающий по аппарату в этих режимах, во много раз превышает рабочий (номинальный). При этом аппарат в течение определенного времени подвергается чрезмерно большим термическим и электродинамическим воздействиям тока, которые он должен выдерживать без каких-либо повреждений.

3. Каждый аппарат работает в электрической цепи с определенным напряжением, где возможны и перенапряжения. При этом электроизоляция аппарата должна обеспечивать надежную работу его при заданных значениях напряжений.

4. Контакты аппаратов (или сильноточные бесконтактные управляемые элементы) должны быть способны коммутировать токи рабочих режимов, а многие – аппараты и токи аварийных режимов, которые могут возникнуть в управляемых силовых цепях.

5. Каждый аппарат должен обладать определенной надежностью и сроком службы.

Аппараты управления бывают высоковольтные – коммутирующие высоковольтные силовые цепи, низковольтные – коммутирующие низковольтные силовые и осветительные цепи.

Аппараты обычного исполнения применяются в нормальных условиях окружающей среды. Для взрывоопасной среды изготавливаются аппараты взрывозащищенные.

Из всех аппаратов управления самое широкое распространение получили электромагнитные контакторы, применяемые в схемах дистанционного управления различными промышленными электроприводами. Контакторы состоят из системы главных контактов, электромагнитной системы, дугогасителей и вспомогательных контактов. Главные контакты осуществляют замыкание и размыкание силовой цепи.

Электромагнитная система обеспечивает дистанционное управление контактором, т.е. включение и отключение. Дугогасительная система обеспечивает гашение электрической дуги, возникающей при размыкании главных силовых контактов. Вспомогательные контакты производят переключение в цепях управления контактора, блокировки и сигнализации.

Контакторы переменного тока промышленной частоты изготовляются, как правило, трехполюсными с замыкающими главными силовыми контактами.

Электромагнитные системы бывают поворотные (Е-образные, П-образные, клапанные и др.) и прямоходные (Ш-образные, Т-образные, соленоидные).

Электромагнитная система, независимо от типа, состоит из сердечника, якоря, короткозамкнутого витка и катушки с крепежными деталями.

Основой всякого магнитного пускателя является контактор. Магнитный пускатель представляет собой комплексное устройство, состоящее из трехполюсного контактора, двух тепловых реле и кнопки управления («пуск», «стоп»).

В производственных условиях нередко применяются так называемые станции управления, представляющие собой комплект смонтированных совместно аппаратов управления, защиты и блокировки, предназначенный для дистанционного автоматизированного управления асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором при длительном режиме работы. Станция состоит из блоков управления (БУ). В блоке на отдельной

изоляционной плите (без рамы) собраны все необходимые аппараты. Станции управления собираются в щиты, крепящиеся на рамах из угловой стали, называемые щитами станций управления (ЩСУ). Их обычно устанавливают в электропомещениях вместе с распределительными щитами.

Во взрывоопасных зонах используют взрывозащищенные магнитные пускатели вида «е» (повышенной надежности против взрыва) и с масляным наполнением серии ПМ (рис. 5.4) со знаками взрывозащиты НМБ (ПМ712А-25, ПМ712-100 и ПМ711А-250), НМГ (ПМ722А-25, ПМ722А-100, ПМ721-250). Они выпускаются на номинальные токи 25, 100, 150 А при напряжении до 500 В.

Пускатели ПМ711А, ПМ712А имеют расцепители для тепловой защиты и нулевую защиту. Остальные пускатели имеют только нулевую защиту. Бак пускателя заливают трансформаторным маслом, без которого эксплуатация пускателя запрещена. В бак погружены искрящие контакты (главные силовые и блокировочные) и шины. Остальные детали (тепловое реле с механизмом включения, присоединительные силовые зажимы) размещаются в коробке пыле- и водозащищенного исполнения. Управляют пускателями при помощи встроенной кнопки. Пускатель допускает дистанционное управление посредством кнопочного поста.

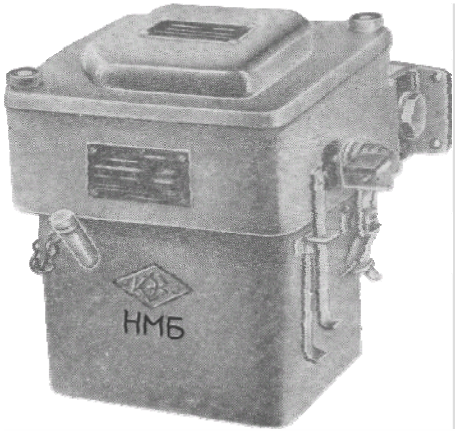


Рис. 5.4. Магнитный пускатель повышенной надежности против взрыва (защита вида «е») с масляным наполнением серии ПМ-700. Обозначение взрывозащиты НМБ

Кнопочные станции (посты) и ключи управления представляют собой контактные устройства с одной, двумя или тремя кнопками и одним-двумя поворотными ключами. Нажатием кнопки или поворотом ключа производят замыкание или размыкание контактов, и следовательно, включение и отключение присоединенных к ним цепей. Кнопочные станции изготовляются для сетей переменного тока напряжением до 380 В и постоянного тока - до 440 В. Для взрывоопасных установок изготовляют кнопочные станции КУ-90-В3Г, КУВ, маслонаполненные ключи управления КУ-700 и др.

Кнопки и путевые выключатели применяют в схемах управления электроприводом кранов и задвижек. Они предназначены для отключения электродвигателей при достижении механизмами отдельных промежуточных и конечных положений. Выпускают выключатели нескольких марок в различных исполнениях взрывозащиты, например ВК-700 (МОД), ВП-700 (МОД), КВ-4 и КВ-5 в исполнении В3Г, ВК-В3Г и др. Некоторые данные кнопочных постов, выключателей и других аппаратов приведены в табл. 5.4.

Электрические аппараты состоят из отдельных деталей и проводников, электрически соединенных между собой. Место перехода тока из одной токоведущей детали в другую называют электрическим контактом.

Разборные контакты – это контакты, у которых в процессе работы детали не перемещаются относительно друг друга, а остаются надежно скрепленными, например болтовые соединения шин, присоединение проводников к зажимам и т.д.

Таблица 5.4

Аппарат					
Наименование	Тип	Область применения			
		Категория взрывоопасной смеси	Группа взрывоопасной смеси	Маркировка взрывозащиты	Класс взрывоопасной зоны
Кнопочный пост управления	КУВ-1(2,3)	1	А	В1А	В-I(1), В-Iа(2), В-Iг(2), В-II(21), В-IIа(22)
То же	КУВ-11(12,13) КУ-91В3Г(92,93) КУ-В3Г-М-1(2,3) КУВ-1П(2П,3П) КУ-90(1,2,3) ПВ ПВ-К КУ-700	1 1,2,3 1,2,3 1,2,3 IIA,IIB 1-4 IIA,IIB,IIC 1,2,3,4	А А,Б,Г А,Б,Г А,Б,Г Т1-Т5 Т1-Т5 Т1-Т6 А,Б,Г,Д	В1А В3Г В3Г В3Г 1ExdIIBT5 В4Т5-В 1ExdIICT6 МОД	То же

Окончание табл. 5.4

Аппарат					
Наименование	Тип	Область применения			
		Категория взрывоопасной смеси	Группа взрывоопасной смеси	Маркировка взрывозащиты	Класс взрывоопасной зоны

Выключатели конечные и путевые, переключатели	ВКМ-1(2)	IIA,IIB,IIC	T1-T5	1ExdIIBT5	То же
				1ExdIICT5	«
	ВВ-5(6)	1	А	В1А	«
	ВК-ВЗГ	1,2,3	А,Б,Г	ВЗГ	«
	ВК-ВЗГ-М	1,2,3	А,Б,Г	ВЗГ	«
	КВ-4(9)	1,2,3	А,Б,Г	ВЗГ	«
	ВК-700	1,2,3,4	А,Б,Г,Д	МОД	В-I(1),
	УП 5800	1-4	А-Д	МОД(В4Т5-М)	В-Iа(2)
	ВП-701	1-4	А-Д	МОД(В4Т5-М)	В-Iб(3)
	ВП-701	II	T1-T6	1Ex0IIT6	То же
	ВП-4М	IIA	T1-T6	1ExdIIAT6	«
	ВПВ-4М	IIA,IIB,IIC	T1-T6	1ExdIICT6	«
	ВПВ-1	IIA,IIB,IIC	T1-T6	1ExdIICT6	«
Командоаппарат кулачковый	КА-4800	1-4	T1-T5	В4Т5-М	«
Блоки контактные	БКВ-1	IIA,IIB,IIC	T1-T6	1ExdIICT6	«
Разъем взрывозащищенный	ВР-61М	IIA,IIB	T1-T4	1ExdIIBT4	«
Ящики клеммные	ЯК	II	T1-T5	2ExeIIT5	В-Iа(2) В-Iг(2) ВII(21) ВIIа(22)
Устройства заземления автоцистерн	УЗА-2МК УЗА-2МН	IIA-IIC	T1-T6	1Exsi$_b$IIT6 1ExsIIT6	В-I(1), В-Iа(2), В-Iг(1,2)

Коммутирующие контакты – это контакты, которые в процессе работы замыкают или переключают цепь с током, например контакты выключателей, контакторов, магнитных пускателей и т.д.

Скользящие контакты – разновидность коммутирующих контактов, у которых одна из деталей перемещается (скользит) относительно другой, но электрический контакт при этом не нарушается, например контакты реостатов, щеточные контакты токосъемника и др.

В зоне перехода тока из одного тела в другое имеет место электрическое сопротивление, называемое переходным сопротивлением контакта. Величина его определяется выражением

$$R_{\text{п}} = \varepsilon / F^{n}, \qquad (5.19)$$

где ε - некоторая величина, зависящая от материала и формы контакта, способа обработки и состояния контактной поверхности; F – сила, сжимающая контакты; n – показатель степени, характеризующий число точек соприкосновения в контакте.

С увеличением точек соприкосновения переходное сопротивление контакта уменьшается. Для точечного контакта принимают n = 0,5; для многоточечного – n = 0,7-1; для поверхностного – n = 1. Значения ε выбирают из справочных таблиц.

На рис. 5.5 показана зависимость переходного сопротивления контакта от давления. При одном и том же нажатии переходное сопротивление одного и того же контакта при каждом замыкании может быть разным и различаться в достаточно широких пределах. Это объясняется тем, что число точек контактирования при каждом замыкании может быть разным.

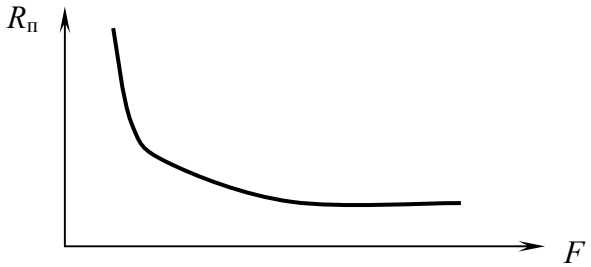


Рис. 5.5. Зависимость переходного сопротивления от силы сжатия контактов

Переходное сопротивление контакта зависит от температуры, так как при этом изменяется структура площадок соприкосновения за счет изменения удельного сопротивления смятию. Для меди

$$R_{п.т} = R_{п.хол}(1+{}^{2}/_{3}\alpha T), \qquad (5.20)$$

где α - температурный коэффициент.

С ростом температуры переходное сопротивление вначале растет (рис. 5.6, участок I), затем при некоторой температуре (для меди и серебра при 200-300 °С)происходит резкое падение механических свойств материала. При том же нажатии увеличивается площадка контактирования, переходное сопротивление (участок II) резко падает. И далее (участок III) сопротивление линейно растет с ростом температуры, а при температуре плавления материала контакты свариваются, переходное сопротивление резко падает (участок IV).

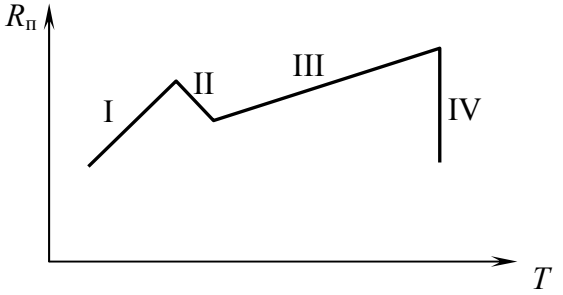


Рис. 5.6. Зависимость переходного сопротивления
от температуры контактов

При прохождении тока в площадке контактирования из-за наличия переходного сопротивления будет выделяться энергия $I^2R_{\text{п}}dt$. Превышение температуры площадки контактирования над температурой теплоотдающей поверхности контакта будет равно

$$T_{\text{к}}\text{-}T_{\text{п}} = \Delta T_{\text{к}} = I^2\rho\pi\sigma/32\lambda F, \qquad (5.21)$$

где ρ - удельное сопротивление материала контакта; σ -временное сопротивление смятию металла, Н/мм^2 (для алюминия оно составляет 900 Н/мм^2, меди – от 390 до 520 Н/мм^2, серебра 310 Н/мм^2); λ - коэффициент теплопроводности материала контакта; F – сила контактного нажатия.

Если принять, что переходное сопротивление контакта

$$R_{\text{п}} = \rho/2r,$$

где r – радиус площадки контактирования, и полагая, что ее размер равен πr^2, то

$$\Delta T_{\text{к}} = 1/8\ (U^2_{\text{п}}/\lambda\rho), \qquad (5.22)$$

где $U_{\text{п}}$ – падение напряжения на переходном сопротивлении контакта.

На рис. 5.7 приведена зависимость повышения температуры площадки контактирования от падения напряжения в контактном соединении. При протекании через контактные соединения тока короткого замыкания возникает опасность сваривания контактов. Следует отметить, что при коротком замыкании не только резко увеличивается ток, но и возрастает переходное сопротивление контакта из-за ослабления контактного нажатия, вызываемого электродинамическими силами. Тепловая энергия, выделяемая в месте контакта, равна

$$Q_{\text{к}} = \int_0^{t_{\text{кз}}} i^2 R_{\text{П}} dt. \qquad (5.23)$$

В случае замыкания или размыкания контактов при коротком замыкании в коммутируемой цепи происходит сильное оплавление, а иногда и разлетание расплавленных частиц металла. Такие явления нередко приводят к загораниям самих аппаратов или к поджогам близлежащих горючих материалов.

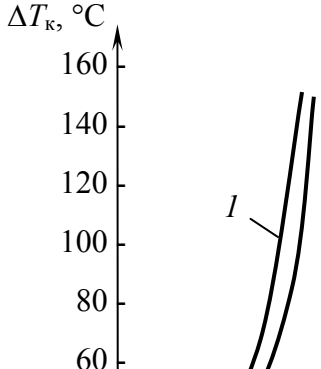


Рис. 5.7. Зависимость повышения температуры площадки контактирования от падения напряжения в контактном соединении:
1 – серебро; *2* – медь

Наибольшую пожарную опасность аппаратов создают токи короткого замыкания. Поэтому для каждого аппарата задается ток допустимой величины, тепловое воздействие которого аппарат может выдержать в течение заданного времени без вывода его из строя. Эта величина тока называется током термической устойчивости. Чаще всего задается ток десяти-, пяти- или односекундной термической устойчивости.

При коротком замыкании в коммутируемой сети через токоведущую часть аппарата могут протекать токи, в десятки раз превышающие номинальные. Эти токи, взаимодействуя с магнитным полем, создают электродинамические усилия, способные деформировать токоведущие части, изоляторы, на которых они крепятся, разрушить аппарат, вызвать пожар. Сила, действующая на проводник,

$$F = \int_0^1 Bi \sin \beta dl, \tag{5.24}$$

где B – магнитная индукция поля; i – ток, протекающий в проводнике; l – длина проводника; β - угол между векторами индукции и направления тока.

В случае любого расположения проводников в одной плоскости ($\beta = 90°$)

$$F = \int_0^1 Bidl. \tag{5.25}$$

Сила взаимодействия двух проводников, по которым протекают токи i_1 и i_2 в противоположных направлениях (рис. 5.8), выражена в ньютонах:

$$F=10^{-7}i_1 i_2 k_д, \tag{5.26}$$

где $k_д$ – коэффициент, характеризующий размер и расположение проводников.

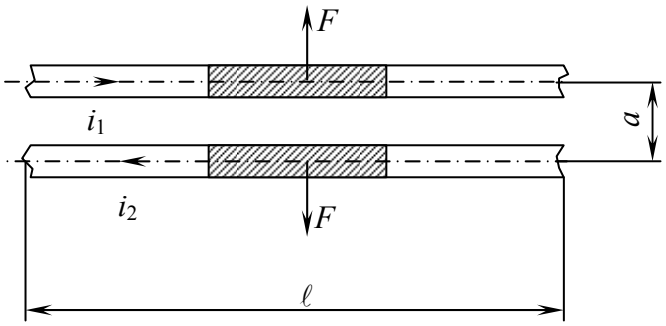


Рис. 5.8. Схема взаимодействия двух проводников с токами

Если расстояние между проводами значительно меньше их длины, можно принять $k_д = 2l/a$.

При протекании по проводам переменных токов ($i = I_{max} \cdot \sin\omega t$)

$$F = cI_{m1}I_{m2}\sin^2\omega t. \tag{5.27}$$

Если токи равны,

$$F = cI^2_m[(1-\cos2\omega t)/2] = (F_m/2)-[(F_m/2)\cos\alpha\omega t], \tag{5.28}$$

где c – постоянная, учитывающая геометрические размеры проводов, расстояние между ними, систему принятых единиц и магнитную проницаемость воздуха; F_m – максимальное значение силы.

Таким образом, сила имеет постоянную $\frac{cI_m^2}{2}$ и переменную составляющие $\frac{cI_m^2}{2}\cos\omega t$.

Среднее значение силы за период равно

$$F_{ср} = (1/T)\int_0^l F dt = cI_m^2/2 = cI^2, \tag{5.29}$$

где I – действующее значение тока.

На рис. 5.9 показано изменение силы во времени при переменном токе. Характерно, что в однофазной цепи сила, меняясь во времени, не изменяет своего знака.

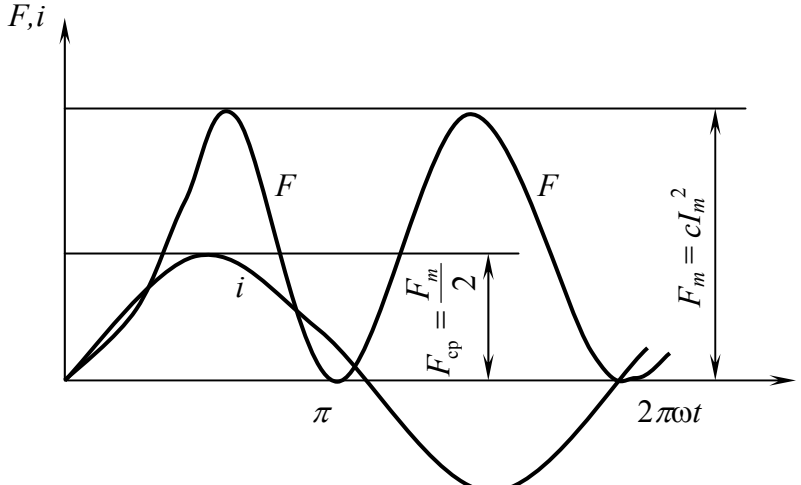


Рис. 5.9. Кривая изменения силы во времени
при однофазном переменном токе

При переменном токе может иметь место (в зависимости от момента короткого замыкания) ударный ток, превышающий амплитудное значение в 3,24 раза:

$$F = 3{,}24cI^2_m. \tag{5.30}$$

Электродинамические силы в трехфазной системе проводников изменяются во времени как по величине, так и по направлению. Аппараты управления характеризуются электродинамической устойчивостью – способностью противостоять силам, возникающим при протекании токов короткого замыкания. Эта устойчивость может выражаться либо непосредственно амплитудным значением тока $i_д$, при котором механические напряжения в деталях аппарата не выходят за пределы допустимых величин, либо кратностью этого тока относительно амплитуды номинального тока.

Иногда динамическая устойчивость оценивается действующим значением ударного тока за период после начала короткого замыкания.

Контакт может быть представлен как проводник переменного сечения (рис. 5.10). В месте сужения линий тока возникают продольные электродинамические силы, стремящиеся разомкнуть контакты. Для одноточечных контактов значение этих сил определяется выражением

$$F = 10^{-7} i^2 \ln(S/S_0), \tag{5.31}$$

для многоточечных

$$F = 10^{-7}(i^2/n)\ln(S/S_0), \tag{5.32}$$

где S – сечение контакта в том месте, где нет искривлений линии тока; S_0 – фактическая площадь контактирования; n – число мест контактирования.

В аппаратах, рассчитанных на большие токи, стремятся конструктивными решениями снизить влияние электродинамических сил при коротких замыканиях.

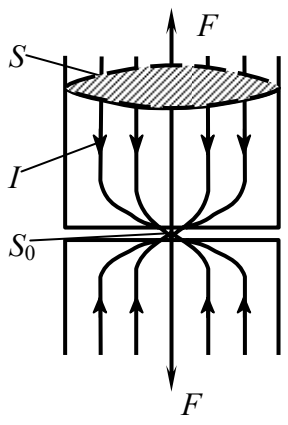


Рис. 5.10. Схема контакта и действие электродинамических сил

В неразмыкаемых контактах (соединениях) со временем переходное сопротивление увеличивается вследствие окисления на контактирующих площадках, ослабления силы нажатия. При протекании токов коротких замыканий возникают электродинамические силы, ухудшающие или даже разрушающие контактные соединения, что нередко является причиной загораний.

Таким образом, электрические аппараты управления и даже аппараты защиты электроустановок пожароопасны в процессе нормальной эксплуатации и тем более пожароопасны при ухудшении конструктивно-технических показателей (механических ослаблениях, загрязнениях и износах контактных соединений и др.). Пожарная опасность электрических аппаратов управления резко возрастает при коротких замыканиях в коммутируемых силовых цепях.

Коммутирование электрических цепей, особенно размыкание под током, сопровождается электрическим разрядом между расходящимися контактами. Воздушный промежуток между контактами ионизируется и становится на некоторое время проводящим, в нем возникает дуга.

На рис. 5.11 показана зависимость падения напряжения на разрядном промежутке от тока электрического разряда в газах. Первый участок (область I) кривой, представляющий собой область тлеющего разряда, характеризуется высоким падением напряжения у катода (200-250 В) и малыми токами (до 0,1 А). При тлеющем разряде плотность тока в разрядном промежутке измеряется несколькими микроамперами на 1 см^2. С ростом тока увеличивается падение напряжения на разрядном промежутке (до 300-400 В). Второй участок кривой (область II) представляет собой переход из тлеющего разряда в дуговой. Третий участок кривой – дуговой разряд (область III) – характеризуется малым падением напряжения у электродов (10-20 В) и большой плотностью тока (до 100 кА/см^2). С ростом тока напряжение на дуговом промежутке сначала падает, а затем мало меняется.

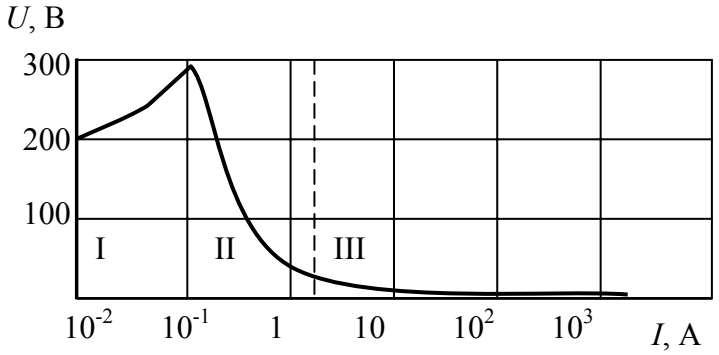


Рис. 5.11. Вольтамперная характеристика
электрического разряда в газах

Электрическая дуга сопровождается высокой температурой и связана с этой температурой. Поэтому дуга – явление не только электрическое, но и тепловое.

Сопротивление дуги $R_д$ независимо от рода тока можно считать чисто активным. Оно является величиной переменной, падающей с ростом тока, и может быть определено из вольтамперной характеристики дуги

$$R_д = U_д / i.$$

Мощность электрической дуги

$$P_д = U_д i. \tag{5.33}$$

Энергия, выделяемая в дуге за время $\tau_г$ ее горения, равна

$$W_д = \int_0^{t_г} U_д \, i d\tau. \tag{5.34}$$

Открытая электрическая дуга сопровождается выделением большого количества светящихся газов, представляющих собой пламя дуги. Большая концентрация заряженных частиц (положительных и отрицательных) в пламени приводит к большой проводимости. Высокая проводимость пламени дуги приводит к тому, что это пламя может вызвать при напряжении в несколько десятков вольт перекрытие таких промежутков, которые в нормальных условиях не пробиваются при десятках тысяч вольт. Вторая опасность связана с выделением пламени высокой температуры, представляющей пожарную опасность как для самого аппарата, так и для поджога легковоспламеняющихся материалов, расположенных в непосредственной близости.

В пламени происходят пожароопасные химические процессы. Пары меди контактов, попадая в пламя дуги, окисляются и поглощают кислород воздуха. Оставшийся после этого азот соединяется с парами воды и кислородом, образуя азотную кислоту. Капли этой кислоты могут образовать проводящие контактные перемычки и привести к пожароопасным замыканиям токоведущих частей в таких местах, куда ни дуга, ни ее пламя не могут попасть.

Для снижения пожароопасных последствий дуги в аппаратах управления применяют различные способы гашения. Так, эффективным способом гашения электрической дуги являются узкие продольные щели различных

конфигураций. Установка решеток из теплопроводящих металлических пластин над узкой щелью дугогасительной камеры в значительной степени содействует полной деионизации дуги и ее пламени и тем самым обеспечивает их гашение.

Для тушения дуги в аппаратах управления применяют и другие способы:

с помощью высокого атмосферного давления, снижающего степень ионизации пламени;

воздушным дутьем за счет механического разрушения дуги и интенсивного охлаждения нагретых ионизированных частиц дугового промежутка.

В ряде случаев для тушения дуги в аппаратах управления используют магнитное поле. Оно воздействует на дугу как на проводник с током, перемещает его в направлении разрушающих приспособлений. В большинстве случаев магнитное поле создается отключением токов.

В последние годы в связи с развитием электронной техники создаются и все шире применяются устройства бесконтактной коммутации силовых цепей. Для этих целей используются тиристоры, способные пропускать большие токи при малом падении напряжения. Тиристор пропускает ток только в одном направлении и только тогда, когда на управляющий электрод будет подан положительный потенциал. При снятии этого потенциала тиристор остается открытым до тех пор, пока по нему протекает ток определенной величины. Так как синусоидальный переменный ток за период обязательно дважды проходит через нуль, тиристор дважды за период может быть выключен.

Схема однофазного тиристорного ключа приведена на рис. 5.12. Импульсы управления формируются из анодных напряжений тиристоров. Если на аноде тиристора Д1 положительная полуволна напряжения, при замыкании ключа *К* через диод Д3 и резистор *R* пройдет импульс тока управления тиристором Д1. В результате тиристор Д1 включится, анодное

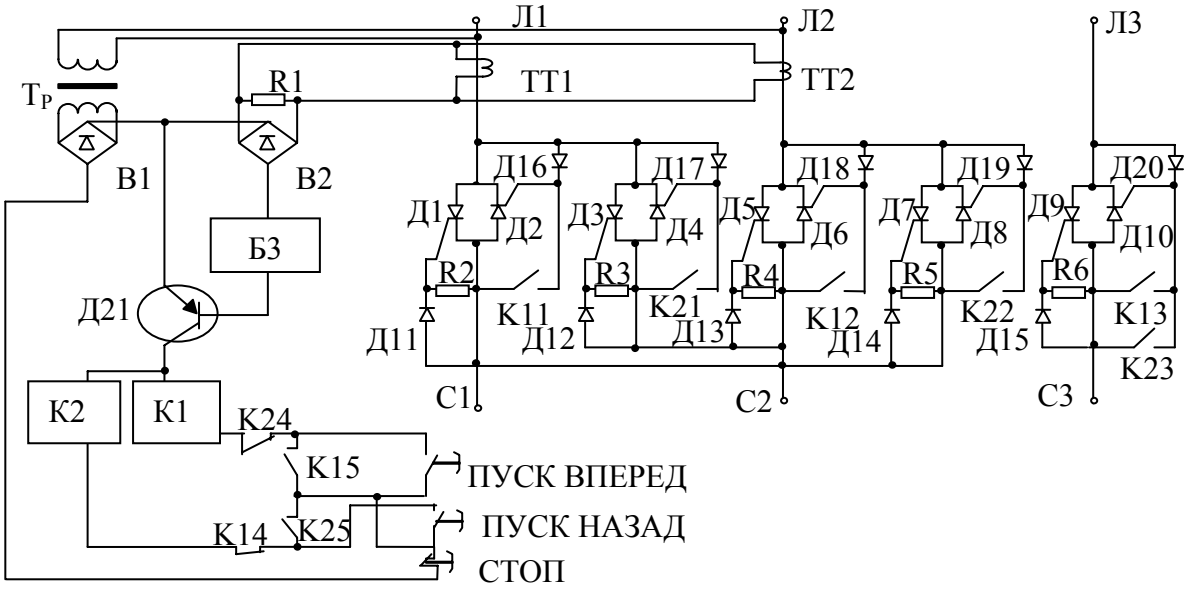


Рис. 5.13. Схема трехфазного реверсивного тиристорного пускателя

напряжение упадет почти до нуля, сигнал управления исчезнет, но тиристор останется в проводящем состоянии до конца полупериода, пока анодный ток не пройдет через нуль. В другой полупериод (при противоположной полярности напряжения сети) аналогично включается тиристор Д2. Пока ключ *К* будет замкнут, тиристоры будут автоматически поочередно включаться, обеспечивая прохождение тока от источника к нагрузке. Такие тиристорные ключи являются основой однофазных и трехфазных коммутирующих устройств. На рис. 5.13 в качестве примера изображена схема реверсивного пускателя для асинхронных двигателей. Силовыми коммутирующими элементами являются тиристоры Д1-Д10, которые открываются контактами К11, К12, К13 реле К1 (вперед) или контактами К21, К22, К23, реле К2 (назад). Трансформаторы тока ТТ1 и ТТ2 подают сигнал перегрузки в блок защиты Б3, который, воздействуя на базу транзистора Т21, снимает питание реле К1, К2 и тем самым приводит к отключению пускателя.

Бесконтактные аппараты управления более долговечны и более пожаробезопасны.

Глава 6

ЭЛЕКТРООСВЕТИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

6.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА

По принципу преобразования электрической энергии в энергию видимых излучений источники света делятся на две группы: тепловые (в основном лампы накаливания) и газоразрядные (ртутные трубчатые люминесцентные лампы низкого давления и ртутные лампы высокого давления с исправленной цветностью типа ДРЛ). К последней группе относятся металлогалогенные лампы (ДРИ, ДРИЗ) и натриевые лампы высокого давления (ДНаТ), а также мощные дуговые ксеноновые трубчатые лампы, типа ДКсТ (только для наружного освещения).

В лампах накаливания излучение происходит от накаленного до высокой температуры (2500-3000 К) вольфрамового тела в стеклянной колбе, в которой создан вакуум или находится инертный газ. Лампы различают по мощности (15-1500 Вт), напряжению (12-220 В), световому потоку, конструктивному исполнению и др. Они делятся на две группы:

общего назначения - для общего и местного освещения в быту и промышленности, а также для наружного освещения;

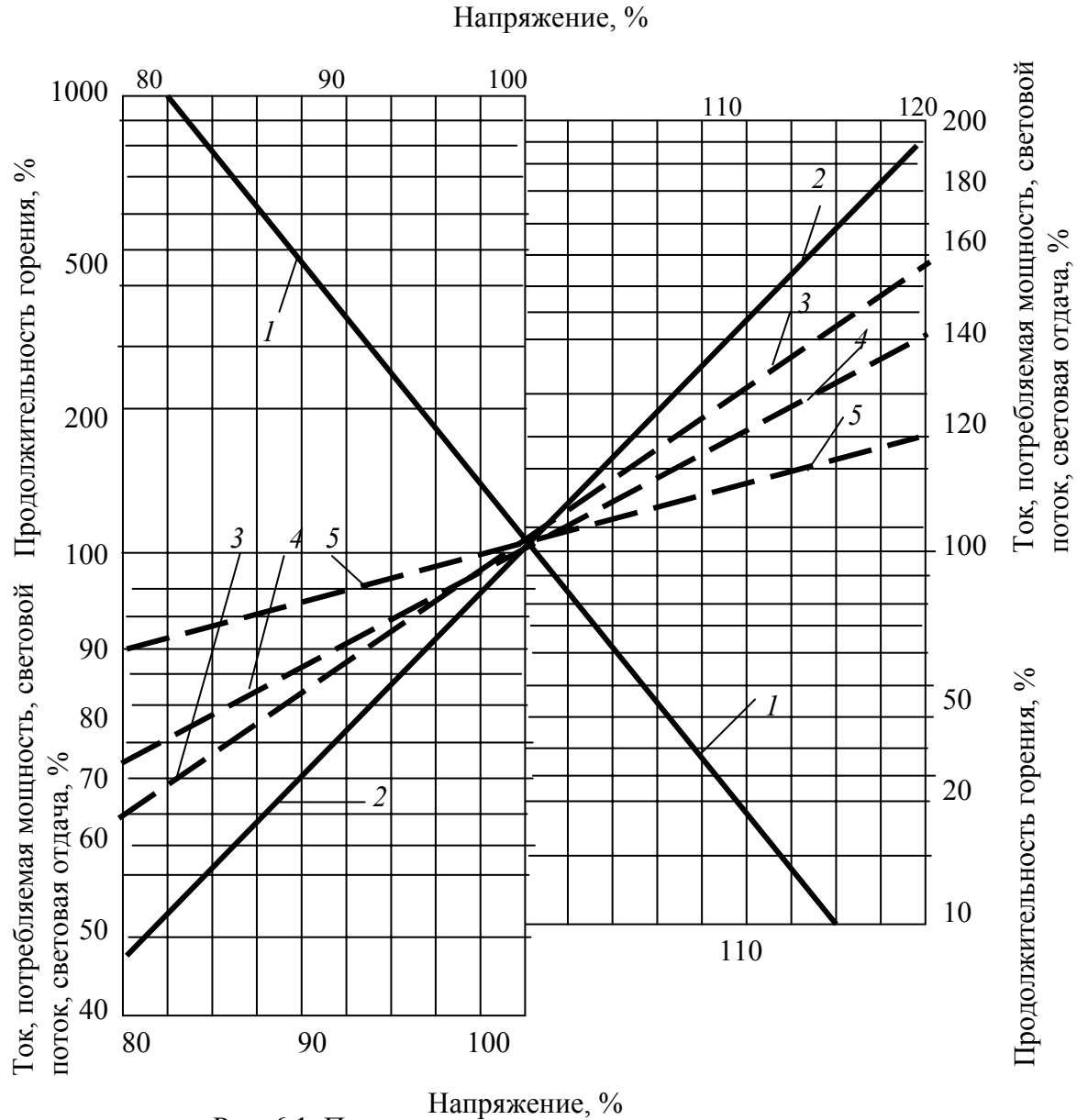
специальные - обладающие особым конструктивным исполнением, большой точностью, стабильностью световых и электрических параметров и другими особенностями, определяемыми спецификой их применения (например, вибростойкость, тепло- и холодостойкость и т.д.).

Лампы накаливания состоят из колбы, цоколя и вольфрамовой моноспирали или биспирали. Биспирали применяют в лампах с большими тепловыми потерями (т.е. в газонаполненных от 40 Вт и выше). Наполнение колб ламп криптоном или смесью азота и аргона позволяет снизить испарение вольфрама и довести его температуру до предельной, но несколько увеличивает тепловые потери. Световая отдача газонаполненных ламп поэтому выше, чем у пустотных.

В маркировке ламп буквы означают: В - вакуумная, Г - газонаполненная, Б - биспиральная, К - криптоновая. Основными характеристиками ламп накаливания являются: номинальные напряжения $U_н$ В, мощность $P_н$ Вт и световой поток $F_н$ лм (люмен), а также световая отдача $H = F_н/P_н$ лм/Вт и средний срок службы (примерно 1000 ч).

На характеристики лампы накаливания существенно влияет величина рабочего напряжения. При напряжении, большем номинального, увеличивается ток в лампе, температура нити накала и световой поток, излучаемый лампой. Одновременно уменьшается срок ее службы из-за более быстрого разрушения вольфрамовой спирали. При понижении напряжения

уменьшается световой поток лампы и ее светоотдача (рис. 6.1).



Напряжение, %

Рис. 6.1. Параметры ламп накаливания в зависимости от приложенного к ним напряжения:

1 – продолжительность горения; *2* – световой поток; *3* – световая отдача; *4* – потребляемая мощность; *5* - ток

Достоинства ламп накаливания – простота устройства, дешевизна, удобство эксплуатации, возможность изготовления в широком диапазоне мощностей и напряжений и др. К основным недостаткам относятся: весьма низкая экономичность (только 2-4 % потребляемой ими электроэнергии превращается в световую), относительно малый срок службы, пожарная опасность.

В лампах накаливания с вольфрамогалогенным циклом используется йод, бром, хлор и сложные галогенорганические соединения. Цилиндриче-

ская колба *2* йодной лампы (рис. 6.2) изготавливается из высокотемпературного кварцевого стекла. Нить *1* располагается точно по оси на одинаковом и сравнительно близком расстоянии от стенок колбы. Электроды *4*, подводящие ток к нити, и держатели *3* нити изготавливаются из вольфрама. Колба наполняется хорошо очищенным инертным газом до давления $5 \cdot 10^5$ - 10^5 Па, что уменьшает скорость испарения нити и предотвращает дугообразование. В колбу вводится определенное количество йода. Его атомы, выделяющиеся из молекул под влиянием высокой температуры на поверхности вольфрамовой нити, перемещаются к стенкам колбы и образуют с осевшими на них распылившимися частицами вольфрама газообразный йодид вольфрама. Последний, попадая в зону высоких температур вблизи нити, снова распадается на вольфрам и йод. Вольфрам остается на нити, а атомы йода диффундируют к стенкам и опять участвуют в цикле. Круговой процесс идет по схеме $W+2J \rightleftharpoons WJ_2$. Световой поток в этих лампах к концу срока службы уменьшается только на 3-4 % (вместо 15-20 % для обычных ламп накаливания), срок службы в два раза больше, световая отдача на 15-20 % выше, чем у обычных ламп, спектральный состав излучения ближе к естественному и размеры значительно меньше. Это позволяет снижать габариты и массу осветительных приборов.

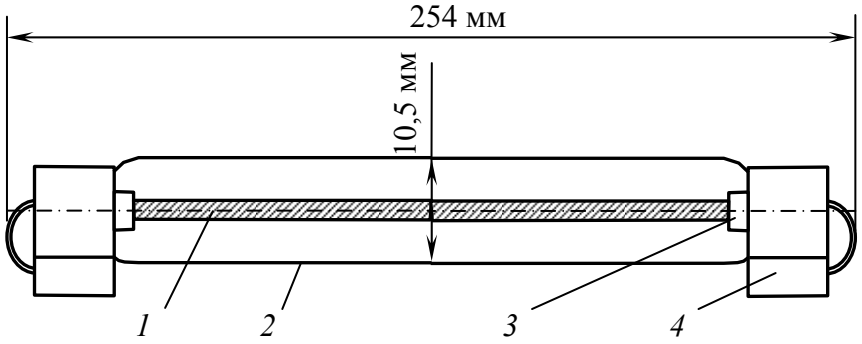


Рис. 6.2. Кварцевая йодная лампа накаливания типа КИ220-1500:
1 – нить накала; *2* – колба; *3* – держатель; *4* - электроды

В настоящее время выпускается более 100 типоразмеров галогенных ламп накаливания мощностью от 5 Вт до 5 кВт (предполагается выпуск ламп до 10 и 20 кВт), продолжительность горения которых превосходит лучшие мировые образцы в два и более раз (например, лампы типа КИМ10-90, КИ220-1500, КГ220-500 и др). Такие лампы применяются при фото- и киносъемках, для освещения зданий и аэродромов, спортивных сооружений, открытых площадей и т.п. Они являются также высокоинтенсивными источниками инфракрасного излучения и используются для нагрева, плавления, термообработки, пайки, сушки и т.п.

Более экономичными, чем лампы накаливания, являются газоразрядные лампы. Большинство из них представляет собой запаянную стеклянную колбу цилиндрической, сферической или иной формы с впаянными электродами. Обычно колба заполнена либо инертным газом, либо газом и небольшим количеством металла (например, ртути, натрия, кадмия). Если к электродам приложить достаточное напряжение (называемое напряжением зажигания), между ними возникает электрический разряд, который вызовет свечение газа. В зависимости от давления газа и паров металла в рабочем режиме различают газоразрядные лампы низкого, высокого и сверхвысокого давления. Эти лампы разделяются на лампы тлеющего, дугового и импульсного разрядов.

Все разрядные лампы (кроме ксеноновых трубчатых типа ДКСТ) включаются в сеть через индуктивные или емкостные балластные сопротивления. Балластные сопротивления (дроссели) являются составной частью пускорегулирующих аппаратов (ПРА), которые включают также конденсаторы и стартеры, а для ламп типа ДРЛ, ДРИ, ДРИЗ и ДНаТ - импульсные зажигающие устройства.

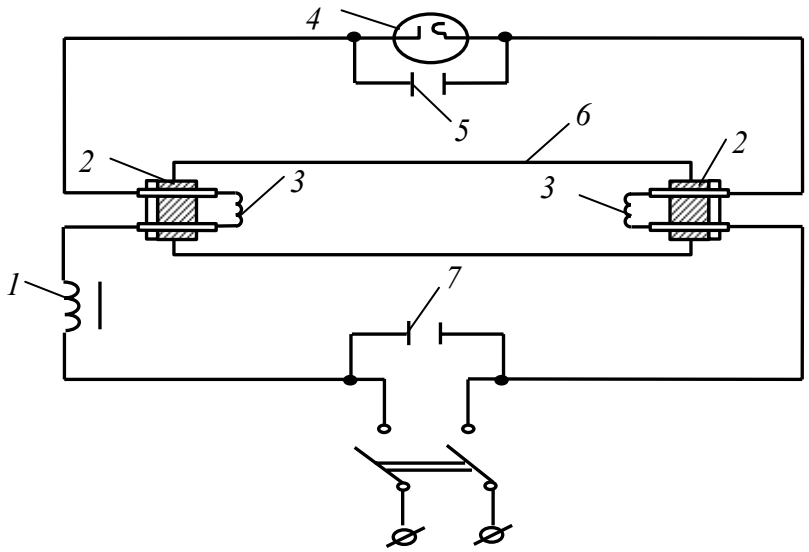


Рис. 6.3. Люминесцентная лампа и схема ее включения:
1 – дроссель; *2* – цоколь; *3* – электроды; *4* – стартер; *5* и *7* – конденсаторы; *6* – трубка

Наиболее широко для освещения применяются люминесцентные трубчатые лампы низкого давления (около 1,3 $\cdot 10^2$ Па). Люминесцентная лампа (рис. 6.3) представляет собой стеклянную цилиндрическую трубку *6*, заполненную аргоном и дозированным количеством ртути. На концах трубки расположены биспиральные вольфрамовые электроды *3*, концы которых выведены через цоколи *2* наружу. Напряжение вызывает электрический разряд в газовом наполнении. Невидимое ультрафиолетовое излучение, возникающее при разряде и составляющее около 85 % всей энергии

излучения (электролюминесценция), облучает тонкий слой люминофора на внутренней поверхности трубки и вызывает его свечение - фотолюминесценцию. Благодаря этому люминесцентные лампы обладают значительно более высокой экономичностью. Если, например, лампы накаливания 220 В и мощностью 100-300 Вт имеют световую отдачу около 15 лм/Вт, то люминесцентные лампы типа ЛБ40 мощностью 40 Вт имеют световую отдачу 78 лм/Вт. Срок службы люминесцентных ламп 12000 ч. Температура стеклянной трубки не превышает 50 °С, что делает их менее пожароопасными по сравнению с лампами накаливания.

Лампы для общего освещения различаются по цветности: дневного (ЛД), белого (ЛБ), тепло-белого (ЛТБ) света и дневного с улучшенной цветопередачей (ЛДЦ).

Подавляющее большинство люминесцентных ламп в настоящее время дозируется жидкой ртутью, что имеет ряд недостатков. Основные из них - нарушение гигиеничности технологии изготовления ламп и тех помещений, в которых они применяются (разбрызгивание и испарение ртути в случае боя ламп), а также снижение светового потока ламп на 20-30 % (в зависимости от температуры) при применении их в закрытых светильниках. Эти недостатки устраняются в амальгамных лампах мощностью от 15 до 125 Вт. Наибольшее распространение получили амальгамы на основе индия и кадмия. Амальгама в виде шарика или таблетки может быть размещена на внутренней поверхности трубки. В маркировку ламп вводится буква А, например, АБА 15-Т, где Т указывает на тропическое исполнение.

Люминесцентные лампы включаются в сеть переменного напряжения 127 и 220 В с пускорегулирующей аппаратурой (ПРА), которая обеспечивает зажигание лампы, нормальный режим работы и устранение радиопомех. Пускорегулирующая аппаратура (см. рис. 6.3) состоит из дросселя *1*, стартера *4* и конденсаторов *5, 7*. Стартер *4* представляет собой миниатюрную неоновую лампу с биметаллическими электродами. В момент включения на электроды стартера подается полное напряжение сети, и между ними возникает тлеющий разряд, разогревающий электроды. От нагрева они изгибаются и замыкаются друг с другом: возникает ток, разогревающий электроды лампы. В этот момент разряд в стартере прекращается, электроды его охлаждаются и размыкаются. Мгновенный разрыв цепи вызывает появление на дросселе импульса обратной электродвижущей силы, которая и зажигает лампу. После этого напряжение на лампе составляет около половины сетевого. Такое же напряжение будет и на стартере, что недостаточно для возбуждения тлеющего разряда и его повторного замыкания. Конденсатор *5* снижает уровень радиопомех, а конденсатор *7* улучшает коэффициент мощности лампы, компенсируя индуктивность дросселя.

Стартерные схемы включения ламп просты и дешевы. Однако стартер

уменьшает эксплуатационную надежность схемы. Его неисправность приводит к снижению срока службы ламп. Поэтому применяются и бесстартерные схемы быстрого и мгновенного (холодного) зажигания ламп.

На люминесцентную лампу, имеющую схему быстрого зажигания, наносится электропроводящая пленка или полоса. Наиболее распространены трансформаторные схемы быстрого пуска, в которых в качестве балластного сопротивления используются дроссель, а предварительный подогрев катодов осуществляется накальным трансформатором либо автотрансформатором.

При холодном зажигании ламп устраняется предварительный подогрев катодов. Такой способ применяется, например, при использовании люминесцентных ламп во взрывоопасных зонах, где обеспечение искробезопасности является основным требованием. Для холодного зажигания к люминесцентной лампе подается напряжение, превышающее рабочее в 5-7 раз.

Дуговые ртутные лампы высокого давления с исправленной цветностью (типа ДРЛ) бывают двухэлектродными и четырехэлектродными мощностью 80–1000 Вт. Они сочетают высокую световую отдачу трубчатых люминесцентных ламп низкого давления и значительную световую мощность в относительно небольшом объеме.

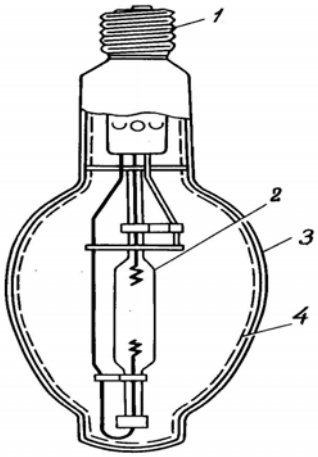


Рис. 6.4. Дуговая ртутная люминесцентная лампа высокого давления ДРЛ:
1 – цоколь; *2* – кварцевая трубка; *3* – колба; *4* – люминофор

Двухэлектродная лампа ДРЛ (рис. 6.4) представляет собой толстостенную кварцевую трубку (горелку) *2* с самокалящимися электродами, заполненную парами ртути и аргоном под давлением $5 \cdot 10^5 – 10^6$ Па. Трубка заключена в наружную стеклянную колбу *3* из термостойкого стекла, покрытую внутри слоем люминофора *4*. Форма колбы близка к форме лампы накаливания и заканчивается цоколем *1*. Люминофор преобразует ультрафиолетовый поток, проходящий через горелку, в оранжево-красное излучение, исправляя цветность излучения лампы. Спектр лампы становится близким к дневному свету.

Включение ламп ДРЛ (рис. 6.5) производится с помощью ПРА, состоящей из дросселя с ос-

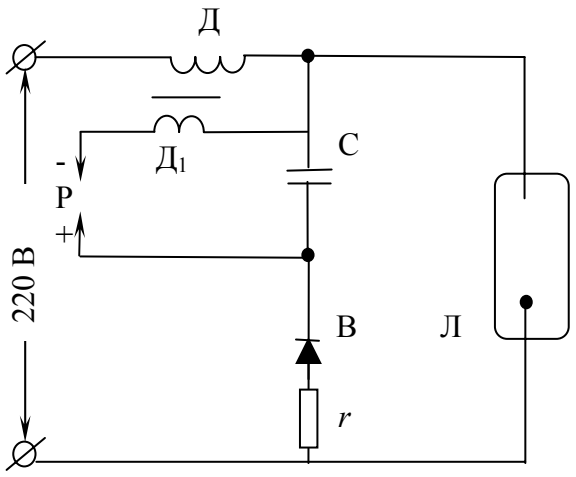


Рис. 6.5. Схема включения лампы ДРЛ

новной Д и зажигающей $Д_1$ обмотками и импульсного контура с разрядником Р. При подаче напряжения на лампу конденсатор С заряжается через селеновый выпрямитель В и ограничивающее сопротивление *r*. Когда напряжение достигнет 180-220 В, что вызывает пробой разрядника Р, конденсатор разрядится на дополнительную обмотку дросселя $Д_1$, и на концах основной обмотки балластного дросселя индуктируется импульс высокого напряжения, зажигающий лампу Л.
После зажигания лампы повторных разрядов конденсатора не происходит, так как напряжение на лампе во время ее горения, а следовательно, и на конденсаторе, ниже пробивного напряжения разрядника. ПРА обеспечивает мгновенное зажигание лампы при температуре окружающей среды от -30 °С до +60 °С, но устойчивая работа лампы и номинальный световой поток появляются через 5-7 мин после включения. Повторное включение лампы возможно только после ее остывания в течение 10-15 мин. Поэтому лампы ДРЛ не разрешается использовать для аварийного освещения. Их целесообразно применять для освещения улиц и площадей, высоких производственных помещений.

На основе ртутных ламп высокого давления путем введения светоизлучающих добавок (редкоземельных элементов) и оптимизации термических и электрических параметров разряда изготавливается металлогалогенные газоразрядные лампы МГЛ. Они все более вытесняют другие источники света из тех областей освещения, где требуется улучшенная цветопередача и высокая освещенность.

В России впервые были созданы разборные ксеноновые лампы с водяным охлаждением электродов (типа ДКсТ), обладающие высокой мощностью (от 2 до 50 кВт) при относительно небольших габаритах.

Наряду с многими достоинствами большинству газоразрядных ламп присущи и недостатки: сложность включения в сеть, применение ПРА, в которой теряется до 20-30 % энергии, чувствительность к изменениям внешней температуры, неудобные размеры (конструктивные формы).

6.2. ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СВЕТИЛЬНИКИ

Для освещения помещений или открытого пространства обычно требуется рационально распределить световой поток: направить его вниз или вверх, сконцентрировать на рабочем месте и т.д. В этих целях применяются осветительные приборы, которые разделяются на приборы ближнего (до 20-30 м) действия - светильники и на приборы дальнего действия - прожекторы.

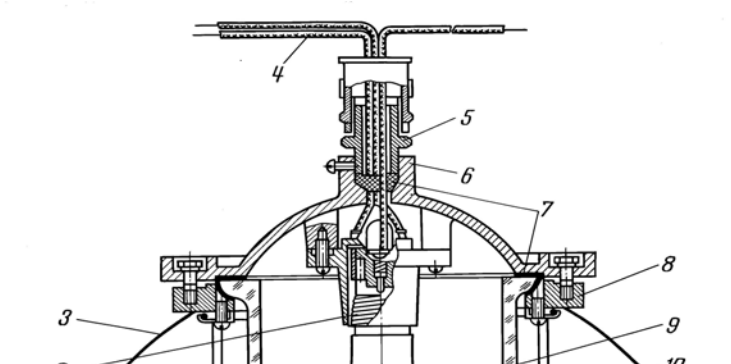


Рис. 6.6. Светильник НЗБ-150М:
Н – повышенной надежности против взрыва (защита вида «е»); ЗБ – категория и группа взрывоопасной смеси; 150 – мощность лампы; М – модернизированный; *1* – защитная сетка; *2* – взрывонепроницаемый патрон; *3* – отражатель; *4* – провод ПРКС; *5* – штуцер; *6* – корпус; *7* – уплотнительное кольцо и сальник; *8* – кольцо; *9* – защитный колпак; *10* – лампа накаливания

Светильник (рис. 6.6) состоит из источника света и осветительной арматуры, перераспределяющей световой поток. Она также предохраняет глаза от чрезмерной яркости источника света, а лампу - от механических повреждений, защищает полости расположения источника света и патрона от воздействия окружающей среды и т.д.

В общем случае осветительная арматура светильника состоит из корпуса *6*, отражателя *3*, рассеивателя или защитного стеклянного колпака *9*, патрона *2*, защитной сетки *1*, узлов крепления деталей и самой арматуры. Ввод проводов *4* типа ПРКС производится через штуцер *5* и сальник *7*. Кольцо *8* служит для крепления защитного колпака и защитной сетки. Отражатель и рассеиватель ограничивают слепящее действие источника света. В светильниках с рассеивателями ограничение слепящего действия достигается подбором рассеивателя. В светильниках с отражателями, но без рассеивателей слепящее действие ограничивается защитными углами светильников. Защитным углом светильника называется плоский угол между горизонталью и направлением от нижнего края тела накала источника света на край отражателя (например, угол γ на рис. 6.6, если бы отсутствовал отражатель).

Светильники классифицируются по характеру светораспределения, целевому назначению, способу установки, защите от воздействия окружающей среды и т.д. В России действуют стандарты по защите светильников от пыли и воды, оказывающих большое влияние на надежность светильников, безопасность обслуживания и пожарную безопасность, напри-

мер, ГОСТ 16703-71 «Светильники. Термины и определения», ГОСТ 13828-74 «Светильники. Виды и обозначения», ГОСТ 14254-86 (см. табл. 2.18). Вид защиты светильников обозначается двумя латинскими буквами *IP* и двумя цифрами, первая из которых указывает степень защиты от пыли, вторая - от воды (например, *IP*53).

Многие типы светильников имеют открытые лампы, не защищенные от окружающей среды, или лампы, закрытые неуплотненными светопропускающими оболочками (рассеивателями). При этом корпуса светильников с расположенными в них электрическими контактами могут иметь незащищенное, пылезащищенное или пыленепроницаемое исполнение. В связи с этим ГОСТ 13828-74 в обозначении защиты светильников с неизолированными от окружающей среды лампами исключает буквы *IP* и вводит штрих у цифры (табл. 6.1). Необходимо учитывать, что указанные в каталогах и других информационных материалах виды защиты светильников относятся к определенному рабочему положению и в случаях его изменения степени защиты могут быть различными.

Использование общепромышленных светильников общего назначения (см. табл. 6.1) во взрывоопасных зонах за небольшим исключением недопустимо. В них необходимо применять взрывозащищенные светильники. Взрывозащита светильников основывается на одном виде или сочетании нескольких видов: взрывонепроницаемости (взрывонепроницаемая оболочка), повышенной надежности против взрыва (защита вида «е»), заполнении всего либо части объема оболочки воздухом или инертным газом под избыточным давлением или прозрачными жидкостями, а также на применении устройств, обеспечивающих автоматическое отключение электродов лампы при разрушении колбы (электромеханическая или пневматическая блокировка). Поэтому такие светильники могут иметь следующие виды взрывозащиты: взрывонепроницаемая оболочка, защита вида «е» (повышенной надежности против взрыва) и специальный вид взрывозащиты.

Взрывонепроницаемые светильники. Все части таких светильников, где могут появиться искрение или высокая температура (патрон, источник света и др.), заключаются во взрывонепроницаемую оболочку. Оболочка может состоять из корпуса и защитного стеклянного колпака. Факторы, обеспечивающие взрывонепроницаемость оболочки светильника, рассмотрены в параграфе 2.3. Конструктивные особенности взрывонепроницаемых светильников для стационарной установки можно рассмотреть на примере устройства светильника ВЗГ-200АМС (рис. 6.7). Он состоит из корпуса *8*, стяжного кольца *10*, защитного колпака *11* из прозрачного стекла, защитной сетки *12*, отражателя *13* и взрывонепроницаемого патрона 9. Этот светильник имеет вводное устройство, состоящее из нажимной муфты *1*, корпуса *2* со съемной крышкой *7* и резинового уплотняющего кольца *3* с тремя отверстиями для проводов или одним для кабеля. Это устройство позволяет вводить в светильники провода (в стальных трубах) и кабели с обычной (ненагревостойкой) изоляцией, которыми выполняется обычно осветительная сеть. Затяжкой болтов, соединяющих нажимную муфту с корпусом вводного устройства, достигается надежное уплотнение вводов. Провода присоединяются к фазному *5*, нулевому и заземляющему *4* контактным выводам в корпусе вводного устройства. Зарядку светильников на участке от контактных выводов патрона *9* до контактных выводов в вводном устройстве производит предприятие-изготовитель проводом *6* марки ПРКС.

В маркировке светильника приняты обозначения: В - взрывонепроницаемый, 3 - категория взрывоопасной смеси, Г - группа взрывоопасной смеси, М - модернизированный; 200 - мощность лампы в Вт. Светильник предназначен для общего освещения зон классов В-I, В-Iа, В-II и В-Iг. В зонах В-Iг светильник может применяться только при условии защиты его от прямого попадания атмосферных осадков (размещение под навесами или установка защитных козырьков).

Большое распространение получили ручные и головные переносные взрывонепроницаемые светильники, например СПВ-27М (рис. 6.8). Светильник может применяться во взрывоопасных зонах всех классов, в которых возможно образование взрывоопасных смесей паров и газов с воздухом, отнесенных к 1, 2, 3 категориям и группам Т1, Т2, Т3 и Т4, а также в смеси горючей пыли с воздухом. Условные знаки взрывозащиты (ВЗТ4-В) означают, что светильник по уровню взрывозащиты - взрывобезопасный, по виду взрывозащиты - взрывонепроницаемый, для 3-й категории и группы Т4 взрывоопасных смесей.

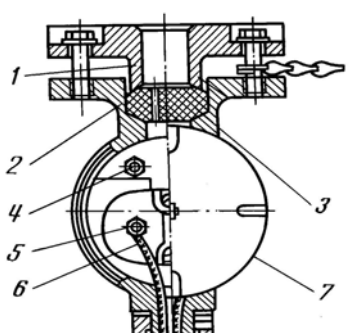


Рис. 6.7. Светильник В3Г-200АМС:
1 – муфта; *2* – корпус вводного устройства; *3* – уплотняющее кольцо; *4* и *5* – контакты; *6* – провод ПРКС; *7* – крышка; *8* – корпус светильника; *9* – патрон; *10* – стяжное кольцо; *11* – защитный колпак; *12* – защитная сетка; *13* - отражатель

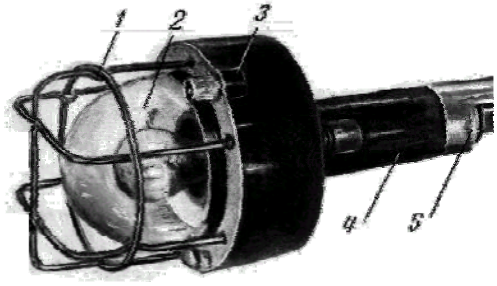


Рис. 6.8. Общий вид светильника СПВ-27М:
1 – защитная решетка; *2* – защитный колпак; *3* – корпус; *4* – прилив для вывода кабеля и уплотняющего устройства; *5* – подвесное устройство

По назначению взрывонепроницаемые светильники делятся на две группы: общего и местного освещения. Светильники общего освещения - стационарные, местного, как правило, - переносные. Основные данные светильников, применяемых во взрывоопасных зонах всех классов, приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Тип	Исполнение по взрыво-защите	Номинальное напряжение, В, или тип батареи	Мощность, Вт	Масса, кг	Область применения по взрывоопасной смеси	
					Категория	Группа
Стационарные светильники						
В4А-60А	В4А	220	60	6,3	1-4	А
В3Г-60	В3Г	220	60	5	1, 2, 3	А, Б, Г
В3Г-100А	В3Г	220	100	8	1, 2, 3	А, Б, Г
В3Г-200АМС *	В3Г	220	200	7,5	1, 2, 3	А, Б, Г
В3Г-300	В3Г	220	300	15	1, 2, 3	А, Б, Г
СПА-В3Г	В3Г	2,5	3,6	8,5	1, 2, 3	А, Б, Г
СПРМ-300-В3г	В3Г	220	300	2,4	1, 2, 3	А, Б, Г
ШС-В3Г ШС-1-В3Г	В3Г	24	50	11,8-11,5	1, 2, 3	А, Б, Г
ШСО-В3Г ШСО-В3Г	В3Г	24	50	11,8-11,5	1, 2, 3	А, Б, Г
ФВН-64	В3Г	12	50	8,5	1, 2, 3	А, Б, Г
ПВ-100	В3Г	127/220	100	9,5	1, 2, 3	А, Б, Г
Плафон-В3 Плафон-В	В3Г	24	10-25	1,2	1, 2, 3	А, Б, Г
Плафон ПВ-100 Плафон ПВ-100М-1	В3Г	127/220	100	10-9,8	1, 2, 3	А, Б, Г
С-3В1, С-3В2	В3Г	12-24	10	0,65	1, 2, 3	А, Б, Г
В3Г-ДРЛ-125(80)	В3Г	220	80-125	13,5	1, 2, 3	А, Б, Г
В3Г/В4А-200МС	В3Г-В4А	220	200	8,3	1, 2, 3/4	А, Б, Г/А
В4А-60	В4А	220	60	6	1-4	А
В4А-100	В4А	110/220	100	14,2	1-4	А
С3В-15 С3В-60	В1Т4-В	220	15-60	6,2-6,45	1	Т1, Т2, Т3, Т4
РСП31-80	1ExedIICT4	220	80 (ДРЛ)	11	IIA – IIC	Т1 - Т4
РСП25-80,125,250	1ExedIICT4	220	80, 125, 250 (ДРА)	14,5 - 15,5	IIA - IIC	Т1 - Т4
ГСП25-125,175,250	1ExedIIBT4	220	125, 175, 250 (ДРИ)	14,5 - 15,5	IIA - IIB	Т1 - Т4
В3Т3-ДРЛ250	1ExedIIBT3	220	250	18	1, 2, 3	А, Б, Г
ОМР-125(250)/В3Г-ДРЛ125(250)ПРА	В3Г	220	125, 250	15, 29	1, 2, 3	А, Б, Г
ФВН-64-1 ФВН-64-2	В3Г	12	28	2, 75	1, 2, 3	А, Б, Г
Переносные светильники **						
В3Г - 25	В3Г	24	25	6,5	1, 2, 3	А, Б, Г
БП-62-ВМ	В3Г	24	15	1,3	1, 2, 3	А, Б, Г
ПР-60-В	В3Г	12	15	2,1	1, 2, 3	А, Б, Г
СПВ-9	В3Г	12	8,2	2,5	1, 2, 3	А, Б, Г
СПВ-27М	В3Г	12	27	1,15	1, 2, 3	А, Б, Г
СР-В3Г	В3Г	12	18	0,8 (без кабеля)	1, 2, 3	А, Б, Г

Окончание табл. 6.2

Тип	Исполнение по взрыво-защите	Номинальное напряжение, В, или тип батареи	Мощность, Вт	Масса, кг	Область применения по взрывоопасной смеси	
					Категория	Группа
СВР	В3Т3-В	12	-	0,9	1, 2, 3	Т1, Т2, Т3
ПР-60-ВМ ПР-64-ВМ1 ПР-64-ВМП	В3Г	24	15	1,4	1, 2, 3	А, Б, Г
СГВ-1 СГВ-2	В3Г	Аккумуля-тор	3,75	3,25	1, 2, 3	А, Б, Г
С3Г-2	С3Г	То же	2,4	3,3	1, 2, 3	А, Б, Г
С3Г-14	С3Г	«	2,4	3,1	1, 2, 3	А, Б, Г
САВ-3,75	В4Д	«	3,75	3,4	1-4	А, Б, Г, Д
УАС-3В	В3Г	«	0,25	2,1	1, 2, 3	А, Б, Г
НРП09×3,75	В4Т5-В	«	3,75	3,6	1-4	Т1-Т5

* Взамен светильников В3Г-200, В3Г-200А, В3Г-200М.

** Могут применяться во взрывоопасных зонах помещений и наружных установок.

Одним из наиболее важных узлов взрывонепроницаемых светильников является патрон. Конструкция его зависит от типа светильника.

На рис. 6.9 приведена конструкция взрывонепроницаемого патрона для светильников, в которых отсутствует блокировка, снимающая напряжение с токоведущих частей при смене лампы. У взрывонепроницаемого патрона при смене лампы размыкание или замыкание цепи тока происходит только во взрывонепроницаемой камере.

В конструкциях ряда взрывонепроницаемых светильников (В3Г-100, В4А-60 и др.) предусматриваются электрические и электромеханические блокировки, снимающие напряжение с токоведущих частей при смене лампы или нарушении взрывозащиты. Электрическая блокировка достигается достаточно сложной конструкцией патрона и контактной панели светильника (например, у светильников В3Г-60, БП-62-13) или применением в цепи питания патрона микрокнопок с нормально замкнутыми контактами. В последнем случае блокировка приводится в действие нажатием одного из элементов арматуры светильника и контакта кнопки в собранном виде, а размыкание кнопки происходит при снятии узла защитного стеклянного колпака для замены лампы.

Большое распространение получает электромеханическая блокировка (у светильников Н4БН-300, СПР-300 и др.) при помощи двухполюсного тумблера, который разрывает цепь патрона при вскрытии узла защитного колпака.

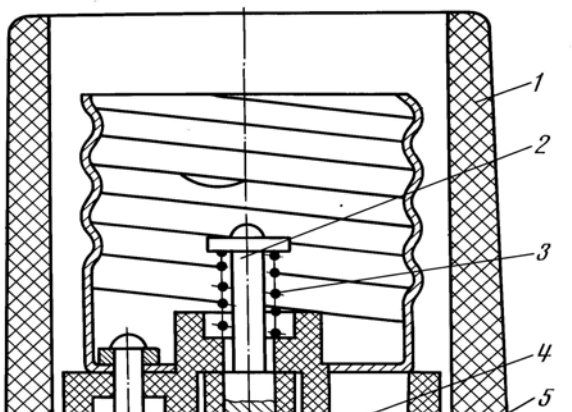


Рис. 6.9. Взрывонепроницаемый патрон Р-27:
1 – корпус из пластмассы; *2* – центральный контакт; *3* – пружина; *4* – втулка;
5 – взрывонепроницаемая камера; *6* – токоведущий зажим

Светильники повышенной надежности против взрыва. Взрывозащита таких светильников (см. рис. 6.6 и табл. 6.3) обеспечивается прочностью (но не взрывоустойчивостью) металлического корпуса и защитного стеклянного колпака, применением взрывонепроницаемого патрона и уплотняющих резиновых прокладок в месте ввода проводов и в соединении корпуса со стеклянным колпаком, а также тепловым режимом, при котором температура наиболее нагретых частей не превышает допустимой для указанных групп взрывоопасных смесей. Эта взрывозащита достаточна, если взрывоопасная смесь в помещении появляется в результате аварии, которую можно быстро ликвидировать. Во взрывоопасных зонах класса В-1, где в нормальном режиме эксплуатации возможно наличие взрывоопасной смеси, устанавливать такие светильники запрещается.

Конструктивные особенности светильников повышенной надежности против взрыва видны на примере светильника типа НЗБ-150М (см. рис. 6.6).

Выбор светильников. По условиям пожарной безопасности наибольший интерес представляет выбор светильников в зависимости от характеристики среды и, в частности, пожаровзрывоопасности зоны. Рекомендации ПУЭ и ПИВРЭ по применению светильников в этих зонах не увязаны с существующей классификацией этих изделий по степени защиты от пыли и воды (см. табл. 6.1). Поэтому в табл. 6.4 и 6.5 указываются минимально необходимые степени защиты и некоторые дополнительные требования к светильникам, устанавливаемым стационарно в зонах разных классов.

Таблица 6.3

Тип	Маркировка взрывозащиты светильника	Номинальное напряжение, В	Мощность, Вт	Масса, кг	Область применения по		
					классу взрывоопасной зоны	категории взрывоопасной смеси	группе взрывоопасной смеси
Н4БН-150	Н4Б	220	150	7	В-Iг, В-Iа, В-II	1-4	А, Б
Н4Б-300МА	Н4Б	220	300	10,5	«	1-4	А, Б
Н3БН-300-1	Н3Б	220	300	7,5	«	1, 2, 3	А, Б
Н3Н-300-2	Н3Б	220	300	7,5	«	1, 2, 3	А, Б
Н4Б-300МА	Н4Б	220	300	10,8	«	Т-4	А, Б
НОГЛ-1Х80 НОГЛ-2Х80	НОГ	220	80	15-25	«	1-4	А, Б, Г
НОДЛ-1Х40 НОДЛ-2Х40	НОД	220	40	11-20	«	1-4	А, Б, Г, Д
Н4А-ДРЛ-250	Н4А	220	250	11	«	1-4	А
Н4Т2Н-300	Н4Т2-НВ	220	300		«	1-4	Т1, Т2
Н4Т4Л1Х80 Н4Т4Л2Х80	Н4Т4-НВ	220	80	14-27	«	1-4	Т1-Т4
Н4Т5Л1Х65 Н4Т5Л2Х65	Н4Т5-НВ	220	65	14-27	«	1-4	Т1-Т5
РСП25-80	2ExedIICT4	220 (ДРЛ)	80	14,5	«	IIA-IIC	Т1-Т4
РСП-125,175,250	2ExedIICT4	220 (ДРИ)	125, 175, 250	14,5-15,5	«	IIA-IIC	Т1-Т4
OWP-250/Н4Т2 ДРЛ250/ПРА	Н4Т2-Н	220 (ДРИ)	250	19	«	1-4	Т1, Т2
НСП23-220	2ExedIICT2	220	200	6,5	«	IIA-IIC	Т1, Т2

Таблица 6.4

Источник света	Минимальная степень защиты светильников (ГОСТ 13828-74 и ГОСТ 14254-86) в пожароопасных зонах				
	Производственные и складские помещения		П-II (производственные помещения с общеобменной вентиляцией и местным нижним отсосом отходов), П-IIа	П – IIа (складские помещения)	П – III
	П - I	П -II			
Лампы накаливания	IP53	IP53	2′3	2′3	2′3
Лампы ДРЛ, ДРИ, НДВ	IP53	IP53	IP23	IP23	IP53
Люминесцентные лампы	5′3	5′3	IP23	IP23	IP53

Таблица 6.5

Класс взрывоопасной зоны	Уровень и вид взрывозащиты по ПУЭ; минимальная степень защиты оболочек светильников с любыми источниками света по ГОСТ 14254-96
В - I	Взрывобезопасное. Взрывонепроницаемая оболочка *
В -Iа	Повышенной надежности против взрыва. Любой вид взрывозащиты *
В -Iб	Без средств взрывозащиты (*IP*54). Светильники с люминесцентными

	лампами – степень защиты 5′3
В - II	Повышенной надежности против взрыва. Любой вид взрывозащиты *
В - IIа	Без средств взрывозащиты (*IP*54) Светильники с люминесцентными лампами – степень защиты 5′3
В - Iг	Повышенной надежности против взрыва. Любой вид взрывозащиты *

* Для соответствующих категорий и групп взрывоопасных смесей.

Все взрывонепроницаемые и повышенной надежности против взрыва стационарные светильники (см. табл. 6.2 и 6.3) по ГОСТ 14254-96 имеют степень защиты оболочек *IP*54. Конструкция современных взрывозащищенных светильников позволяет выполнять уплотненный ввод питающих кабелей круглой формы с наружным диаметром 16 мм и кабелей и изолированных проводов в стальных трубах диаметром 1/2″. Светильники поставляются заряженными проводами с нагревостойкой изоляцией (например, провода ПРКС или ПРБС) внутри светильников от вводной камеры до патрона. Светильники с лампами ДРЛ и ДРИ имеют встроенные некомпенсированные ПРА.

Для заградительных огней (на высотных наружных установках) целесообразно применять приборы типа ЗОЛ-2М (с лампами накаливания 220 В, 130 Вт) с двумя стеклянными колпаками: наружный прозрачный бесцветный, гладкий; внутренний призматический красного цвета. Эти приборы невзрывозащищенные и в пределах взрывоопасных зон не устанавливаются.

Во взрывоопасных зонах для этих целей можно применять светильники типа НСП23-200 или В3Г-200АМС без отражателей, у которых защитное стекло следует окрашивать изнутри краской красной.

При размещении светильников и прожекторов для освещения наружных взрывоопасных установок с зонами класса В – Iг предпочтительнее, по условиям пожаровзрывобезопасности, размещать прожекторы и светильники прожекторного типа за пределами взрывоопасной зоны.

Переносные светильники для пожароопасных зон всех классов должны иметь исполнение не ниже *IP*54, а лампы закрываться сплошным стеклянным колпаком, защищенным металлической сеткой. Во взрывоопасных зонах всех классов, кроме В-Iб и В-Iг, переносные светильники применяются во взрывонепроницаемом или специальном исполнениях и, как правило, с металлической защитной сеткой. В зонах В-Iб и В-Iг разрешается применять светильники любого взрывозащищенного исполнения для соответствующих категорий и групп взрывоопасных смесей.

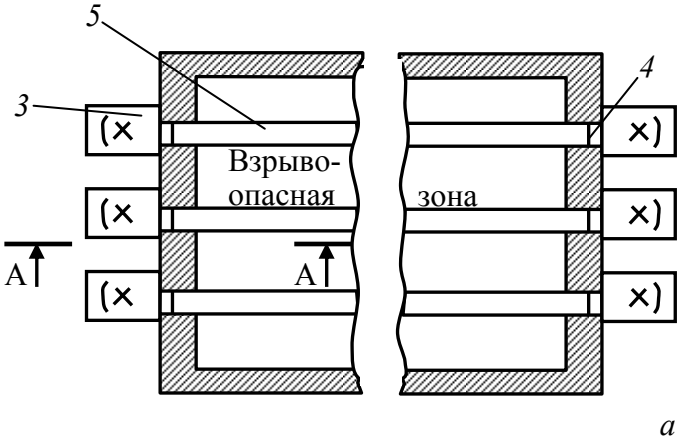
Независимые ПРА для светильников с газоразрядными лампами высокого давления в пожароопасных зонах всех классов заключаются в оболочки со степенью защиты не ниже *IP*44. Такие же ПРА для взрывозащи-

щенных светильников применяются с теми же видами взрывозащиты и степенью защиты, что и сам светильник.

Осветительные устройства со щелевыми световодами. Способы электрического освещения производственных и общественных зданий за последние десятилетия остаются практически неизменными. Недостатки систем освещения, осуществляемых при помощи обычных источников света, особенно заметны при постоянно растущих нормах освещенности. К таким недостаткам относятся: необходимость применять большое количество светильников (тысячи и десятки тысяч в одной осветительной установке) с лампами относительно малой мощности (до 1,5 – 2 кВт); чрезвычайно большая протяженность электрических сетей с неизбежными потерями энергии в них; большие эксплуатационные расходы на периодическую замену ламп, чистку и ремонт светильников и т.д. Эти недостатки значительно усугубляются в производственных помещениях с тяжелыми условиями среды (влажность, химическая активность и др.).

Осветительные устройства со щелевыми световодами (ЩС) лишены подобных недостатков. По сравнению с электроосвещением помещений обычными светильниками эффективность применения щелевых световодов выражается в снижении расчетных годовых затрат на каждый киловатт установленной мощности на 25-30 %; уменьшении трудоемкости электромонтажных работ в 15-25 раз, а также количества световых точек, требующих обслуживания (в 10-50 раз); в снижении расхода материалов, необходимых для изготовления светильников (в 20-30 раз).

Щелевые световоды (рис. 6.10) представляют собой цилиндрические (или другой формы) трубы большой протяженности (до 100 м и более при диаметре до 1500 мм и более), часть внутренней поверхности которых по всей длине покрыта зеркально отражающим слоем *6*. Световой поток одного источника света *1* (или группы мощных ламп, находящихся во вводном устройстве *3*) направляется с помощью специальных оптических систем *2* в торцы *4* ЩС, а выходит из щелевых световодов *5* равномерно через «оптическую щель» *7* – часть световода, которая не покрыта отражающим слоем. Это позволяет разместить вводные устройства за пределами освещаемого помещения, имеющего, например, взрывоопасную среду. Световой поток попадает в световоды через иллюминаторы (окна) в торцах *4* ЩС в ограждающих конструкциях. Поэтому особенно эффективно применение таких осветительных устройств в пожаровзрывоопасных зонах.



а

Рис. 6.10. Принципиальная схема осветительных установок
со щелевыми световодами:
а – план размещения световодов; *б* – разрез по А-А; *1* – источник света; *2* – оптическая система; *3* – вводное устройство; *4* – торцы ЩС; *5* – световоды; *6* – зеркально отражающий слой; 7 – «оптическая щель»

Оболочки световодов любых габаритов и формы могут изготовляться из эластичной светопропускающей пленки, например полиэтилентерефтаратной, толщиной 20-30 мкм. Зеркальное покрытие наносится на оболочку световода методом алюминирования в вакууме.

В настоящее время освоен выпуск комплексных осветительных устройств серии КОУ со щелевыми световодами типа КОУ1А-М275-1Х700У2 и КОУ1А-М600-4Х700-У2, которые рекомендуются для установки в зонах В-I, В-Iа, В-II взамен светильников В3Г/В4А-200, Н4Б-300, Н4Т5Л-40, Н4Т5Л-65, Н4Т5Л-80, НОДЛ, НОГЛ и др.

В производственных помещениях с тяжелыми условиями среды и затрудненным обслуживанием осветительных установок, а также со взрывоопасными зонами В-Iб и В-IIа комплексные осветительные устройства типа КОУ1-М275-1Х700-У3 и КОУ1-М600-4Х700-У3 рекомендуется применять взамен светильников Н4Б-300, Н4БН-150, Н4Т2Н-300, Н4Т5Л-40(65, 80), НОДЛ, НОГЛ, ППД-500, ПП-200, ПВЛП-2Х40 и др.

6.3. СИСТЕМЫ И ВИДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОСВЕЩЕНИЯ

В практике применяются различные системы и виды электрического освещения:

общее, предназначенное для освещения помещения (или части его) с относительно равномерной освещенностью или для локализованного освещения;

местное, предназначенное для освещения только рабочих мест (стационарное или переносное);

комбинированное, представляющее совокупность общего и местного освещения.

Различают следующие виды освещения:

рабочее, обеспечивающее надлежащие условия видения при работе.

Разновидностью рабочего освещения является охранное освещение, служащее для обеспечения условий видения вдоль границ охраняемой территории;

аварийное, служащее для временного продолжения работы;

эвакуационное, обеспечивающее при отключении рабочего освещения безопасную эвакуацию из помещения.

Аварийное освещение для продолжения работы должно применяться в помещениях и на открытых пространствах в случаях, когда отключение рабочего освещения и связанное с этим нарушение нормальной работы персонала может вызвать взрыв, пожар, отравление газами, длительное расстройство технологического процесса, нарушение работы таких объектов, как электростанции, узлы радиопередачи, водоснабжения, теплофикации.

Эвакуационное освещение должно применяться:

а) в производственных помещениях с постоянной работой персонала, если при отключении рабочего освещения возникнет опасность травматизма из-за продолжения работы оборудования или наличия мест, опасных для прохода людей;

б) в производственных помещениях с числом работающих более 50 человек, независимо от признаков, указанных в пункте «а»;

в) в основных проходах или на лестницах, служащих для эвакуации людей из производственных или общественных зданий, где работают или пребывают более 50 человек;

г) на рабочих местах, открытых пространствах, если эвакуация связана с повышенной опасностью травматизма;

д) в отдельных непроизводственных помещениях, где одновременно могут находиться более 100 человек (большие аудитории, зрительные залы, красные уголки и т.п.);

е) в детских домах, садах и яслях, независимо от числа лиц, пребывающих в здании;

ж) на лестницах жилых зданий, имеющих более 6 этажей.

Светильники аварийного освещения присоединяются к сети, независимой от сети рабочего освещения, начиная от щита подстанции, а при наличии только одного ввода – начиная от этого ввода. Допускается питание аварийного освещения от сети рабочего освещения с автоматическим переключением на независимые источники питания при аварийных режимах. Светильники аварийного освещения должны отличаться от светильников

рабочего освещения типом или размером, или же на них должны быть нанесены специальные знаки. Аварийное освещение должно создавать освещенность для эвакуации по линиям основных проходов на уровне пола и на ступенях лестниц не менее 0,5 лк. Сеть охранного освещения, как правило, следует выполнять раздельно от остальной сети наружного освещения.

6.4. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Для расчета электрического освещения широко используются методы коэффициента использования светового потока и удельной мощности.

Метод коэффициента использования светового потока состоит в определении потока лампы, необходимого для создания нормированной освещенности* рабочей поверхности. Коэффициентом использования η светового потока называют отношение полезного светового потока $F_{пол}$, падающего на рабочую (расчетную) поверхность S, к суммарному световому потоку $F_л$ всех ламп осветительной установки: $\eta = F_{пол}/F_л$.

Пусть в помещении площадью S установлено N светильников и световой поток ламп в каждом из них равен F. При коэффициенте использования η полезный поток $F_{пол} = NF\eta$, распределяясь по площади помещения, создает на расчетной поверхности среднюю освещенность $E_{ср} = NF\eta/S$. Если необходимо обеспечить определенную нормированную (минимальную) освещенность $F_н$ с коэффициентом запаса K (учитывают старение и загрязнение светильников, стен и потолка), надо иметь в виду, что средняя освещенность всегда превышает нормированную. Отношение $z = E_{ср}/E_н$ является коэффициентом минимальной освещенности. Таким образом, расчетная средняя освещенность составит $E_{ср} = E_н K_z$. Сравнивая ее с предыдущим выражением для $E_{ср}$, получаем расчетную формулу

$$F = E_н KS_z/N\eta. \qquad (6.1)$$

При освещении лампами накаливания или ДРЛ до расчета выбирается число светильников и по формуле (6.1) определяется расчетный поток одной лампы (или ламп в светильнике), а по нему подбирается в каталогах или справочниках ближайшая стандартная лампа. Поток выбранной лампы может превышать расчетный не более чем на 20 %, но не может быть меньше чем на 10 %. Если расхождение больше, изменяют в ту или другую сторону число светильников.

---

* Освещенность $E = dF/dS$ – поверхностная плотность светового потока, равная отношению светового потока к площади освещаемой поверхности, по которой он равномерно распределен. Единица освещенности - люкс (лк); 1лк = 1лм/м^2.

При освещении рядами люминесцентных светильников до расчета намечается число рядов, а также тип и мощность ламп, что определяет поток $F_л$. Число светильников определяется по формуле, вытекающей из формулы (6.1):

$$N = E_н KS_z/nF_л\eta, \qquad (6.2)$$

где n – число ламп в каждом светильнике.

Делением N на число рядов определяется число светильников в каждом ряду. При известной длине светильника определяют длину всех светильников ряда. Если эта длина близка к геометрической длине ряда, он получается сплошным. Если же она меньше длины ряда, светильники размещаются в длину с разрывами. Если, наконец, она больше длины ряда, увеличивается число рядов или же каждый ряд образуется из сдвоенных либо встроенных светильников.

Входящий в формулы (6.1) и (6.2) коэффициент использования η определяется по таблицам для соответствующего светильника в функции индекса помещения i и коэффициентов отражения потолка $\rho_п$, стен $\rho_с$ и расчетной поверхности $\rho_р$.

Индекс помещения вычисляется по формуле

$$i = S/h\ (А+Б), \qquad (6.3)$$

где А, Б – длина и ширина помещения; h – высота подвеса светильника над рабочей (расчетной) поверхностью.

Оценка $\rho_п$, $\rho_с$, $\rho_р$ довольно сложна. Приближенно она производится с учетом многих факторов. Для производственных помещений с гладкими или кессонированными потолками обычно принимают $\rho_п = 50$ % и $\rho_с = 30$ %; для наиболее чистых цехов берут $\rho_п = 70$ % и $\rho_с = 50$ %. Коэффициент отражения расчетной поверхности или пола принимается чаще всего равным 10 %.

Коэффициент z с достаточным приближением можно принимать равным 1,15 при освещении лампами накаливания и ДРЛ, а при освещении рядами люминесцентных ламп – 1,1. Коэффициент запаса K принимается 1,3 для ламп накаливания и 1,5 – для газоразрядных ламп.

Метод удельной мощности. Под удельной мощностью ω понимается отношение установленной мощности источников света $P_Σ$ к освещенной площади S, т.е. $\omega = P_Σ/S$.

Исходными данными для расчета электрического освещения методом удельной мощности являются: нормированная освещенность $E_н$ (по СНиП II-4 – 79 в зависимости от назначения помещения), тип светильников, высота их подвеса над рабочей поверхностью h, площадь помещения S, число светильников N, полученное после их размещения. Порядок расчета освещения по этому методу следующий. По вышеуказанным данным в специ-

альных таблицах находят удельную мощность ω. Умножением удельной мощности на площадь помещения (или рабочую площадь) определяют суммарную мощность ламп P_Σ. Единичная мощность лампы равна суммарной мощности P_Σ, деленной на число ламп (светильников) N.

Количество светильников определяют, произведя предварительную их расстановку внутри помещения. Размещать светильники следует по вершинам прямоугольников или треугольников (рис. 6.11). Для освещения относительно узких помещений (шириной 0,75 – 1,25 м) и коридоров применяют однорядное расположение светильников. Расстояние L между светильниками берется равным удвоенной высоте подвеса h над рабочей поверхностью (см. рис. 6.11, *в*) или менее, т.е. $L \le 2h$. Расстояние крайних светильников от стен a принимают равным (0,3-0,5) L. Верхний предел $0{,}5 \cdot L$ выбирают при отсутствии рабочих мест у стен помещения.

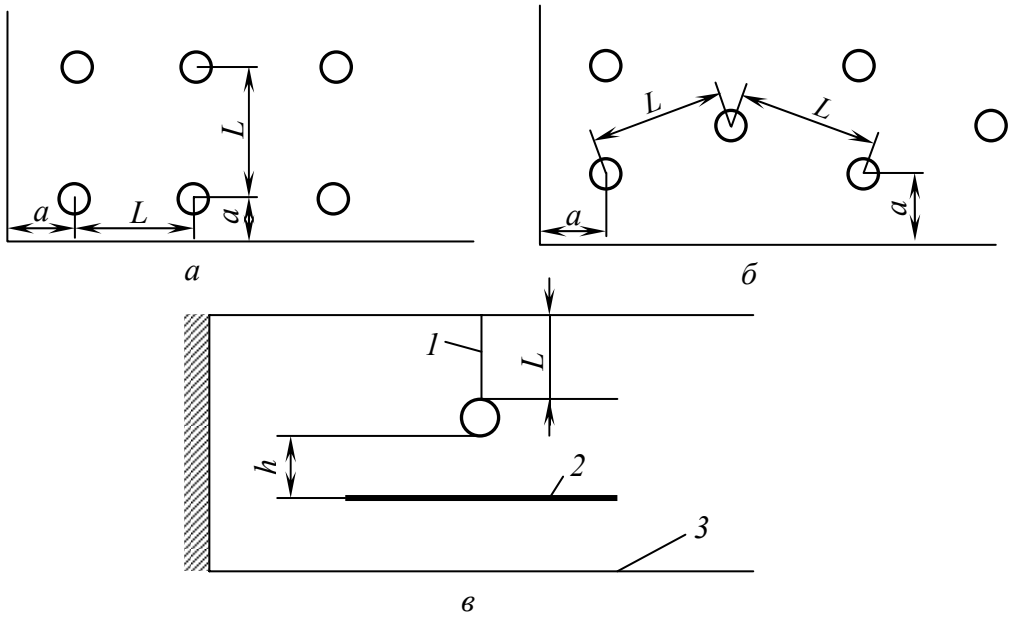


Рис. 6.11. Размещение светильников общего освещения:
а – по вершинам прямоугольника; *б* – по вершинам треугольника; *в* – схема высоты подвеса;
1 – свес; *2* – рабочая поверхность; *3* – пол

Если число светильников N не определяется предварительным их размещением, оно вычисляется по отношению суммарной мощности P_Σ к максимальной мощности лампы $P_л$ выбранного светильника. После этого производится размещение светильников в помещении.

6.5. ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Пожарная опасность осветительных приборов обусловливается наличием в них источника света, контактных элементов и ПРА. Основная часть подводимой к источникам света электрической энергии непосредственно

переходит в тепловую, вследствие чего колба лампы и некоторые элементы осветительной арматуры нагреваются до весьма высокой температуры. Соприкосновение нагретых частей, особенно колб ламп накаливания или ДРЛ (высокотемпературные источники света), с горючими материалами может вызвать загорание и пожар.

Таким образом, пожарную опасность, например, ламп накаливания принято оценивать возможностью возникновения пожара от соприкосновения (или опасного приближения) лампы и горючего материала или возникновения пожара от попадания на окружающие горючие материалы раскаленных элементов ламп, образующихся при ее разрушении.

Иногда к этим двум возможностям добавляется и третья – загорание патрона или питающих проводов.

Значение превышения температуры Δt (над температурой окружающей среды) на лампах накаливания общего применения и ламп ДРЛ приведено в табл. 6.6 и на рис. 6.12 и 6.13.

Как видно из табл. 6.6 и рис. 6.12 и 6.13, место максимального нагрева колб зависит от типа ламп и их положения. Так, у лампы мощностью 150-1500 Вт (см. рис. 6.12) максимальный нагрев на горловине колбы в точке *3*, а у лампы мощностью 60 и 100 Вт точка максимального нагрева перемещается к цоколю. Самый большой нагрев колб получается при горизонтальном расположении ламп (в точке *2* над телом накала). При этом значения составляют: 195-285 °С для ламп накаливания мощностью 60-300 Вт, 235 °С для ДРЛ мощностью 250 Вт. Превышение температуры цоколя составляет 100-145 °С для ламп накаливания и 130-150 °С для ДРЛ. При этом наибольшие температуры на цоколях имеют лампы накаливания 100 и 1500 Вт; ДРЛ – 250 и 1000 Вт. Температура нагрева колб и цоколей ламп накаливания значительно ниже, чем колб и цоколей ламп ДРЛ, ближайших по мощности.

Температура на стенках галогенных ламп накаливания составляет 400-450 °С в средней части лампы и 130 °С в зоне электродов.

Таблица 6.6

Мощность лампы, Вт		Превышение температуры, Δt				
		Лампа		Патрон		Провод (изоляция)
Лампа накаливания	ДРЛ	Колба	Цоколь	Корпус	Контакт	
		Точки измерения (см. рис. 6.12 и 6.13)				
Лампа расположена вертикально цоколем вверх						

60	-	60	65	80	100	85	50	30
100	-	70	80	115	130	105	65	40
150	-	80	90	125	115	80	65	50
200	-	80	115	140	110	85	65	40
-	250	205	250	200	150	100	95	75
300	-	75	95	145	95	80	65	40
-	400	160	250	240	140	100	100	80
Продольная ось лампы совмещена с горизонтальной осью								
60	70	195	84	49	36	22	6	Нет
100	93	234	87	60	56	27	10	данных
300	102	285	78	48	37	24	10	
Лампа расположена вертикально цоколем вниз								
60	135	74	43	41	37	19	6	Нет
200	216	89	47	55	51	24	9	данных
300	208	107	46	41	31	21	20	

Примечание. Данные получены для ламп накаливания – при их мощности на 10 % больше номинальной, для ламп ДРЛ – при их напряжении на 10 % больше номинального.

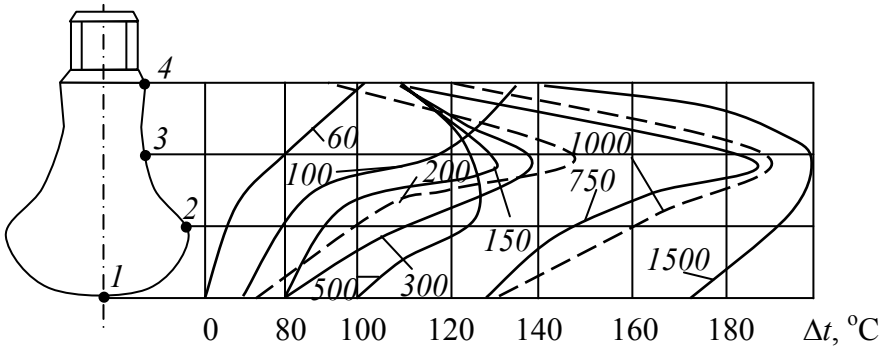


Рис. 6.12. Значения Δ*t* для ЛН
(цифры у кривых означают мощность лампы, Вт)

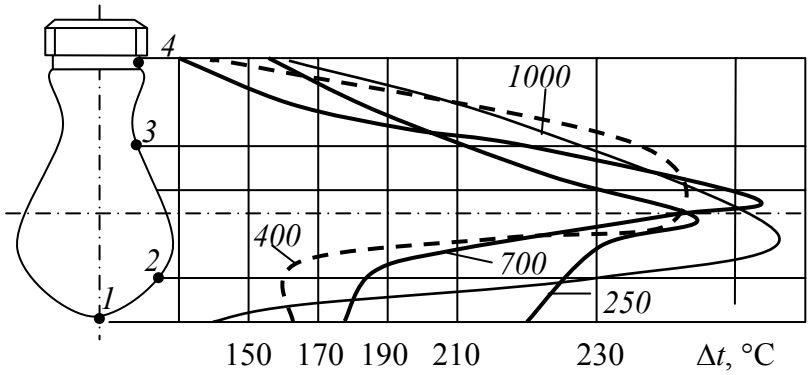


Рис. 6.13. Значения Δ*t* для ДРЛ
(цифры у кривых означают мощность лампы, Вт)

Люминесцентные лампы низкого давления наименьшую температуру имеют в средней части колбы лампы снизу. Средние значения в точках минимального нагрева составляют 15 и 25 °С соответственно для ламп мощностью 40 и 80 Вт. У краев колб (около электродов) температура значительно выше и может достигать 80-100 °С.

Исправность и срок службы дросселей и трансформаторов, входящих в ПРА, для люминесцентных ламп определяется в основном состоянием и сроком службы изоляции обмоточных проводов. При этом повышение температуры изоляции этих проводов на 10 °С сверх предельно допустимого значения сокращает срок службы дросселей и трансформаторов на 50 %; повышение температуры на следующие 10 °С – на 50 % оставшегося срока службы и т.д. Наиболее чувствительны к повышению температуры входящие в ПРА конденсаторы. Превышение температуры конденсатора сверх предельно допустимой на 10 °С сокращает срок службы почти на 80 %. Наблюдается также значительный нагрев деталей патронов и подходящих к ним проводов.

При оценке пожарной опасности источников света следует учитывать также существенное повышение температуры колбы лампы из-за загрязнения производственной пылью, нарушения теплообмена с окружающей средой, а также следует учитывать значительные температуры не только непосредственно на колбе лампы (см. рис. 6.12, 6.13, 6.14), но и на небольшом расстоянии от нее (см. рис. 6.14).

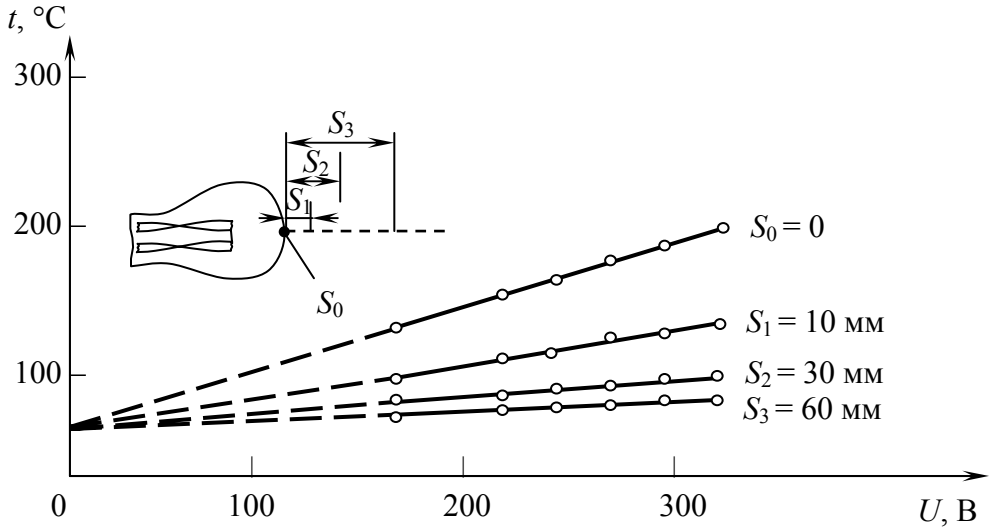


Рис. 6.14. Значения температур на различных расстояниях от колбы лампы накаливания мощностью 150 Вт

Таким образом, надежность и пожаробезопасность светильников в значительной степени зависит от их теплового режима. При несоответствии теплового режима светильников и температурных характеристик примененных в них комплектующих изделий и материалов сокращается их срок службы из-за: КЗ и замыканий на корпус монтажных проводов вследствие высыхания и выкрашивания их изоляции; припаивания цоколей ламп к контактам патронов и нарушения пружинящих свойств этих контактов; обгорания пластмассовых патронов; высыхания уплотняющих прокладок и

потери необходимой герметизации светильников; сокращения срока службы ламп и ПРА и выхода из строя ПРА в результате межвитковых замыканий и пробоев на корпус, пробоя конденсаторов с возможностью загорания и др.

Нередко пожары от ламп накаливания возникают в результате использования ламп повышенной мощности, не предусмотренной типом светильника. Поэтому часты случаи загорания пластмассовых плафонов. При определенных условиях в лампах накаливания возникают дуговые разряды между электродами, которые могут вызвать взрыв колбы или проплавление ее частицами никеля, образующимися в результате расплавления дугой электродов. В любом случае аварийный режим сопровождается образованием и выбросом источников зажигания; частиц никеля, расплавленной вольфрамовой спирали и конструктивных элементов, нагретых до высокой температуры (500-1500 °С).

При взрыве колбы лампы размер зоны поражения частицами не зависит от положения лампы в пространстве, а радиус размера частиц составляет примерно 3 м. Вертикально падающие частицы сохраняют зажигательную способность при падении с 8-10 м.

Грубым дефектом, значительно повышающим пожарную опасность ламп накаливания, является отсутствие встроенного в лампу предохранителя.

Предохранитель в лампе накаливания – это встроенная омедненная ферроникелевая проволочка диаметром 0,25 мм и длиной 35-45 мм, которая впаивается в один из электродов лампы. Назначение предохранительного звена состоит в том, чтобы в случае образования в лампе дугового разряда отключать ее от сети без нарушения целостности колбы. Встроенный предохранитель, как правило, срабатывает при относительно больших значениях сверхтока (8-10 $I_{ном}$) и малоэффективен при перегрузках. Вместе с тем даже при возникновении дуги предохранитель не всегда осуществляет полностью свои функции: в ряде случаев успевают образоваться раскаленные частицы никеля, которые могут вызвать проплавление или взрыв колбы.

Однако несмотря на указанные недостатки предохранителей, лампы, имеющие такую защиту, значительно надежнее и пожаробезопаснее ламп, в которых она отсутствует. Следует также отметить, что по литературным данным время срабатывания предохранителей в лампах некоторых зарубежных фирм составляет 0,02-0,04 с с начала аварийного режима отечественного предохранителя – 0,2-0,24 с.

Пожарная опасность светильников с люминесцентными лампами определяется тремя факторами: схемой зажигания (пуска), материалом рассеивателя и качеством ПРА.

Рассматривая пускорегулирующий аппарат как возможный источник зажигания, следует отметить, что пожарная опасность ПРА заключается, главным образом, в воспламенении горючих электроизоляционных материалов вследствие перегрева обмотки дросселя [45].

Электрическая изоляция обмотки состоит из материалов с разными физико-химическими характеристиками и неодинаковыми показателями пожарной опасности (горючесть, температура воспламенения, дымообразующая способность и т.п.). Катушка из провода с эмальизоляцией и различные электроизоляционные прокладки пропитываются лаками или компаудами, имеющими сложный состав.

Причинами загораний ПРА могут явиться также повышенное переходное сопротивление контактных соединений, межвитковое короткое замыкание в обмотке и другие явления и факторы, являющиеся чаще всего следствием нарушения технологии их изготовления.

Исследования показали, что ПРА становится пожароопасным при замыкании более чем семи витков обмотки дросселя, при этом наибольшее значение вероятности воспламенения наступает при замыкании около 78 витков обмотки некоторых серий ПРА мощностью 40 Вт.

Применяются стартерная и бесстартерная схемы зажигания светильников с люминесцентными лампами. Пожарная опасность светильников с обеими схемами зажигания одинакова.

Причиной перегрева обмоток дросселя обычно является детектирование (выпрямление) тока некоторыми люминесцентными лампами к концу срока службы, приводящее к повышению температуры дросселя выше 180 °С. Особую опасность в светильниках с люминесцентными лампами представляют рассеиватели, которые, как правило, выпускаются из горючего материала: полиметилметакрилата, поливинилхлоридной пленки, полистирола и т.п.

Пожарная опасность светильников повышается от неисправностей в осветительной арматуре, например, ослабление присоединения проводов к электрическому патрону вызывает нагрев контактов, искрение и загорание изоляции и пластмассы патрона. Бывают КЗ у ввода приводов в светильник, а также в патроне из-за небрежности при монтаже или недоброкачественном его изготовлении.

В люминесцентных светильниках недоброкачественное изготовление контактного соединения в патронах ламподержателей и стартеродержателей приводит к «миганию» ламп и последующему пробою бумажного диэлектрика конденсатора из-за повышенного напряжения, а затем к его воспламенению.

6.6. ПРОФИЛАКТИКА ПОЖАРОВ ОТ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

При проектировании электрического освещения необходимо, чтобы все осветительные установочные электроизделия (светильники, ПРА, выключатели, штепсельные розетки и др.) соответствовали среде помещений и наружных установок. Влага, пыль, едкие пары и газы, находящиеся в помещении, не должны оказывать влияния на состояние светильников и другое оборудование, а их конструкция не должна быть причиной пожара, взрыва и (или) поражения током.

Основными мероприятиями по снижению пожарной опасности ПРА являются применение в их конструкциях трудногорючих композиций, изготовление ПРА полностью в металлических оболочках, повышение показателей надежности стартеров и конденсаторов, оптимизация конструкций дросселей по температурным режимам, применение конденсаторов в керамических корпусах. Эффективным средством повышения пожарной безопасности ПРА является введение в его конструкцию термопредохранителей и термовыключателей, срабатывающих при превышении допустимой температуры корпуса дросселя.

В пожаровзрывоопасных зонах применяют светильники только с соответствующими уровнем, видом взрывозащиты (см. табл. 6.2, 6.3, 6.4 и 6.5) и степенью защиты оболочек (см. табл. 6.1).

Для освещения взрывоопасных зон всех классов со средами, для которых нет соответствующих светильников, можно применять невзрывозащищенные светильники:

за неоткрывающимися окнами и окнами без фрамуг и форточек; снаружи здания, причем в случае одинарного остекления окон светильники должны иметь защитные стеклянные колпаки;

в стеклянных нишах с двойным остеклением и естественной вентиляцией;

через специальные фонари с двойным остеклением и естественной вентиляцией;

в коробах, продуваемых под избыточным давлением.

Во взрывоопасных зонах эффективны осветительные установки со щелевыми световодами (см. рис. 6.10).

Выключатели осветительных цепей следует устанавливать за пределами взрывоопасных зон.

При монтаже и эксплуатации необходимо надежно крепить арматуру светильников. Монтаж светильников рекомендуется выполнять одновременно с прокладкой трубопроводов для электропроводки. Для взрывоопасных зон всех классов светильники заряжаются тремя проводами (см. рис. 6.6 и 6.7): фазный присоединяется к центральному зажиму, со-

единенному с винтовой гильзой патрона, защитный нулевой проводник – к винту заземления в корпусе светильника.

В зоне класса В-I для присоединения проводов зануления корпусов светильников должен быть проложен дополнительный провод от нулевой шины группового щитка. Во взрывоопасных зонах остальных классов провода зануления светильников следует присоединять к нулевому рабочему проводу в ближайшей разветвительной коробке.

Светильники должны заряжаться проводами с термостойкой изоляцией (например, ПРКС или ПРБС), так как при эксплуатации их обычная изоляция проводов перегревается. Это приводит к коротким замыканиям. Такой способ зарядки термостойким проводом необходим только для тех взрывозащищенных светильников, у которых отсутствует специальное вводное устройство и заводская зарядка при изготовлении. В настоящее время заводы электротехнической аппаратуры приступили к выпуску светильников (например, Н3БН-150, В3Г-200АМС, В3Г/В4А-200МС) с вводными устройствами и зарядкой термостойким проводом. Это исключает необходимость зарядки таких светильников на участке от разветвительной коробки до присоединительных зажимов внутри вводных устройств проводом марки ПРКС. Ввод в указанные светильники необходимо выполнять открыто прокладываемыми трехжильными кабелями или тремя проводами в трубах тех же марок, которые применены в групповых сетях.

Осветительные установки взрывоопасных зон принимаются в эксплуатацию с соблюдением требований ПЭЭП (гл.3.4 [10]). Эксплуатация взрывозащищенных светильников производится в строгом соответствии с инструкцией по монтажу и эксплуатации.

При эксплуатации светильников особенно внимательно следят за состоянием средств взрывозащиты, предотвращающих и локализующих взрыв взрывоопасной смеси. На всех осматриваемых взрывозащитных поверхностях соединений должны отсутствовать забоины, царапины, сколы, увеличивающие ширину щели или уменьшающие минимально допустимую длину сопряжения. Нельзя допускать срыва, сколов и других дефектов резьбы.

В светильниках повышенной надежности против взрыва выборочно проверяется состояние резиновых уплотнительных прокладок, которые обеспечивают герметичность соединения корпуса светильника с защитным колпаком. Резиновые кольца, имеющие повреждения или потерявшие эластичность, заменяются. У всех взрывозащищенных светильников проверяется целостность светопропускающего элемента. Если у стекла имеются трещины, сколы и другие дефекты, заменяется весь светильник. В светильник разрешается устанавливать источник света, тип и мощность которого оговорены инструкцией завода-изготовителя. Производить смену ламп во включенных светильниках запрещается.

Глава 7

ЗАЗЕМЛЕНИЕ И ЗАНУЛЕНИЕ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

7.1. ОПАСНОСТЬ ПОРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

Причинами поражения электрическим током могут быть:

прикосновение (или недопустимое приближение) к частям электроустановок, находящимся под напряжением;

прикосновение к конструктивным металлическим частям, оказавшимся под напряжением в результате повреждения изоляции;

напряжение шага, возникающее вблизи мест повреждения электрической изоляции или мест замыкания токоведущих частей на землю.

Различают два основных вида поражения человека электрическим током – *электрические травмы* и *электрические удары*. Они часто сопутствуют друг другу.

Электрической травмой называется ярко выраженное местное нарушение тканей организма (кожи, мышц, костей, связок). Характерными ее проявлениями являются ожоги, электрические знаки, металлизация кожи, механические повреждения и др. Электрический ожог – самая распространенная и опасная электротравма. В зависимости от условий возникновения различают два вида ожогов: токовый и контактный.

Электрическим ударом называется возбуждение тканей, вызванное электрическим током в организме и сопровождающееся непроизвольными судорожными сокращениями мышц (например, рук, ног и т.д.). В более тяжелых случаях наблюдается потеря сознания, нарушение работы сердечно–сосудистой системы или легких, что может привести даже к смертельному исходу. Во многих случаях возникает фибрилляция сердца, т.е. беспорядочное сокращение волокон сердечной мышцы, нарушающие ритмичное нагнетание крови в сосуды и приводящие к остановке кровообращения. При электрическом ударе могут быть и другие виды нарушения деятельности организма – спазмы мозговых и коронарных сосудов, паралич дыхания и т.д.

При поражениях электрическим током необходимо незамедлительное применение методов оживления: искусственное дыхание, наружный массаж сердца, способствующий поступлению крови в сосуды, и др.

На степень и исход поражения электрическим током влияет ряд факторов: величина и вид тока, длительность его действия на организм, величина напряжения, воздействию которого подвергается человек, путь тока в теле человека, окружающая среда и др. Тело человека, находящееся в электрической цепи, следует рассматривать как проводник со сложнейшими, только

ему присущими свойствами. С учетом вида допущений тело человека можно приближенно представить как сочетание активного и емкостного сопротивлений, величины которых зависят от множества условий, в частности от состояния кожи в месте прикосновения (сухая, влажная, поврежденная). Сопротивление верхнего слоя кожи (эпидермы) является одной из основных составляющих полного сопротивления тела человека.

При проектировании, расчете и эксплуатационном контроле защитных мероприятий в электроустановках необходимо иметь в виду данные о физиологическом действии переменного тока промышленной частоты (50 Гц), приведенные в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Ток, мА	Характер действия тока
Менее 5	Покалывание и дрожание пальцев рук, первые болевые ощущения
8 - 10	Сильные боли в пальцах и кистях рук. Управление мышцами рук затруднено, но не утрачено
20 - 25	Руки парализуются. Оторваться от электропроводов невозможно, затруднено дыхание
40 - 60	При времени воздействия 2 с остановка дыхания. Начало фибрилляции сердца. Возможна гибель пострадавшего
90 - 100	Остановка дыхания. При воздействии 2 с и более остановка сердца. Наиболее вероятен смертельный исход
3000 и более	Остановка дыхания и сердца при действии свыше 0,1 с. Разрушение тканей тела

7.2. ЗАЗЕМЛЕНИЕ И ЗАНУЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК КАК УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРО- И ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Для защиты людей от поражения электрическим током при повреждении изоляции должна быть применена, по крайней мере, одна из следующих защитных мер: заземление, зануление, защитное отключение, разделяющий трансформатор, малое напряжение, двойная изоляция, выравнивание потенциалов. Основными из них являются *заземление*, *зануление* и *выравнивание потенциалов*.

Заземлением всей установки или ее части называется преднамеренное гальваническое соединение с заземляющим устройством. Совокупность заземлителя и заземляющих проводников называется *заземляющим устройством*.

Занулением в электроустановках напряжением до 1000 В называется преднамеренное соединение частей электроустановки, нормально не находящихся под напряжением, с глухозаземленной нейтралью генератора или трансформатора в сетях трехфазного тока, с глухозаземленной средней точкой источника в сетях постоянного тока.

Выравнивание потенциала – метод снижения напряжения прикосновения и шага между точками электрической цепи, к которым возможно одновременное прикосновение или на которых может одновременно стоять человек. Выравнивание потенциала осуществляется электрическим соединением металлических конструкций, находящихся вблизи электроустановки с ее корпусом, а также формированием зоны растекания путем использования специальных заземляющих устройств.

Все случаи поражения током являются результатом замыкания электрической цепи через тело, т.е. результатом прикосновения человека к точкам цепи, имеющим разные потенциалы. Опасность этого зависит от напряжения сети, схемы самой сети, режима ее нейтрали, состояния изоляции токоведущих частей от земли и т.п.

Различают *сети с изолированной нейтралью*, когда нейтраль трансформатора к заземляющему устройству непосредственно не присоединена или присоединена через аппараты с большим сопротивлением (например, через трансформаторы напряжения), и *сети с глухим заземлением нейтрали*, когда нейтраль трансформатора или генератора присоединена к заземляющему устройству непосредственно или через малое сопротивление (например, через трансформатор тока). Повреждение изоляции токоведущих частей и соединение их с заземленными конструктивными частями или непосредственно с землей связано чаще всего либо с *токами однофазного замыкания на землю* (в системе с изолированной нейтралью), либо с *токами однофазного КЗ* (в системе с глухозаземленной нейтралью).

Токи замыканий на землю при неблагоприятных условиях (горючая среда, обрыв заземляющих проводников или их отсутствие, плохие контакты, искровые промежутки и т.п.) могут вызвать пожар или взрыв. Поэтому заземление и зануление следует рассматривать как средство электробезопасности и пожарной безопасности.

Заземление в сетях с изолированной нейтралью. Опасность прикосновения принято оценивать по двум крайним случаям: прикосновение к двум фазам и между фазой и землей.

Двухфазное прикосновение является предельно неблагоприятным и может возникать при $r_B = 0$ или $r_C = 0$ (рис. 7.1), что соответствует предварительному глухому замыканию одной из фаз на землю. Человек оказывается под линейным напряжением. Ток, проходя через тело человека, может стать опасным. Его величина определяется выражением

$$I_{чел} = \sqrt{3}\, U_ф / r_{чел} = 380/1000 = 380 \text{ мА}, \qquad (7.1)$$

где $r_{чел}$ – активное сопротивление тела человека, Ом. В задачах по электробезопасности принимается равным 1000 Ом.

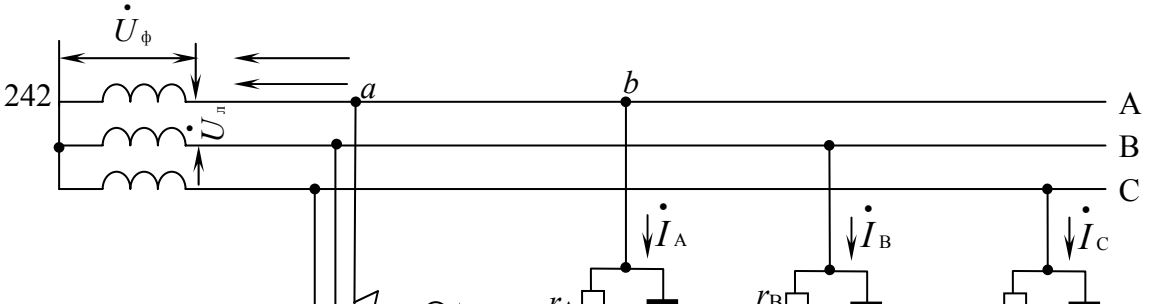


Рис. 7.1. Замыкание на корпус электроприемника в сети
с изолированной нейтралью при отсутствии заземления

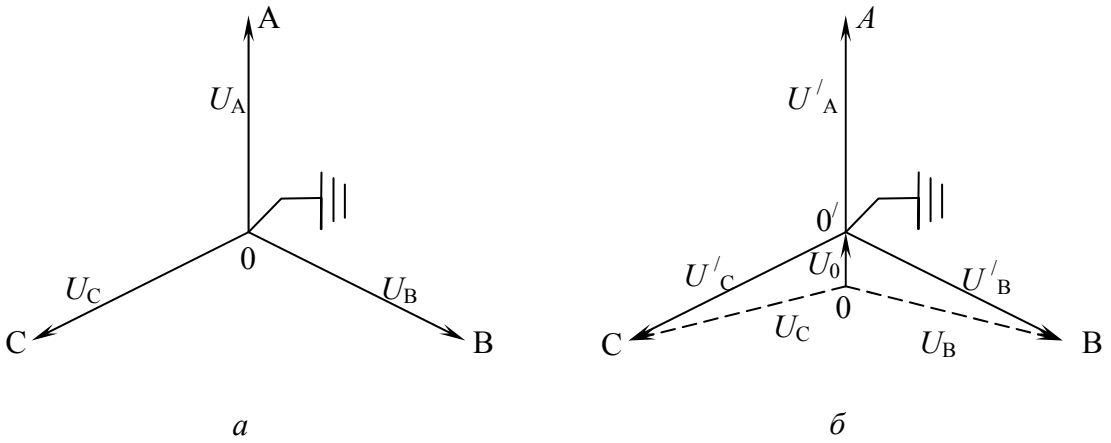
Такое значение $I_{чел}$ значительно больше допустимых 40-100 мА (см. табл. 7.1), при которых возможна гибель пораженного человека. Однако случаи двухфазного прикосновения очень редки и не могут служить основанием для оценки опасности сети. Они обычно бывают при использовании неисправных защитных средств, эксплуатации оборудования с неогражденными голыми токоведущими частями (открытые рубильники, незащищенные зажимы сварочных трансформаторов и т.п.).

Однофазное прикосновение в большинстве случаев также опасно, оно возникает значительно чаще и является основным видом для анализа поражения людей током. Человек, прикасающийся к корпусу электроприемника при замыкании фазы А (см. рис. 7.1), если корпус не соединен надежно с заземлением, приобретает потенциал фазы сети или близкий к нему. Прикосновение к корпусу равносильно прикосновению к фазе. Тело человека, его обувь, пол, земля, активные r_B, r_C и емкостные x_B и x_C сопротивления других фаз, провода и обмотки составляют замкнутую цепь. Ток в этой цепи зависит от ее сопротивления и напряжения и может нанести человеку тяжелое поражение. В целях упрощения считают, что тело человека обладает лишь активным сопротивлением $r_{чел}$, сопротивление растеканию его ног равно нулю. Фазные напряжения равны и симметричны, а сопротивления изоляции фаз одинаковы, т.е. $r_A = r_B = r_C = r$. Емкостью воздушных проводов при промышленной частоте относительно земли пренебрегают.

Рассматривая r_A, r_B, r_C как нагрузку, включенную звездой, у которой нулевая точка – земля, строим векторную диаграмму фазных напряжений до момента прикосновения (рис. 7.2, *а*). Этому случаю соответствуют уравнения:

$$\dot{U}_A = \dot{I}_A r_A;\ U_A = U_B = U_C;$$
$$\dot{U}_B = \dot{I}_B r_B;\ \dot{U}_0 = 0;$$
$$\dot{U}_C = \dot{I}_C r_C;\ I_A = I_B = I_C,$$

где $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$, $\dot{U}_C$ - напряжения фазных проводов относительно земли; $\dot{U}_0$ - напряжение нейтрали источника тока; $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_C$ - токи утечки через изоляцию фазных проводов.



а *б*

Рис. 7.2. Изменение напряжения относительно земли при прикосновении проводов к одной из фаз ($r_1 = r_2 = r_3$; $C_1 = C_2 = C_3 = C$): *а* – до прикосновения; *б* – после прикосновения

При прикосновении человека к фазе А сопротивление изоляции этой фазы относительно земли станет равным

$$r'_A = r_{чел} r_A / (r_{чел} + r_A)$$

и симметрия фазных напряжений нарушится. Нулевая точка сместится в точку 0′. Между 0′ и нулевой точкой источника тока возникает некоторое напряжение U_0, представленное на рис. 7.2, *б* вектором 00′. Напряжения двух других фаз повысятся до одинаковых значений U'_B и U'_C (соответственно векторы 0′B и 0′C), а напряжение первой фазы понизится до U'_A (вектор A0). Для нового состояния сети можно написать

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A - \dot{U}_0;\ \dot{U}'_B = \dot{U}_B - \dot{U}_0;\ \dot{U}'_C = \dot{U}_C - \dot{U}_0.$$

На основании первого закона Кирхгофа $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C + \dot{I}_{чел} = 0$ и, следовательно,

$$[(\dot{U}_A - \dot{U}_0)/r_A] + [(\dot{U}_B - \dot{U}_0)/r_B] + [(\dot{U}_C - \dot{U}_0)/r_C] + [(\dot{U}_A - \dot{U}_0)r_{чел}] = 0. \quad (7.2)$$

При сопротивлении фаз $r_A = r_B = r_C = r$ имеем

$$[(\dot{U}_A+\dot{U}_B+\dot{U}_C)/r]-(3\dot{U}_0/r)+(\dot{U}_A/r_{чел})-(\dot{U}_0/r_{чел}) = 0.$$

Но так как $\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$, получаем

$$-(3\dot{U}_0/r)+(\dot{U}_A/r_{чел})-(\dot{U}_0/r_{чел}) = 0.$$

Следовательно, напряжение смещения нулевой точки 0′

$$\dot{U}_0+\dot{U}_A/r(3r_{чел}+r).$$

Ток, проходящий через тело человека, будет равен

$$I_{чел} = \dot{U}_A - \dot{U}_0 /r_{чел} = (1/ r_{чел})\left(\dot{U}_A - \frac{\dot{U}_A r}{3r_{чел} + r}\right) = 3\dot{U}_A/(3r_{чел}+ r).$$

Принимая во внимание, что $U_A = U_Ф$, окончательно получаем

$$I_{чел} = 3\dot{U}_ф/(3r_{чел}+r). \qquad (7.3)$$

Если не принимать во внимание напряжение смещения нейтрали и учитывать, что $r_{чел}$ обычно гораздо меньше r, ток

$$I_{чел} = U_л/(r_{чел}+ r). \qquad (7.4)$$

В исправном состоянии сопротивление изоляции установок напряжением до 1000 В должно быть не менее 0,5 МОм. В таком случае человек оказывается «под защитой» изоляции других фаз, а ток, проходящий через него, будет безопасным.

По формуле (7.4) ток, проходящий через тело человека, будет равен

$$I_{чел} = U_л/(r_{чел}+r) = 380/(10^3+0{,}5\cdot10^6) = 0{,}76 \text{ мА},$$

что составляет доли миллиампер и условие электробезопасности выполняется.

Все рассмотренное справедливо, если емкостью сетей относительно земли пренебрегают. Но при большой протяженности сетей с изолированной нейтралью значением, определяющим их электро- и пожарную безопасность, является не сопротивление изоляции r, а емкостное сопротивление сети x_C. Величина емкостного сопротивления сетей с изолированной нейтралью, достигающих по длине больше 1 км, может составлять приблизительно 1 кОм.

При таком значении x_C условие электробезопасности выполняться не будет, так как

$$I_{чел} = U_л/(r_{чел}+x_C) = 380/(10^3+10^3) = 190 \text{ мА},$$

что значительно больше порогового значения, т.е. для каждого конкретного случая следует индивидуально оценивать необходимость учитывать x_C сети или возможность пренебрегать этим показателем.

Однако следует учитывать, что наличие в производственных помещениях заземленных металлоконструкций (технологическое оборудование, вентиляция и т.п.) создает опасность одновременного прикосновения к корпусу поврежденного электрооборудования и металлоконструкциям, имеющим потенциал земли. Ток поражения в этом случае может достигать опасных значений, так как в цепь протекания тока не входит значительная величина сопротивления пола, а иногда и обуви.

Без специального заземления электроустановки (например, корпуса электродвигателя) ток однофазного замыкания может возникать в «случайной» цепи (металлоконструкции здания, технологическое оборудование и т.п.) и в местах плохих контактов в этой цепи вызвать искрение, что особенно недопустимо во взрывоопасных зонах. Пожарную опасность представляют искры и дуги при пробое изоляции неповрежденных фаз на землю. Это может привести к возникновению уже сравнительно больших токов, не всегда отключаемых защитой. Задержка или отказ отключения таких токов иногда вызывает прожог электрической дугой труб электропроводки, оболочек кабелей и корпусов электроприемников или их местный недопустимый нагрев. Все это весьма опасно, особенно в условиях пожаровзрывоопасных зон.

Обеспечить необходимую электробезопасность человека и пожарную безопасность сетей с изолированной нейтралью позволяет применение низкоомного заземлителя, шунтирующего сопротивление тела человека (рис. 7.3).

Если корпус электроустановки соединить проводником с заземлителем $r_З$, имеющим малое сопротивление, человек, прикасающийся к участку между корпусом и землей, присоединится к цепи замыкания параллельно. Так как токи в параллельных ветвях обратно пропорциональны их сопротивлениям, а сопротивление тела человека ($r_{чел.расч}$ = 1000 Ом) значительно больше сопротивления заземлителя, ток в теле человека снижается до безопасной величины.

Сопротивление искусственного заземлителя для сетей с $U_л$ = 380 В принимают 4 Ом [1]. При указанных условиях (в дополнение к рис. 7.3), для иллюстрации рассмотрим эквивалентную схему (рис. 7.4). Напряжение прикосновения $U_{пр}$ при этом будет более чем в 100 раз ниже, чем при отсутствии заземлителя, т.е.

$$U_{пр} = U_л \cdot r_З/(r_З+x_C) = (380 \cdot 4)/(4+10^3) = 1{,}5 \text{ В}.$$

Ток, проходящий через человека, определяется напряжением прикосновения $U_{пр}$ и его сопротивлением $r_{чел}$ и будет равен

$$I_{чел} = U_{пр}/r_{чел} = 1{,}5/10^3 = 1{,}5 \text{ мА},$$

что намного меньше порогового поражающего тока (см. табл. 7.1).

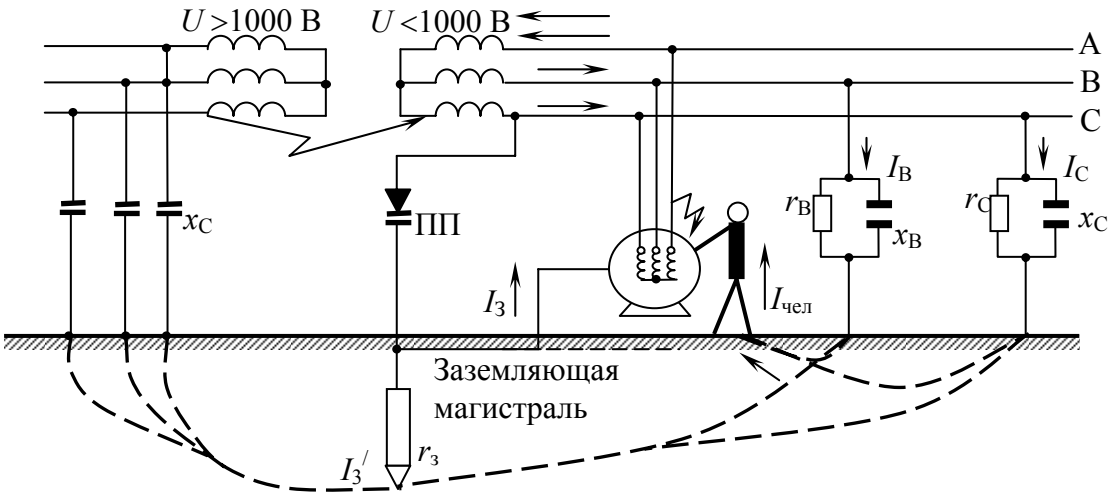


Рис. 7.3. Замыкание на корпус электроприёмника в сети с изолированной нейтралью при наличии заземления. Переход высшего напряжения в цепь низшего

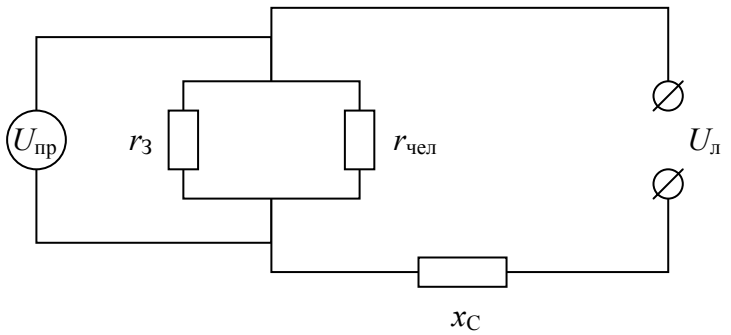


Рис. 7.4. Эквивалентная схема замыкания на корпус электроприемника в сети с изолированной нейтралью при наличии заземления

Заземление корпусов электроустановок, а также металлоконструкций технологического оборудования и зданий существенно улучшает и условия пожаровзрывобезопасности, а правильное устройство и эксплуатация заземления позволяют избежать искрообразований от токов замыканий на землю, что особенно важно для взрывоопасных зон.

Введение сопротивления $r_З$ параллельно телу человека уменьшает эквивалентное сопротивление и снижает возможное напряжение прикосновения $U_{пр}$, т.е. напряжение между двумя точками цепи тока замыкания на землю (на корпус) при одновременном прикосновении к ним человека. Максимальное значение $U_{пр}$ может быть равно напряжению на заземлителе

U_3, т.е. $U_{пр} = U_3 = I_3 r_3$, где I_3 – ток замыкания при пробое на корпус (рис. 7.5). Согласно кривой *ABX*, потенциалы точек, отстоящих в любом направлении от заземлителя на расстоянии от заземлителя примерно 20 м и более, близки к нулю. Следовательно, $U_{пр}$, равное разности ординат точек О и *X*, будет максимальным. Если человек, прикасаясь к заземленному корпусу, находится на расстоянии менее 20 м от заземлителя (например, в точке X_1, он подвергается воздействию только части напряжения U'_3.

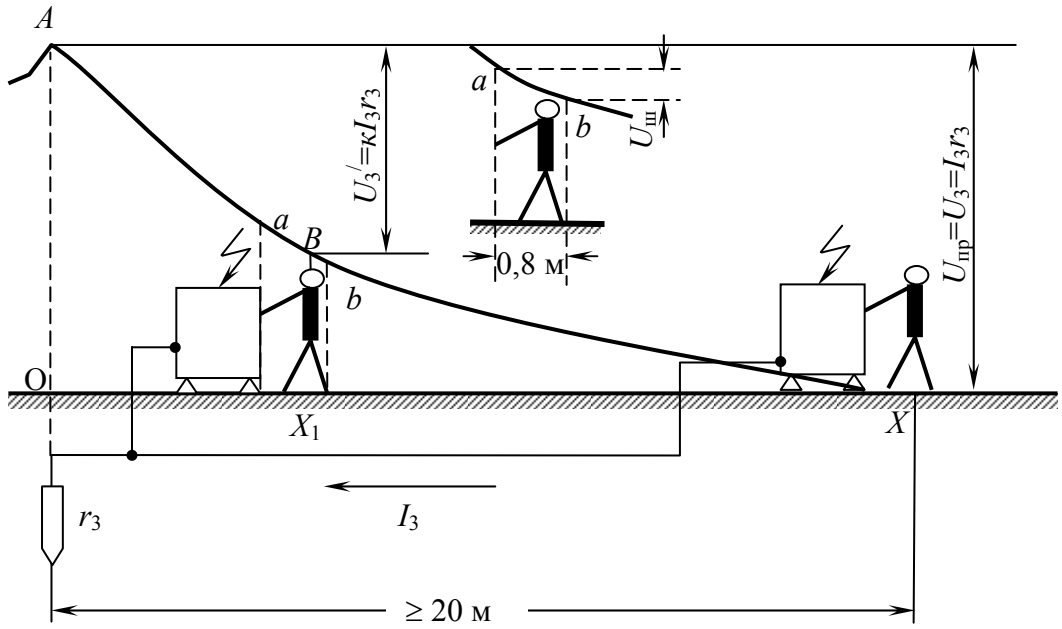


Рис. 7.5. Напряжение прикосновения и шага в пределах растекания (однофазного замыкания)

Таким образом, напряжение, воздействию которого подвергается человек, зависит от расстояния между заземленным корпусом и заземлителем, а также от характера кривой спада потенциала, т.е. от степени выравнивания потенциалов. Кроме того, $U_{пр}$ зависит от суммы и величины сопротивления в цепи замыкания. В общем случае оно равно

$$U_{пр}=K_{пр}U_З=K_{пр}I_з r_з, \qquad (7.5)$$

где $K_{пр}$ – коэффициент прикосновения меньше единицы (0,3-0,2 и ниже для промышленных зданий).

Опасность поражения людей при однофазных замыканиях на заземленные корпуса определяется не только наличием напряжения на корпусах, но и полем довольно большой напряженности в зоне растекания тока в земле с заземлителя. Как следует из рис. 7.5, между любыми двумя точками земли на участке растекания тока существует разность потенциалов. Поэтому человек, находящийся в пределах этого участка, подвергается воздействию напряжения шага $U_ш$, вследствие чего возникает ток поражения, замыкающийся в основном через ноги. Напряжение шага уменьшается

при удалении человека от заземлителя и практически равно нулю на расстоянии 20 м от заземлителя. Оно определяется по формуле

$$U_{ш}=K_{ш}U_{З}=K_{ш}I_{З}r_{З}, \qquad (7.6)$$

где $K_{ш}$- коэффициент, зависящий от степени выравнивания потенциалов (при рациональном устройстве заземления $K_{ш}$ принимают 0,3–0,1 и ниже).

При этом $U_{ш}$ возрастает, если человек, подвергшийся его воздействию, падает в направлении к заземлителю, и ток проходит уже не через все тело. Случаи поражения людей напряжением шага относительно редки: они могут произойти, например, вблизи упавшего на землю провода. Наиболее опасны напряжения шага при разрядах молнии.

ПУЭ не нормируют и не требуют расчетов заземлений на определенную величину напряжений прикосновения и шага, так как нормирование этих величин в установках напряжением до 1000 В крайне затруднительно из-за выбора необходимых расчетных параметров, которые часто бывают условными. Опыт, накопленный в результате эксплуатации обычно применяемых заземлений, позволяет заменить расчеты выбором сопротивлений заземляющих устройств в сочетании (в необходимых случаях) с *выравниванием потенциалов*. В промышленных установках выравнивание потенциалов внутри помещений происходит естественным путем благодаря разветвленной сети заземления, связанной со всякого рода металлическими конструкциями, трубопроводами, оболочками кабелей и т.п.

В электроустановках напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью величина $r_{З}$ не должна превышать 4 Ом за исключением случаев питания от трансформаторов или генераторов мощностью до 100 кВ·А, где $r_{З}$ может достигать 10 Ом. Если генераторы или трансформаторы работают параллельно, сопротивление 10 Ом допускается при суммарной их мощности не более 100 кВ·А. Сопротивление, равное 4 Ом, принято по следующим соображениям. Токи замыкания на землю в ветвях с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В обычно невелики: даже в сетях относительно большой протяженности они не превышают нескольких ампер, а при хорошо налаженной эксплуатации – не более 1 А. При высокой влажности и химически активной среде они могут достигать 10 А и выше.

Измерения в сетях действующих промышленных предприятий показали, что ток замыкания на землю составляет 0,21–2,03 А. Поэтому, при проектировании сетей с изолированной нейтралью расчетной величиной тока замыкания на землю $I_{З}$ был принят довольно большой ток – 10 А. Это равносильно ограничению $r_{З}$ и, следовательно, равносильно ограничению $U_{пр}$ некоторым допустимым значениям, т.е. 12 В.

Поскольку коэффициент $K_{пр}$ всегда меньше единицы и токи замыкания на землю в производствах с нормальной средой значительно меньше 10 А, $U_{пр}$ будет более низким.

Достаточность проводимости заземления должна быть также проверена по условию безопасности при переходе высшего напряжения в цепь низшего, например, из-за непосредственного соединения проводников высшего и низшего напряжений, проводов воздушных линий разного напряжения и др., что может вызвать пробой изоляции электрооборудования низшего напряжения и появление на его корпусе опасного потенциала, а также опасное искрообразование.

Для защиты от такого перехода в сетях с изолированной нейтралью между фазным проводом или нейтралью или одним выводом обмотки (соединенной треугольником) и землей включают пробивной предохранитель ПП (например, ПП-А/3, см. рис. 7.3). Предохранитель имеет две металлические обкладки (контакты) и между ними прокладку из слюды с четырьмя отверстиями по окружности, которая изолирует в нормальном режиме обмотку низшего напряжения от земли. Прокладка служит для осуществления точечного искрового промежутка, обеспечивающего заданную разрядную характеристику. В отверстиях прокладки происходит пробой по воздушному промежутку. Установка пробивного предохранителя на фазном проводе, а не нейтрали, облегчает контроль его целостности, так как пробой предохранителя сразу обнаруживается по приборам контроля изоляции.

Пробивной предохранитель должен замкнуть цепь однополюсного замыкания через $r_З$ (см. рис. 7.3) при переходе напряжения. Так как сопротивление емкости $x_С$ высшего напряжения значительно больше $r_З$, ток $I'_З$ будет емкостным током однополюсного замыкания на землю на стороне высшего напряжения. Этот ток вызывает срабатывание защиты и отключение аварийного трансформатора. Повышение напряжения в цепи низшего напряжения ограничивается малым значением $r_З$. При этом напряжение нейтрали относительно земли будет равно $U_н = I'_З r_З$. По условию защиты от перехода напряжения ПУЭ предписывают принимать значение $r_З$ по формуле

$$r_З \le 125/I'_З. \qquad (7.7)$$

Формула (7.7) как бы регламентирует напряжение 125 В в качестве допустимого для корпусов оборудования, соединенного с $r_з$. Фактически это напряжение будет меньше 125 В вследствие соединения заземленного оборудования с грунтом.

Величина тока однополюсного замыкания $I'_З$ в сетях с изолированной нейтралью может быть определена по приближенной формуле

$$I'_З = U_л(35l_к + l_в)/350, \qquad (7.8)$$

где $U_л$ – линейное напряжение сети на стороне высшего напряжения, кВ; $l_к$ – длина кабельных линий, $l_в$ – длина воздушных линий, объединенных в одной сети, км.

Таким образом, заземление является важной защитной мерой в электроустановках с изолированной нейтралью. Оно особенно эффективно в сетях с хорошей изоляцией фаз относительно земли. Поэтому, согласно ПУЭ, заземление должно быть выполнено совместно с устройством, обеспечивающим постоянный контроль изоляции сети.

Основным недостатком сетей с изолированной нейтралью является наличие одной системы напряжения. Для наиболее распространенного варианта оно составляет 380 В, которым обеспечивается питание силовой нагрузки. Это является серьезным недостатком таких сетей, так как для питания осветительной нагрузки напряжением 220 В необходимо иметь дополнительный источник питания. Поэтому в проектной и эксплуатационной практике чаще применяют сети трехфазные четырехпроводные с глухозаземленной нейтралью, которые имеют два номинала напряжения: линейное – для питания силовой нагрузки и фазное – для питания осветительной.

Зануление в сети с глухим заземлением нейтрали. В трехфазных четырехпроводных сетях напряжением 660/380, 380/220 и 220/127 В в соответствии с требованиями ПУЭ применяется заземление нейтрали трансформаторов или генераторов. При отсутствии защитного заземления эти сети также обладают электроопасностью и пожаровзрывоопасностью. Прикосновение человека к находящемуся под напряжением корпусу электроприемника (рис. 7.6) образует цепь поражения, замыкающую через его тело, обувь, пол, землю и заземление нейтрали.

Напряжение, воздействию которого в этом случае подвергается человек, представляет собой часть фазного напряжения, действующего в цепи замыкания. В теле человека возникает ток $I_{чел}$, обусловленный фазным напряжением $U_ф$ и последовательно включенными сопротивлениями тела человека $r_{чел}$ и заземления нейтрали $r_о$ (если сопротивлениями обуви, пола и земли пренебречь):

$$I_{чел} \approx U_ф/(r_{чел}+r_о). \qquad (7.9)$$

Сопротивление $r_о$ определяется двумя условиями: обеспечением безопасности при переходе высшего напряжения в цепь низшего; предотвращением недопустимого повышения напряжения фазных проводов при замыкании любой фазы на землю. Поэтому ПУЭ устанавливают для заземления нейтрали источника тока максимальную величину сопротивления 2, 4, 8 Ом соответственно при линейных напряжениях 660, 380, 220 В.

Поскольку в формуле (7.9) $r_{чел} >> r_о$,

$$I_{чел} \approx U_ф/r_{чел}. \qquad (7.10)$$

Отсюда следует, что однополюсное прикосновение в сетях с заземленной нейтралью весьма опасно. Например, в сети напряжением 380/220 В через тело человека при $r_{чел}$ = 1000 Ом может проходить смертельно опасный ток 220/1000 = 0,22 А. В этих сетях ток в теле человека не зависит от емкостных токов на землю или токов утечки, так как они зашунтированы глухим соединением нейтрали с землей. Большое значение для электробезопасности приобретает в этом случае высокое сопротивление пола и обуви.

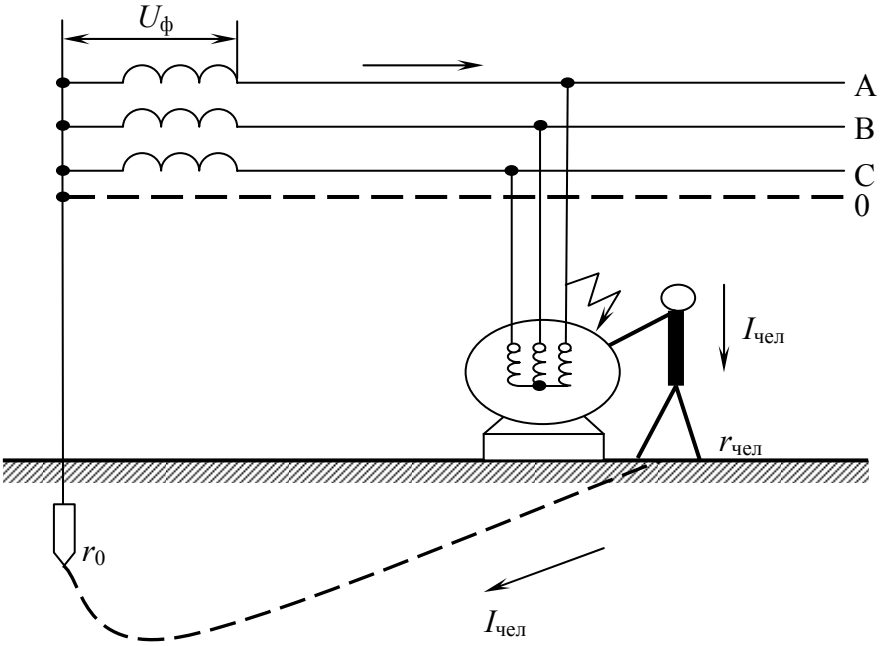


Рис. 7.6. Замыкание на корпус электроприемника в сети с глухозаземленной нейтралью

Отсутствие защитного заземления электроустановки (например, корпуса электродвигателя, см. рис. 7.6) и прохождение тока замыкания при замыкании на корпус по случайному пути в местах плохих контактов тоже может вызвать искрение.

Таким образом, если в электроустановках напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью не применять защиту, прикосновение к металлическому корпусу, соединившемуся с любой из фаз, опасно. Однако обеспечить безопасность персонала в электроустановках с заземленной нейтралью так же, как в электроустановках с изолированной нейтралью, простым заземлением электроприемников нельзя. При замыкании на корпус (рис. 7.7) это заземление не обеспечивает безопасной величины напряжения прикосновения и ток $I_З$ не в состоянии быстро отключить поврежденный элемент электроустановки.

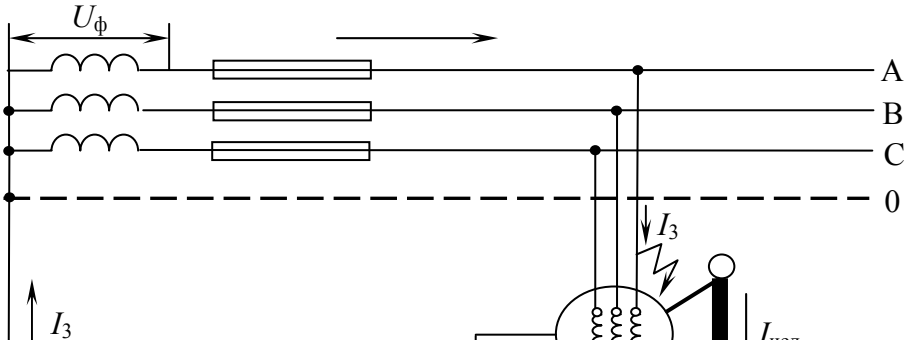


Рис. 7.7. Заземление электроприемника без соединения
с заземленной нейтралью трансформатора

Если пренебречь относительно малыми сопротивлениями трансформатора, активным сопротивлением фазного провода, активным сопротивлением «фаза – земля» и активным сопротивлением земли и места пробоя на корпус, ток замыкания $I_З$, ограниченный сопротивлениями заземлений электроприемника $r_З$ и нейтрали r_0, сможет оказаться недостаточным для сгорания плавкой вставки предохранителя или отключения автомата. Например, если принять часто встречающиеся значения $r_0 = 4$ Ом и $r_З = 10$ Ом при напряжении сети 380/220 В, получим ток замыкания

$$I_З = U_ф/(r_0+r_З) = 220/(4+10) = 15{,}7 \text{ А}.$$

Такой ток может вызвать быстрое отключение линий, защищенных предохранителями с номинальным током плавкой вставки не более 6 А или автомата с током срабатывания электромагнитного расцепителя не более 15 А. При больших номинальных токах этих аппаратов отключения не последует, а при длительном прохождении аварийного тока $I_З$ на заземленных корпусах будут создаваться и опасные напряжения по отношению к земле: $U_{пр} = I_З r_З = 15{,}7 \cdot 10 = 157$ В, а ток через человека $I_{чел} = U_{пр}/r_{чел} = 157/10^3 = 157$ мА, что не обеспечивает условия электробезопасности.

Значения $U_{пр}$ будут определяться величиной $U_ф$ и соотношением $r_0/r_З$. Уменьшение $r_З$ даже в 10 раз снизит напряжение прикосновения $U_{пр}$ примерно в 2 раза, что будет составлять около 100 В. Дальнейшее уменьшение $r_З$ экономически невыгодно, так как связано с необходимостью больших затрат на изготовление заземляющего устройства (так как $r_З$ необходимо было бы уменьшить еще в 10 раз) и в конечном счете не решает проблему

электробезопасности. Поэтому в сетях напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью металлические нетоковедущие части электроустановки надо соединять не с заземлителями, а с нулевым защитным проводом (рис. 7.8), который подключен к нейтрали трансформатора. Это защитное мероприятие называется *занулением*. В таком случае замыкание на корпус приводит к однофазному КЗ сети через фазный и нулевой провода. Так как сопротивления проводов значительно меньше $r_З$ и r_0, токи КЗ $I_{КЗ}$ достигают больших значений. Предохранитель или автомат быстро отключает аварийный участок. Автоматическое отключение поврежденных участков является основным мероприятием по обеспечению электро- и пожаробезопасности в электроустановках с глухозаземленной нейтралью.

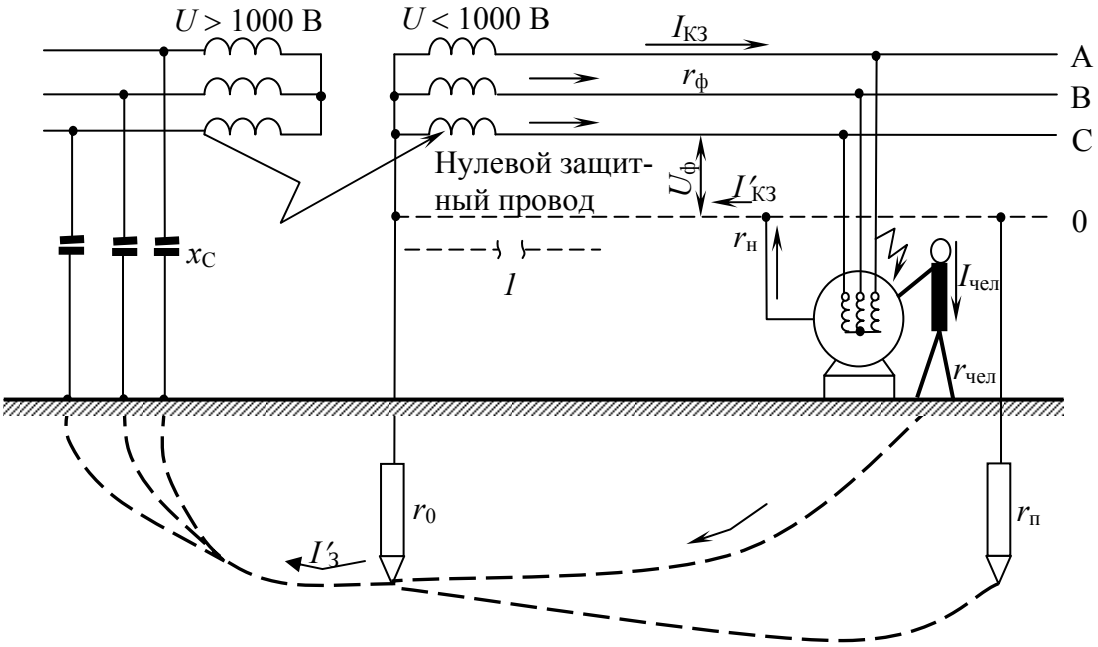


Рис. 7.8. Замыкание на корпус электроприемника в сети с глухозаземленной нейтралью при наличии зануления. Переход высшего напряжения в цепь низшего

Зануление обеспечивает электробезопасность только при соблюдении ряда условий, усложняющих его устройство и требующих постоянного внимания при эксплуатации. Так, для надежного и очень быстрого отключения аварийного участка необходим достаточный ток КЗ. Следует обеспечивать безопасность в течение времени от момента замыкания до срабатывания защитного аппарата, а также при обрыве нулевого провода. При отказе аппаратов защиты или задержке отключения на всех металлических частях, присоединенных к нулевому проводу, остается потенциал, который может превосходить допустимый. В связи с этим будет существовать реальная угроза поражения людей, прикасающихся к этим частям.

Длительный ток однофазного КЗ может вызвать серьезные повреждения токоведущих частей электрооборудования, их защитных оболочек или

корпусов. Особенно опасна задержка отключения токов однофазного КЗ во взрывоопасных зонах, приводящая к возникновению длительной дуги и повреждению (прожигу) оболочки, панели с зажимами или труб электропроводки с последующим выбросом пламени в окружающее пространство. Так, двухдюймовая труба может прогореть через 3 с при токе 500 А, а при токе 350 А – через 5 с. Поэтому лучшим решением следует считать применение во взрывоопасных зонах не предохранителей (за исключением специальных быстродействующих, например ПНБ5), а автоматов с электромагнитными или полупроводниковыми расцепителями, срабатывающими мгновенно и отключающими все три фазы, что предотвращает пожароопасный режим работы электродвигателей на двух фазах.

Во время срабатывания защиты на зануленных металлических частях могут кратковременно создаваться значительные и даже опасные потенциалы. Однако в цепях со встроенными или близко расположенными подстанциями и насыщенных технологическим оборудованием напряжение прикосновения при замыканиях на корпус не превосходит безопасного значения и нередко равно 10-12 В. Это объясняется включением параллельно с нулевым проводом проводников большой проводимости; заземленных металлических частей электроустановок, металлических оболочек кабелей, трубопроводов, технологического оборудования, металлических конструкций зданий и т.п., а также выполненного по ПУЭ повторного заземления нулевого провода ($r_{\text{п}}$, см. рис. 7.8).

Устройство дополнительных местных очагов повторного заземления нулевого провода, выполняемых по контуру здания или установки, является наиболее эффективным способом снижения опасности, особенно для удаленных от подстанций установок. При таком способе удается во время аварийных режимов уравнять потенциалы пола (земли) и оборудования. Повторные заземления нулевого провода снижают опасность возникновения пожаров от токов замыкания и потенциалов на заземленных корпусах в случае обрыва нулевого провода (см. *1* на рис. 7.8).

Как уже указывалось, при обрыве нулевого провода и замыкании на корпус прикосновение к любой присоединенной к нулевому проводу металлической части равносильно присоединению к токоведущему проводу, а прохождение токов замыкания по случайным путям может быть причиной пожара. Однако полное совпадение обрыва нулевого провода с замыканием на корпус маловероятно, тем более что речь идет о магистральных проводах. Если раньше произойдет обрыв, он быстро обнаружится, так как обрыв нулевого провода вызывает отключение или ненормальный режим работы электроламп и других однофазных электроприемников. Если же раньше произойдет замыкание на корпус, оно должно отключиться защи-

той. Кроме того, если в осветительной сети нулевой провод используется в качестве рабочего, потенциал на оборудование может быть вынесен через нить электрической лампочки светильника или сопротивление нагревательного прибора даже при отсутствии замыкания на корпус. Поэтому целостности нулевого провода придается большое значение. Если нулевой провод используется в качестве защитного, в его цепи запрещается применять разъединяющие аппараты (рубильники, выключатели и т.п.), предохранители или автоматы. В воздушных линиях повторные заземления рекомендуется устраивать на концах линий (или ответвлений) длиной более 200 м, а также на вводах в здания, внутри которых применяется зануление, и у прожекторных мачт.

Общее сопротивление растеканию заземлений всех повторных заземлений нулевого рабочего провода каждой воздушной линии в любое время года должно быть не более 5, 10, 20 Ом соответственно при линейных напряжениях 660, 380, 220 В. Сопротивление растеканию заземлителя каждого из повторных заземлений должно быть не более 15, 30, 60 Ом соответственно при тех же напряжениях. Для повторных заземлений следует максимально использовать естественные заземлители (см. параграф 7.3). Чем больше повторных заземлений защитного нулевого провода и чем ниже их сопротивление, тем ниже напряжение прикосновения и напряжение по отношению к земле как при замыканиях на корпус, так и при обрыве нулевого провода.

В электроустановках с глухозаземленной нейтралью напряжением 380-220 В запрещается применение защитного заземления без одновременного зануления, а также применение земли в качестве нулевого проводника, так как при этом в случае повреждения изоляции заземленного оборудования возникли бы те же опасные условия, что и при обрыве нулевого провода.

В электроустановках с глухозаземленной нейтралью защита от опасности, связанной с переходом высшего напряжения в цепь низшего (см. рис. 7.8), достигается заземлением нейтрали трансформатора r_0. При этом повышение напряжения в цепи низшего напряжения ограничивается малым значением r_0. Напряжение нейтрали относительно земли получается равным $U_н=I_З r_0$. Величина r_0 не должна превосходить значение, определяемое выражением (7.7).

Зануление – одна из первых защитных мер в электроустановках. Зануление имеет как экономические (проще и дешевле заземлители, используемые в системе зануления), так и качественные преимущества перед защитным заземлением – оно снимает напряжение с поврежденных частей электроустановки. Выполнение зануления в соответствии с правилами [1] обеспечивает его высокую надежность. Однако зануление имеет ряд принципиальных недостатков, например:

не обеспечивает безопасности при непосредственном прикосновении человека к токоведущим частям электроустановки;

нулевой защитный проводник обеспечивает вынос потенциала (даже при отсутствии замыкания на корпус) на все зануленные электропотребители, что представляет опасность поражения и создает помехи радиоэлектронному оборудованию;

в сети с занулением нельзя использовать заземление отдельных электропотребителей (без соединения их с нулевым защитным проводником), так как при замыкании на заземленный корпус зануленные электропотребители оказываются под опасным напряжением в течение длительного времени;

одновременное прикосновение к токоведущим частям электроустановки и ее зануленному корпусу, а также к незануленному и зануленному электрооборудованию представляет большую опасность;

ошибки при монтаже и подключении электропотребителя могут привести к тому, что его корпус окажется непосредственно подключенным к фазе через нулевой защитный проводник;

перегорание плавкой вставки одного предохранителя при замыкании на корпус не обеспечивает полного отключения от сети трехфазного потребителя, и он (например, трехфазный электродвигатель) окажется в пожароопасном неполнофазном режиме работы;

токи КЗ, токи утечки, искры при замыкании на корпус, перегрев трехфазных потребителей при работе на двух фазах, обусловленные наличием зануления, могут создать пожароопасную ситуацию;

трудности выполнения требований ПУЭ к занулению по формулам (3.12) и (3.13) в протяженных сетях и при занулении мощных потребителей;

трудности контроля (целостности цепи зануления).

Перечисленные недостатки показывают, что зануление уже не соответствует современному уровню электрификации страны и нуждается в принципиальной переработке или замене более совершенными мерами защиты, например устройством защитного отключения УЗО (см. параграф 3.5).

7.3. УСТРОЙСТВО ЗАЗЕМЛЕНИЙ И ЗАНУЛЕНИЙ

Заземление или зануление применяют во всех случаях при напряжении 380 В (и выше) переменного и 440 В и выше постоянного тока. В помещениях с повышенной опасностью, особо опасных, в наружных установках эти защитные меры применяют при напряжениях выше 42 В переменного и 110 В постоянного тока.

Заземлять или занулять необходимо следующие части электроустановок: корпуса трансформаторов; рамы и приводы выключателей и других

коммутационных аппаратов; вторичные обмотки измерительных трансформаторов; каркасы распределительных щитов и щитков, пультов и щитов управления, шкафов с электрооборудованием. Съемные или открывающиеся части щитов и шкафов должны быть занулены отдельным гибким проводником, если на этих частях установлено электрооборудование напряжением выше 42 В переменного или 110 В постоянного тока. Зануляют также металлические оболочки и броню кабелей, проводов, металлические кабельные конструкции и муфты, стальные трубы электропроводки, тросы, на которых подвешены провода, кожухи шинопроводов, короба и лотки, арматуру железобетонных опор и проволочные оттяжки любых опор, а также все другие металлоконструкции, связанные с установкой электрооборудования.

ПУЭ не требуют заземлять или занулять что-либо в помещениях без повышенной опасности поражения электрическим током, в частности в жилых и общественных помещениях с деревянными или пластиковыми полами, если номинальное напряжение электрооборудования 220 В и ниже. Зануление здесь только повысило бы опасность при случайном прикосновении одновременно к токоведущим частям и к зануленным, т. е. к связанному с землей корпусу электрооборудования. Не требуется также занулять в кухнях, ванных комнатах и туалетах квартир металлические корпуса стационарно установленного осветительного электрооборудования и переносных электроприборов и машин мощностью до 1,3 кВт (стиральные и швейные машины, холодильники, утюги и т. п.).

Заземляющие и нулевые защитные проводники подразделяются на магистральные и ответвления от них к отдельным электроприемникам. Там, где это допустимо, в качестве нулевых защитных проводников в первую очередь используют нулевые рабочие проводники. Для заземлений и занулений электроприемников рекомендуется применять отдельные жилы кабелей и провода электропроводок (четвертая жила, четвертый и третий провод), открыто проложенные проводники, преимущественно стальные; металлические конструкции различного назначения; алюминиевые оболочки кабелей (но не броню). Защитными проводниками, в частности, могут служить: металлические конструкции зданий (фермы, колонны и т. п.); металлические конструкции производственного назначения (подкрановые пути, каркасы распределительных устройств, шахты лифтов и подъемников и т. п.); стальные трубы, металлические короба и лотки электропроводов; металлические стационарные открыто положенные трубопроводы всех назначений, кроме трубопроводов для горючих газов и жидкостей, канализации, центрального отопления и бытового водоснабжения. Они могут служить единственными защитными проводниками только в том слу-

чае, если удовлетворяют требованиям ПУЭ в отношении сечения или проводимости, а также если обеспечена их непрерывность.

Защитные проводники по условиям механической прочности и стойкости к коррозии должны иметь минимальные размеры (табл. 7.2).

Таблица 7.2

Проводники	Медь	Алюминий	Сталь		
			в зданиях	в наружных установках	в земле
Голые при открытой прокладке:					
сечение, мм^2	4	6	—	—	—
диаметр, мм	—	—	5	6	10
Изолированные провода, мм^2	1,5*	2,5	—	—	—
Заземляющие и нулевые жилы кабелей и многожильных проводов в общей защитной оболочке с фазными жилами, мм^2	1	2,5	—	—	—
Полосовая сталь:					
сечение, мм^2	—	—	24	48	48
толщина, мм	—	—	3	4	4
Угловая сталь:					
толщина полок, мм	—	—	2	2,5	4
Водогазопроводные трубы:					
толщина стенок, мм	—	—	2,5	2,5	3,5
Тонкостенные трубы по ГОСТ 10704-63:					
толщина стенок, мм	—	—	1,5	2,5	Не допускается

* При прокладке проводов в трубах допускаются медные нулевые защитные проводники сечением 1 мм^2, если фазные проводники имеют то же сечение.

С учетом условий безопасности и особой надежности, которую должны иметь защитные проводники, к ним предъявляются дополнительные требования.

В сетях с изолированной нейтралью сечение заземляющих проводников должно составлять не менее 1/3 сечения фазных, а проводимость проводников из разных металлов должна быть не менее 1/3 проводимости фазных.

В сетях с глухим заземлением нейтрали для надежного автоматического отключения аварийного участка нулевые защитные проводники должны быть выбраны таким образом, чтобы при замыкании на корпус возникал ток КЗ, который удовлетворял бы требованиям формул (3.12) и (3.13). Это требование обычно удовлетворяется, если проводимость нулевых защитных проводников составляет не менее 50 % проводимости фазного провода.

При медных и алюминиевых проводах сечение нулевого защитного провода принимают не менее 50 % фазного. Если же фазный провод медный или алюминиевый, а защитный – стальной, как это часто бывает в

промышленных установках (за исключением взрывоопасных), защитный провод нельзя выбирать, исходя из сечения фазного, так как сопротивление стальных проводников относительно велико, а при переменном токе сопротивление зависит также от тока и конструкции проводника (одно- или многожильная). Кроме того, следует считаться с внешним индуктивным сопротивлением, так как стальные защитные проводники (за исключением прокладки в стальных трубах) монтируются на некотором, иногда значительном, расстоянии от фазных.

В табл. 7.3 приведены рекомендуемые минимальные сечения проводников из полосовой стали и диаметры труб электропроводки, примерно соответствующие по проводимости сечениям медных и алюминиевых проводов для зануления в сетях напряжением 660, 380 и 220 В.

Таблица 7.3

Сечение, мм^2			Диаметр водогазопроводной трубы для зануления, дюймы
медного фазного провода	алюминиевого фазного провода	стальной полосы для зануления	
6 и ниже	10 и ниже	15 х 3	1/2
10	16	20 х 4	1/2
16	25	40 х 3	3/4
25	35	50 х 4	1
35	50	80 х 4	1·1/2
50	70	100 х 4	1·1/2
70	95	100 х 8	2
95	120	100 х 8*	2·1/2
120	-	-	2·1/2

* Может применяться только при алюминиевом фазном проводе.

Использование естественных проводников в качестве нулевых рабочих проводников допускается в нормальных помещениях только для групповой сети освещения и при условии, что они не находятся в непосредственной близости от сгораемых частей зданий или конструкций.

Нулевыми и защитными проводниками могут служить алюминиевые оболочки кабелей, так как они всегда имеют необходимую проводимость (табл. 7.4).

Таблица 7.4

Трехжильный кабель, сечение, мм^2,		Четырехжильный кабель, сечение, мм^2,	
жил	оболочки	жил	оболочки

3 x 6	39	3 x 6 + 1 x 4	46
3 x 10	45	3 x 10 + 1 x 6	55
3 x 16	50	3 x 16 + 1 x 10	71
3 x 25	57	3 x 25 + 1 x 16	82
3 x 35	63	3 x 35 + 1 x 16	97
3 x 50	78	3 x 50 + 1 x 25	125
3 x 70	95	3 x 70 + 1 x 25	140
3 x 95	105	3 x 95 + 1 x 35	157
3 x 120	120		
3 x 150	149		
3 x 185	165		
3 x 240	186		

Применение свинцовых оболочек кабелей в качестве нулевых и защитных проводников запрещается.

Соединения нулевых защитных проводников между собой должны обеспечивать надежный контакт и выполняются сваркой. Эти проводники присоединяются к частям оборудования, подлежащим занулению, сваркой или болтовым соединением. Присоединение должно быть доступно для осмотра. Открыто проложенные нулевые защитные проводники должны иметь отличительную окраску – по зеленому фону желтые полосы.

Заземлители. Для заземляющих устройств любого назначения используются естественные и искусственные заземлители или их сочетание. В качестве естественных заземлителей можно использовать проложенные в земле водопроводные трубы и другие металлические трубопроводы, за исключением трубопроводов горючих жидкостей и газов; обсадные трубы различного назначения: металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений, имеющие надежное соединение с землей; металлические шпунты гидротехнических сооружений; свинцовые оболочки кабелей, проложенных в земле. Если оболочки кабелей служат единственными заземлителями, учитывать их в расчете заземляющих устройств можно только при числе кабелей не менее двух.

Преимуществом протяженных естественных заземлителей является их малое сопротивление растеканию тока, а также отсутствие специальных затрат на их устройство. Недостаток естественных заземлителей – доступность неэлектротехническому персоналу. При ремонтных работах могут быть нарушены соединения между отдельными элементами протяженных заземлителей, а главное – между заземляющими проводниками и заземлителями.

Если естественных заземлителей нет или их использование не дает нужных результатов, применяют искусственные заземлители – вертикально забитые стержни (электроды) из круглой или угловой стали из газоводопроводных (некондиционных) труб, а также горизонтально проложен-

ные стальные полосы или круглую сталь. Стержни из круглой стали для вертикальных заземлителей рекомендуются диаметром 10 мм и длиной 5 м. Применяют также угловую сталь 50 х 50 х 5 мм длиной 3 м. Используются трубы диаметром 50 мм и длиной 2,5 - 3 м. Чтобы уменьшить колебания сопротивлений заземлителей, связанные с изменениями внешней температуры и влажности грунта, их располагают ниже уровня земли на 0,5-0,8 м. Еще меньше подвергаются атмосферным влияниям углубленные заземлители из полосовой или круглой стали, закладываемые на дно котлованов при сооружении фундаментов зданий цехов, подстанций и т.д.

Горизонтальные полосовые заземлители из полосовой стали шириной 30 - 50 мм и толщиной не менее 4 мм применяют для связи вертикальных заземлителей и в качестве самостоятельных. Рекомендуемая глубина их погружения 0,5 - 0,8 м.

Сопротивление заземлителей зависит от ряда факторов: свойств и состояния грунта; конструктивных особенностей элементов (угловая, полосовая сталь, труба), глубины их заложения; количества и взаимного расположения элементов.

Электрические свойства грунта характеризуются удельным сопротивлением ρ, измеряемым в Ом·м или Ом·см. Оно зависит от состава грунта (песок, суглинок, глина, чернозем и т. д.), содержания влаги и растворенных веществ, а также от температуры.

Перед расчетом заземляющих устройств рекомендуется измерять удельное сопротивление грунта в реальных условиях на площадке, предназначенной для сооружения заземлителя. Методы измерения могут быть разные. Удельное сопротивление грунта, полученное измерением, умножают на коэффициент K (табл. 7.5), учитывающий климатические условия перед измерением: $\rho_{расч} = \rho_{изм} K$.

Для средней полосы России применяют:

K_1 — в том случае, если грунт влажен и измерениям предшествовали большие осадки; K_2 — если грунт средней влажности и измерениям предшествовали небольшие осадки; K_3 — если грунт сухой и перед измерениями не было осадков.

Таблица 7.5

Тип заземлителей	Глубина залегания, м	Повышающие коэффициенты		
		K_1	K_2	K_3
Поверхностный	0,5	6,5	5,0	4,5
То же	0,8	3,0	2,0	1,6
Углубленный (труба, уголок, стержень)	0,8	2,0	1,5	1,4

Для заземлителей, лежащих ниже глубины промерзания, коэффициенты не применяют.

Если непосредственные измерения отсутствуют, можно пользоваться приближенными средними значениями удельных сопротивлении грунта, которые приводятся в литературе. Точность расчета при этом снижается.

При устройстве заземлителей следует избегать размещения их в местах, где возможна пропитка грунта маслами, нефтью и т. п., а также вблизи трубопроводов горячей воды, пара и других сооружений, вызывающих высыхание почвы. В этих случаях сопротивление заземлителей резко возрастает.

7.4. РАСЧЕТ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

При проектировании заземляющих устройств прежде всего необходимо использовать естественные заземлители. Если их сопротивление растеканию тока $r_е$, полученное измерением или по данным аналогичных случаев, окажется достаточным, другие заземлители не требуются. При недостаточном сопротивлении естественных заземлителей сопротивление искусственных заземлителей определяется по формуле

$$r_{иск} \le r_е r_з/(r_е - r_з), \tag{7.11}$$

где $r_з$ — требуемое сопротивление растеканию тока заземляющего устройства по ПУЭ (см. параграф 7.2).

При невозможности или нецелесообразности использования естественных заземлителей сопротивление искусственных заземлителей должно удовлетворять требованию $r_{иск} \le r_З$. Так как проводимость искусственных заземлителей складывается из проводимости вертикальных и горизонтальных заземлителей, то

$$r_{иск} = r_в r_г/(r_в + r_г). \tag{7.12}$$

Сопротивление одиночного цилиндрического электрода может быть подсчитано по формуле

$$r_{о.в} = 0{,}366\ (\rho_{расч}/l)\left[\lg\frac{2l}{d} + \frac{1}{2}\lg\left(\frac{4t+l}{4t-l}\right)\right], \tag{7.13}$$

где $\rho_{расч}$ - расчетное удельное сопротивление грунта, Ом·м; l - длина трубы или стержня, м; d - наружный диаметр трубы или стержня; t - глубина заложения, равная расстоянию от поверхности земли до середины трубы или стержня, м.

Если одиночный заземлитель обычно представляет собой трубу диаметром 0,05 м и длиной 2,5 м, забиваемую на глубину 0,7 м, считая от поверхности земли до верха трубы (t = 0,7 + 1,25=1,95), то

$$r_{\text{о.т}} \approx 0{,}3\,\rho_{\text{расч}}. \qquad (7.14)$$

Обычно вместо труб используют более дешевые заземлители из угловой стали. Сопротивление растеканию таких электродов определяется по формуле (7.13) с введением вместо d эквивалентного диаметра заземлителя из угловой стали $d_{\text{у}}$. Эквивалентный диаметр $d_{\text{у}}$ угловой стали рассчитывают, исходя из активной поверхности растекания тока, по формуле

$$d_{\text{у}} = 0{,}95\ b, \qquad (7.15)$$

где b - ширина полки уголка.

Если пользоваться упрощенной формулой (7.14), сопротивление одиночного электрода длиной 2,5 м получается равным:

для угловой стали 50 х 50 х 5 мм

$$r_{\text{о.у}} = 0{,}318\,\rho_{\text{расч}}; \qquad (7.16)$$

для угловой стали 60 х 60 х 6 мм

$$r_{\text{о.у}} = 0{,}298\,\rho_{\text{расч}}. \qquad (7.17)$$

Сопротивление растеканию тока протяженных горизонтальных заземлителей определяют по формулам

$$r_{\text{о.п}} = 0{,}366\ (\rho_{\text{расч}}/l)\ \lg(2l^2/bt); \qquad (7.18)$$

$$r_{\text{о.кр}} = 0{,}366\ (\rho_{\text{расч}}/l)\ \lg(l^2/dt), \qquad (7.19)$$

где $r_{\text{о.п}}$ и $r_{\text{о.кр}}$ – соответственно сопоставления полосового и круглого горизонтальных заземлителей, Ом.

Из сопоставления формул (7.18) и (7.19) следует, что одинаковые сопротивления растеканию тока дает круглая сталь диаметром d и полоса шириной $2d$.

Обычно устраивают сложные заземлители из нескольких (а иногда из большого количества) вертикальных электродов, которые соединяют параллельно металлической полосой, являющейся также электродом. Электроды такого заземлителя располагаются на расстоянии друг от друга, обычно равном 1-3 длинам электрода, из-за чего возникает так называемое взаимное экранирование электродов. Явление экранирования происходит в результате наложения электрических полей при растекании тока в землю. Сопротивление каждого электрода при этом растет. Экранирование приводит к существенному увеличению их сопротивления.

Таким образом, сопротивление сложного заземлителя (при расположении электродов в ряд или по контуру) следует определять с учетом взаимного экранирования одиночных вертикальных электродов и горизонтальных соединительных полос.

Сопротивление растеканию тока n вертикальных электродов с учетом их экранирующего влияния определяют по формуле

$$r_{в} = r_{о.в}/n\eta_{в}, \tag{7.20}$$

где $r_{о.в}$ - сопротивление одиночного вертикального заземлителя (формулы (7.13) – (7.17)); $\eta_{в}$ — коэффициент использования вертикальных заземлителей (см. прил. 3).

Сопротивление растеканию тока горизонтальных соединительных полос, связывающих вертикальные заземлители, с учетом экранирующего влияния полос находят по формуле

$$r_{г.п} = r_{о.п}/\eta_{г}, \tag{7.21}$$

где $r_{о.п}$ – сопротивление горизонтальной соединительной полосы без экранирующего влияния на нее (см. формулы (7.18) и (7.20)); $\eta_{г}$ – коэффициент использования горизонтальных соединительных полос (см. прил. 3).

Сопротивление всего заземлителя определяют по формуле (7.12). После вычисления сопротивления всего заземлителя можно сделать вывод о его соответствии нормативным требованиям [1].

Вышеперечисленные действия можно представить в виде алгоритма, структура которого представлена на рис. 7.9. Разработана программа, работающая по этому алгоритму. После ввода начальных данных о типах электродов, их размерах, конструкции всего заземлителя, а также сопротивлении грунта производится анализ параметров и делается вывод о соответствии заземлителя нормативным требованиям [1].

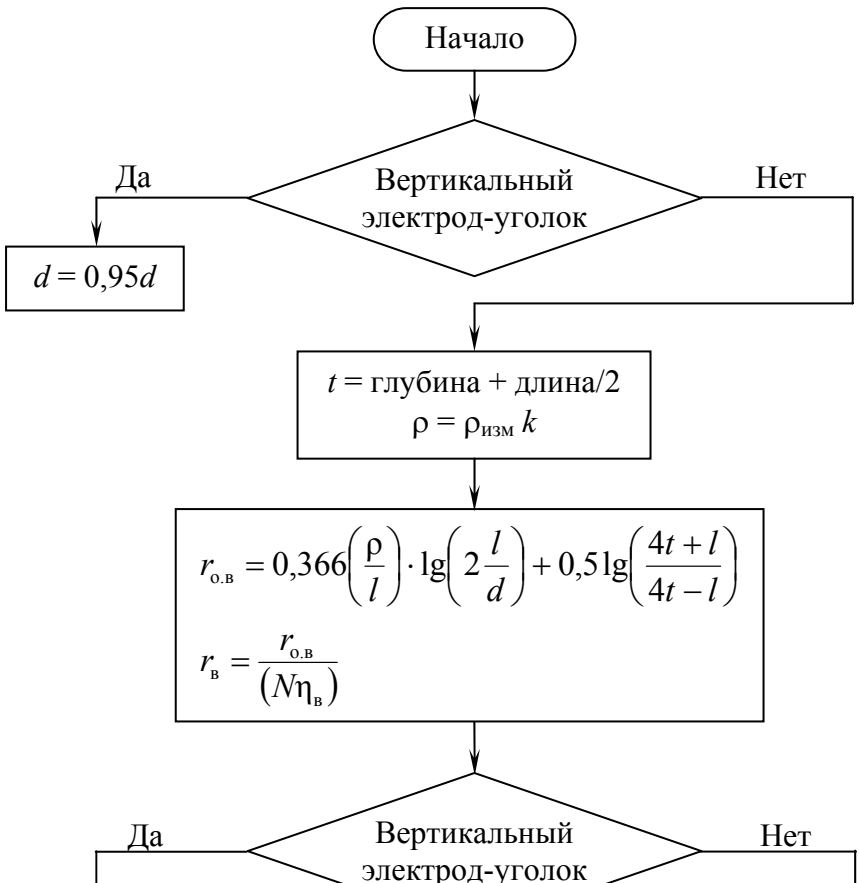


Рис. 7.9. Структура алгоритма анализа параметров заземлителя

7.5. ЗАЩИТНЫЕ ЗАЗЕМЛЕНИЯ И ЗАНУЛЕНИЯ ВО ВЗРЫВООПАСНЫХ ЗОНАХ

Возникновение потенциалов по отношению к земле на корпусах электроприемников и оборудования во взрывоопасных зонах может вызвать искрение и воспламенение взрывоопасных смесей. Поэтому к устройству защитных заземлений во взрывоопасных зонах предъявляют более жесткие требования. Так, во взрывоопасных зонах заземление или зануление следует выполнять при любых напряжениях. В качестве заземляющих или защитных нулевых проводников должны применяться специальные голые и изолированные проводники. Естественные проводники используются дополнительно для улучшения условий безопасности.

В электроустановках с изолированной нейтралью для всех напряжений сеть заземления выполняется из стальных проводников. Для повышения надежности заземляющие магистрали должны быть присоединены к заземлителям *не менее чем в двух местах с противоположных сторон*

помещения. Электроустановки с изолированной нейтралью допускаются во взрывоопасных зонах только при автоматическом контроле изоляции сети с действием на сигнал, а также при пробивном предохранителе, установленном в нейтраль или на фазе.

Заземляющие проводники присоединяют к металлическим конструкциям сваркой, а к корпусам машин и аппаратов - сваркой или надежными болтовыми соединениями. Во избежание ослабления контакта при сотрясениях или вибрации машин устанавливают контргайки и пружинящие шайбы. Электрооборудование, подвергающееся частому демонтажу или установленное на движущихся частях, соединяют с заземлением гибкими проводниками.

В электроустановках с глухозаземленной нейтралью зануление должно осуществляться в одно-, двух- и трехфазных силовых цепях электроустановок всех классов с применением специальной третьей (или четвертой) жилы кабеля или провода, а также в однофазных осветительных цепях, кроме зон класса В-I, с использованием нулевого провода. Необходимость третьего провода для зануления корпусов светильников в зонах класса В-I объясняется тем, что в двухпроводных цепях с нулевым проводом должен быть защищен от токов КЗ как фазный, так и нулевой провод. При этом для одновременного отключения фазного и нулевого проводов должны применяться двухполюсные выключатели.

Во взрывоопасных зонах всех классов в электроустановках с глухозаземленной нейтралью для автоматического отключения аварийного участка защитные нулевые проводники выбирают с таким расчетом (см. формулу (3.12)), чтобы при замыкании на корпус или нулевой защитный проводник возникал ток КЗ, превышающий не менее чем в 4 раза номинальный ток плавкой вставки ближайшего предохранителя и не менее чем в 6 раз - номинальный ток расцепителя автоматического выключателя, имеющего обратнозависимую от тока характеристику. При защите сетей автоматическими выключателями, имеющими только электромагнитный расцепитель, следует руководствоваться требованиями, приведенными в формуле (3.12).

Для обеспечения необходимой кратности тока замыкания и быстрого действия защиты в электроустановках с заземленной нейтралью нулевые защитные проводники (третья или четвертая жилы проводов, кабеля) должны быть из цветных металлов, а их сечение должно быть равно сечению фазных проводников.

Защитные проводники, проходящие через стены, фундаменты и т.п. из взрывоопасных зон в зоны другого класса взрывоопасности, а также в зоны с нормальной средой или наружу, должны прокладываться в трубах, а концы труб следует заделывать цементным раствором. У ввода магистралей заземления в здание наносят опознавательные знаки и указывают расстоя-

ние до места присоединения к заземлителю. Все части заземляющего устройства, прокладываемые в земле, соединяют только сваркой, а места сварки покрывают гудроном или кабельной массой. В особо ответственных местах целесообразно присоединять магистрали заземления к электродам заземлителя в специальном смотровом колодце.

7.6. ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ИСПЫТАНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Общие требования эксплуатации. При приемке в эксплуатацию заземляющих устройств после окончания монтажных работ должна быть представлена следующая техническая документация: исполнительные чертежи и схемы заземляющего устройства; акт на подземные работы (укладка заземлителей и заземляющих проводников); протоколы испытаний заземляющих устройств.

При эксплуатации должны производиться периодические проверки и испытания заземляющих устройств (внешний осмотр заземляющих проводников и контактов, измерения сопротивления и т. п.).

Если соединение выполняется сваркой, сопротивление контакта всегда удовлетворительно. Наиболее вероятным местом, в котором возможен слабый контакт, а следовательно, и возникновение искрения или нагрева, является болтовое соединение сети заземления с электрооборудованием. В этих местах необходима периодическая проверка целостности контактов и их затяжки.

Осмотры заземляющего устройства и измерение его сопротивления следует производить в сроки, устанавливаемые системой ППР, не реже одного раза в три года. Постоянное заземляющее устройство должно иметь паспорт, схему, должны быть указаны основные технические и расчетные величины, результаты осмотров и испытаний, характер проведенных ремонтов и изменений, внесенных в устройство заземлений.

От контроля состояния нулевых защитных проводников в процессе эксплуатации во многом зависит безопасность лиц, работающих с зануленным электрооборудованием. Контроль предусматривает периодические измерения сопротивления цепи «фаза – нуль» (или сразу тока однофазного КЗ) и сопротивлений ответвлений от магистрального нулевого защитного проводника к отдельным зануляемым электроприемникам, а также периодические осмотры этих ответвлений.

Согласно правилам [10], после монтажа электроустановки (перед приемкой ее в эксплуатацию), а также после капитальных ремонтов электропроводки или электроприемников, но не реже чем раз в 5 лет полагается измерять сопротивление цепи проводников «фазный – нулевой» для опре-

деления тока однофазного КЗ при замыкании на корпус наиболее удаленных и мощных электроприемников в целях экспериментальной проверки соблюдения условий (3.12) и (3.13). Такие измерения во взрывоопасных зонах проводятся для всех электроприемников.

Измерение сопротивления заземляющих устройств. Сопротивление заземляющих устройств может быть измерено мостовым способом, способом амперметра и вольтметра, а также измерителем заземления. Рассмотрим измерение сопротивления заземляющих устройств измерителями заземления типа МС-08 (сняты с производства, но еще широко используются при обслуживании как промышленных, так и сельскохозяйственных электроустановок) и М-416 (рис. 7.10 и 7.11).

Основными элементами первого измерителя являются: генератор постоянного тока Г с ручным приводом (рукояткой Р), механический преобразователь (коммутатор) постоянного тока в переменный П, механический преобразователь переменного тока в постоянный (выпрямитель) В, магнитоэлектрический омметр логометрического типа Л и резистор $r_д$. Оба преобразователя смонтированы на оси генератора и имеют одинаковую конструкцию: каждый представляет собой два изолированных друг от друга металлических фасонных полуцилиндра. Щетки *1* находятся в непрерывном контакте с основаниями полуцилиндра и имеют переменную полярность, а щетки *2,* связанные со щетками генератора, при вращении вала соприкасаются с боковой поверхностью то одного, то другого полуцилиндра. Следовательно, на выходе преобразователя П (щетки *1*) появляется переменный ток $I_{пер}$, который и проходит через заземлители (эта часть цепи показана пунктирной линией). Использование переменного тока во внешней цепи исключает искажения в измерениях, возникающие из-за поляризации и электролиза в грунте.

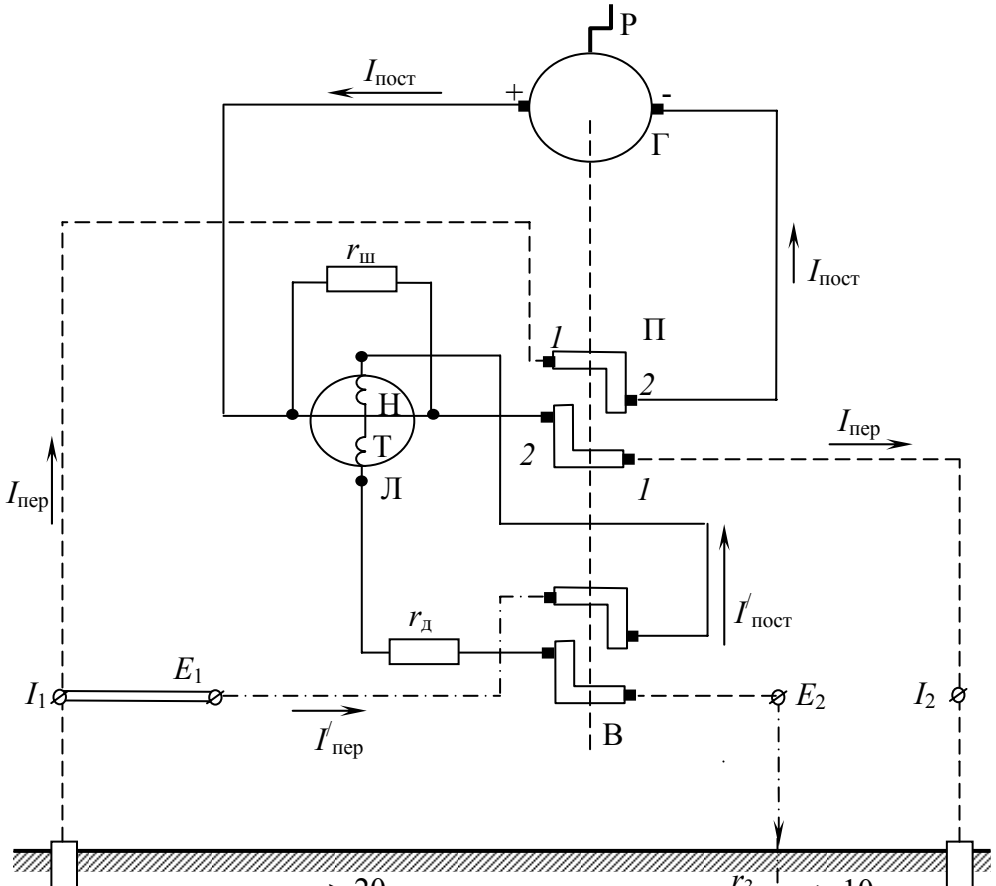


Рис. 7.10. Схема измерения сопротивления заземлителя прибором МС-08:
1, *2* – щетки; Г – генератор постоянного тока; П – механический преобразователь постоянного тока в переменный; В – механический выпрямитель; Л – логометр; Т – токовая обмотка; Н – обмотка напряжения; $r_д$ и $r_ш$ – резисторы; Р – приводная рукоятка; I_1 и I_2 – токовые зажимы; E_1 и E_2 – потенциальные зажимы

Между заземлителем $r_х$ и зондом $r_з$ образуется разность потенциалов, и в этой части цепи возникает переменный ток $I_{пер}$, который выпрямляется в коммутаторе В. Постоянный ток $I_{пост}$ протекает через резистор $r_д$ = = 150 000 Ом, позволяющий снизить погрешность измерения, и обмотку напряжения Н. В токовой обмотке Т логометра тоже имеется постоянный ток (ветви с постоянным током показаны сплошными линиями). Использование постоянного тока в обмотках логометра повышает точность измерения. От отношения токов $I_{пост}/I'_{пост}$ зависит угол поворота рамок относительно друг друга. Этот угол пропорционален измеряемому сопротивлению $r_х$, так как ток $I'_{пост}$ пропорционален потенциалу исследуемого заземлителя. Поэтому по положению стрелки прибора, связанной с одной из рамок, и определяется сопротивление.

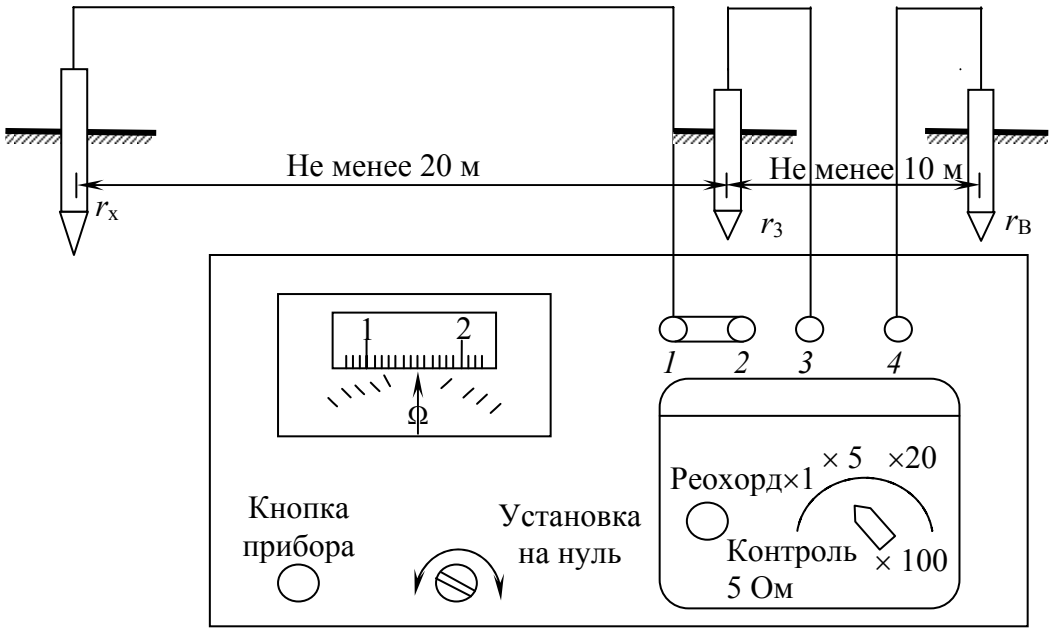


Рис. 7.11. Схема измерения заземления прибором типа М-416:
1, *2*, *3*, *4* - зажимы

В приборе имеются три предела – 10, 100 и 1000 Ом, что достигается подключением параллельно к обмотке Т резистора переключателем на панели прибора. Для того чтобы переменный блуждающий ток не искажал результатов, необходимо вращать рукоятку Р со скоростью, при которой стрелка не совершает колебаний. Колебания ее могут наступить, если частота тока $I_{пер}$ близка к частоте блуждающего в земле тока. Постоянный блуждающий ток не действует на прибор, так как преобразуется коммутатором в переменный. При неработающем генераторе блуждающий переменный ток вызывает дрожание стрелки, а постоянный ток – ее небольшое отклонение.

Сопротивление вспомогательного заземлителя должно составлять 250-1000 Ом (чем выше предел измерения, тем выше это сопротивление), а сопротивление зонда - не более 1000 Ом. Наибольшая погрешность на рабочей шкале составляет 10 %.

Измеритель типа М-416 не содержит вращающегося генератора (см. рис. 7.11). Внутрь вкладывается батарея из трех элементов типа 373 или аналогичных (общее напряжение около 4,5 В). В приборе смонтирован полупроводниковый преобразователь постоянного тока в переменный (инвертор) для токовой цепи (зажимы *1* и *2*), к которому присоединяют измеряемый заземлитель $r_х$ и вспомогательный $r_в$, а также полупроводниковый выпрямитель (входные зажимы *2* и *3*); логометра нет. Принцип измерения – компенсационный (сравниваются падения напряжения на внешнем $r_х$ и эталонном сопротивлениях). Имеется четыре диапазона измерения. Отсчет производится, когда реохордом стрелка прибора приводится в нейтральное положение. Прибор проверяют по эталонному сопротивлению 5 Ом. Если ожидаемое сопротивление $r_х$ менее 5 Ом, перемычку между зажимами *1* и *2* снимают и зажим *2* присоединяют к $r_х$.

Удельное сопротивление можно измерить прибором МС-08, применяя метод вертикального электрического зондирования. Для этого забивают в землю на одной прямой четыре электрода на глубину 0,05 *a,* где *a* – расстояние между электродами. Внешние электроды присоединяют к зажимам I_1 и I_2 (см. рис. 7.10), внутренние – к зажимам E_1 и E_2. Перемычку между I_1 и I_2 отсоединяют. Перед замером стрелку устанавливают на красной черте, переключатель — на положение «регулировка». Затем его переводят в положение «измерение» и делают отсчет $r_З$. Удельное сопротивление равно

$$\rho_{изм} = 2\pi a r_З. \qquad (7.22)$$

Такое измерение делают в теплое время года и в нескольких точках площадки. Если полученные $\rho_{изм}$ для исследуемых точек площадки отличаются более чем на 50 %, количество точек увеличивают. При разнице менее 30 % грунт считают однородным.

Измерение сопротивления цепи «фаза — нуль». Для таких измерений выпускается прибор М-417, рассчитанный на проверку $z_{(ф\text{-}о)}$ в сетях напряжением 380/220 В. Принцип его работы состоит в том, что на короткое время устраивается замыкание фазы на зануленную часть через резистор, размещаемый в приборе. Падение напряжения на резисторе является разностью между фазным напряжением и падением напряжения в цепи «фаза – нуль», включая сопротивление фазы трансформатора. Значит, при неизменных напряжении и сопротивлении резистора падение напряжения на нем зависит от сопротивления цепи. Поэтому стрелочный прибор, включенный параллельно резистору, может быть проградуирован в омах.

Результаты измерения $z_{(ф\text{-}о)}$ подставляют в формулу (3.14) и оценивают $I_{КЗ(к)(1)}$, т.е. $I_{КЗ(к)(1)} = KU_ф/z_{(ф\text{-}о)}$, где $K = 0{,}85$ — коэффициент, учитывающий погрешности, вносимые прибором и связанные с колебаниями напряжения в процессе измерений.

После монтажа электроустановки эти измерения делают только для наиболее удаленных и наиболее мощных электроприемников, для которых трудно соблюсти условия (3.12) и (3.13), но не менее чем для 10 % общего числа электроприемников. Для остальных электроприемников измеряют только сопротивление ответвления от магистрального нулевого защитного проводника до корпуса соответствующего электроприемника, чтобы убедиться в целостности ответвления и качестве контактов. Для этого предназначен специальный омметр М-372 (можно использовать измеритель МС-08). Для ответвлений норма сопротивления не установлена, а результат измерения сравнивают с предыдущим, который зафиксирован в паспорте электроприемника. Результат первого измерения сравнивают с результатом измерений на других аналогичных электроприемниках. Если значение сопротивления много выше, чем при предыдущем измерении, это свидетельствует о плохом состоянии контакта в месте соединения ответвления с зануленным корпусом или, что реже, с магистралью зануления (контакт заржавел, закрашен, замаслен). В случае обрыва ответвления прибор покажет бесконечность.

Глава 8

МОЛНИЕЗАЩИТА

8.1. МОЛНИЯ И ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Молния представляет собой электрический разряд в атмосфере между заряженным облаком и землей, между разноименно заряженными частями облака или соседними облаками. Длина ее канала обычно достигает нескольких километров, причем значительная его часть находится в грозовом облаке.

До появления разряда происходит накопление и разделение электрических зарядов в облаке, чему способствуют аэродинамические и термические процессы: восходящие воздушные потоки, конденсация паров на высоте от 1 до 6 км, образование капель, их дробление. Вертикальные потоки теплого воздуха могут создаваться при усиленном местном нагреве почвы (*тепловые грозы*, охватывающие небольшое пространство) и во время вторжения клиновидной массы холодного воздуха (*фронтальные грозы*).

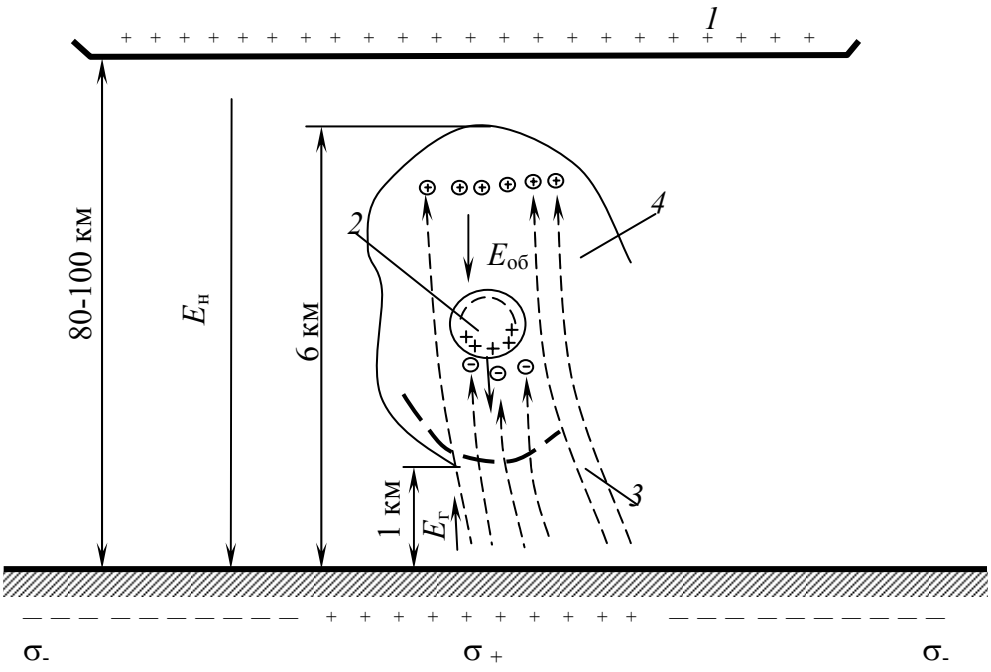


Рис. 8.1. Образование зарядов в облаке:
1 – ионосфера; *2* – поляризованная капля; *3* – поток воздуха; *4* - облако

Нормально земля заряжена отрицательно с поверхностной плотностью δ - при существовании электрического поля земли с напряженностью $E_н$. Второй «обкладкой» этого сферического конденсатора является положительно заряженная ионосфера, расположенная очень высоко (рис. 8.1). Под действием $E_н$ падающая капля поляризуется, в нижней ее части появ-

ляется положительный заряд, в верхней – отрицательный. Движущиеся в восходящем потоке воздуха электроны притягиваются нижней частью капли, а более положительные инерционные ионы воздуха отталкиваются и уносятся далее, сосредоточиваясь вверху. В результате этого капли получают суммарный отрицательный заряд и наполняют нижнюю часть облака со значительной объемной плотностью, где может находиться иногда и небольшой объемный положительный заряд. Внутри облака образуется электрическое поле с напряженностью $E_{об}$ между распределенными разнополярными зарядами. Нижняя часть индуцирует на поверхности земли положительный заряд с плотностью $\delta+$ и появляется местное грозовое электрическое поле с напряженностью $E_г$, достигающей иногда 100-200 кВ/м.

Разряд облака на землю (рис. 8.2) имеет вид линейной молнии и начинается в большинстве случаев при высокой концентрации в нем зарядов и напряженности $E_г$=20-30 кВ/см у его выступающих частей. Этому благоприятствует меньшая плотность воздуха вокруг облака, чем плотность у земли.

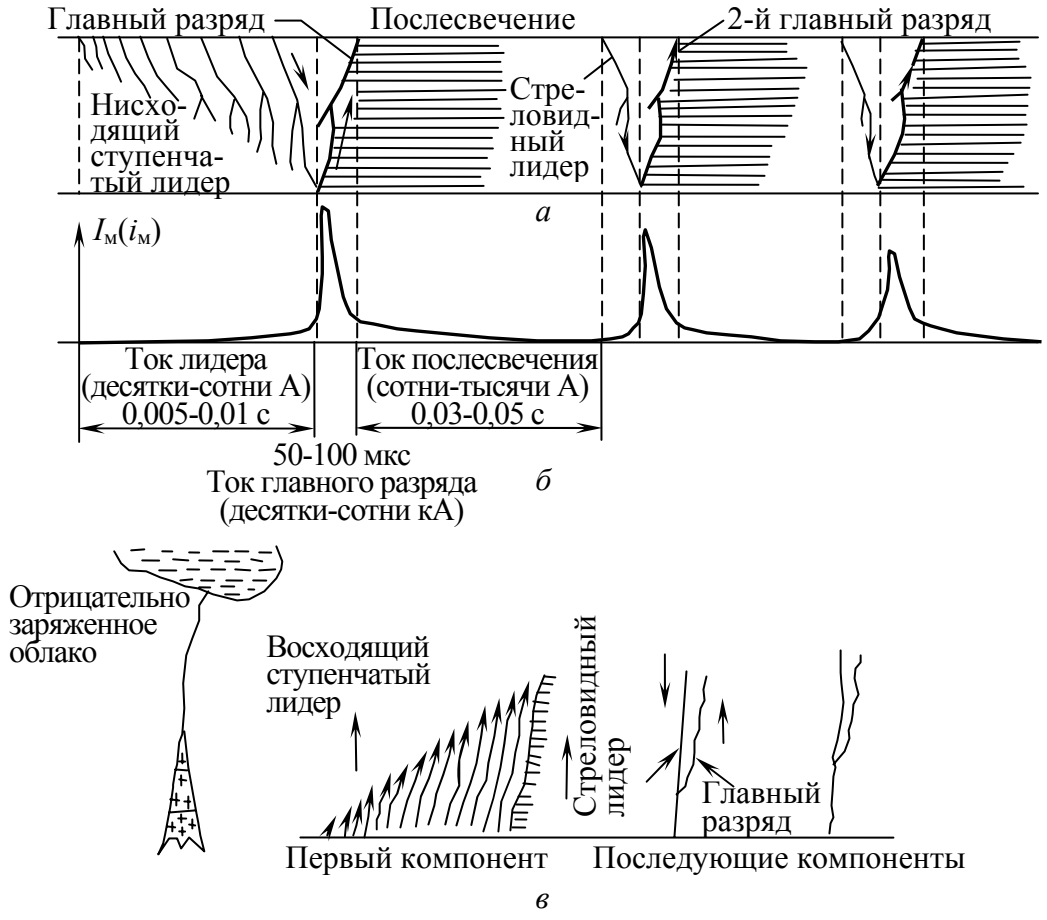


Рис. 8.2. Разряд облака на землю:
а – оптическая осциллограмма (запись на движущейся слева направо фотопленке); *б* – кривая тока молнии; *в* – оптическая картина восходящего разряда молнии в вершину высокой башни

Исследованиями в России и за рубежом выявлены условия возникновения молнии и ее характеристики. Для равнинных районов делают различие между разрядами молнии непосредственно в землю или в объекты высотой до 100 м и разрядами в высотные здания и сооружения: радио и телевизионные мачты, заводские трубы. В первом случае характерны *нисходящие*, а во втором – *восходящие* разряды (молнии).

Нисходящий разряд между облаком и землей разделяется на *лидерный* и *главный*. Он обычно начинается с прорастания от облака к земле слабосветящегося канала – *ступенчатого* лидера (см. рис. 8.2), движущегося прерывисто (ступенями). Длина каждой ступени около 50 м, средняя скорость ее распространения составляет (2-5) 10^5 м/с. В большинстве случаев (до 90 %) заряд облака и нисходящий ступенчатый лидер имеют отрицательную полярность. Вокруг него образуется значительная ионизированная область воздуха, созданная электрическим полем. После прорастания каждой ступени наступает пауза от 30 до 100 мкс. Общее время продвижения лидера составляет 0,005-0,01 с, средняя скорость этого процесса (1-2) 10^5 м/с. Приближение его к земле обусловливает возрастание электрической напряженности на его головке, канал лидера заполняется отрицательным зарядом с линейной плотностью δ-. Возрастает и плотность индуцированных зарядов δ+ на земле или на ближайших объектах. Ток в лидере нарастает постепенно (см. рис. 8.2, *б*) и редко превышает сотни ампер.

По мере приближения ступенчатого лидера к земле напряженность электрического поля на вершине возвышающегося заземленного объекта увеличивается и может превысить критическую. С объекта начинает развиваться *встречный лидер*, а ступенчатый при этом может изменить направление, отклоняясь к развивающемуся от объекта встречному и соединяясь с ним.

Длина встречного лидера обычно незначительна и для большинства случаев не превышает 20-30 м. С увеличением высоты объекта от 20 до 200 м длина его канала возрастает приблизительно от 20-30 до 50-85 м, поэтому встречный лидер имеет важное значение в развитии молнии. Он формирует завершающий участок траектории и в значительной степени предопределяет место поражения. Когда головка ступенчатого лидера соприкоснется с землей или встречным лидером, возникает главный разряд (см. рис. 8.2, *а*). Он связан с нейтрализацией отрицательных зарядов лидера положительными зарядами земли и напоминает короткое замыкание. Можно рассматривать это явление и как освобождение лидера от отрицательных зарядов. Такой процесс направлен снизу вверх и протекает весьма быстро (за 50÷100 мкс). Наиболее вероятная скорость развития главного разряда равна 1/3 скорости света, но изменяется в больших пределах. Главный разряд сопровождается очень интенсивным свечением канала,

уменьшающимся при приближении к облаку, а также мощным звуковым эффектом (громом). Ток главного разряда (см. рис. 8.2, *б*) достигает большой величины (десятки и сотни кА за 50-100 мкс) и способен разогреть канал до температуры более 30 000 °С. Вокруг него образуется ионизированная область, исчезающая после окончания главного разряда через 0,03-0,05 с. Затем образуется ток после свечения величиной от 10 до 1000 А. Длительный ток в этой финальной стадии молнии является одной из основных причин ее термического воздействия. Три перечисленные стадии (лидерная, главная и финальная) составляют первую компоненту нисходящей отрицательной молнии. Как правило, за ней может следовать несколько так называемых последующих компонент. При этом вместо ступенчатого лидера появляется по тому же пути *стреловидный лидер* (см. рис. 8.2, *а*), развивающийся от прежнего места в грозовом облаке до земли или объектов на земле.

Последующие компоненты молнии протекают быстрее, но их ток значительнее меньше, чем в первой. По зарубежным данным, в 50 % случаев среднее число компонент на один разряд молнии составляет 2-3, а в 45 % - одну. Изредка наблюдаются молнии со значительно большим числом компонент. Общая продолжительность многокомпонентной нисходящей молнии достигает 0,2-0,3 с (50 % случаев), но наблюдалась и длительность ее до 1-1,5 с. Заряд, переносимый в течение всей вспышки молнии, колеблется от единиц до сотен кулонов, из которых на долю отдельных импульсов приходится 5-15, а на непрерывную составляющую 10-20 Кл. Им и пополняется общий заряд земли. Отрицательная молния изучена более полно, ее параметры известны с большей достоверностью, так как данные о нисходящих молниях накапливались продолжительное время в разных районах земного шара.

При разрядах в объекты значительной высоты (сотни метров) обнаруживаются существенные различия первого импульса и завершающего разряда. В этом случае разряд начинается с прорастания восходящего лидера от вершин заземленных сооружений (см. рис. 8.2, *в*). Развивающийся вверх от объекта, он может и не иметь явной ступенчатой структуры, но главный разряд и в этом случае развивается от объекта к облаку (т.е. его направление совпадает с направлением распространения лидера) и получается слабым, что объясняется медленным перераспределением малоподвижных зарядов в облаке и неспособностью его быстро обеспечить высокую концентрацию их для компенсации зарядов очень длинного лидера. Чем выше объект, тем меньше ток главного разряда при одной и той же вероятности его появления. Но особенность состоит не в меньших токах, а в том, что высокие объекты будут чаще поражаться прямыми ударами. При исследованиях наблюдалось быстрое возрастание количества восходящих разрядов с увеличением высоты объекта h_x (при $h_x \geq 150$ м оно составляло 24 %,

а при $h_x \geq 380$ м – 96 %). В горах соотношение между восходящими и нисходящими разрядами изменяется в сторону увеличения первых. Лидер последующих компонент восходящих молний всегда продвигается по направлению к земле, поэтому их структура не отличается от структуры последующих компонент нисходящей молнии. Сведения о восходящих молниях появились лишь в последние десятилетия, когда начались систематические наблюдения за грозопоражаемостью очень высоких сооружений, например Останкинской телевизионной башни.

Наибольшую опасность представляет нисходящая отрицательная молния между облаком и землей (объектом) в виде *линейной молнии*, с которой связано подавляющее большинство пожаров и повреждений зданий, сооружений, линий электропередач, подстанций.

Таким образом, для молниезащиты представляет интерес только линейная, а не шаровая молния как редкое явление. Электрическими характеристиками молнии являются амплитуда тока $I_м$ (наибольшее значение тока главного разряда первой компоненты), крутизна тока α, длина фронта волны тока $\tau_ф$ и длина волны тока $\tau_в$ (рис. 8.3). Они важны при расчете различных воздействий молнии.

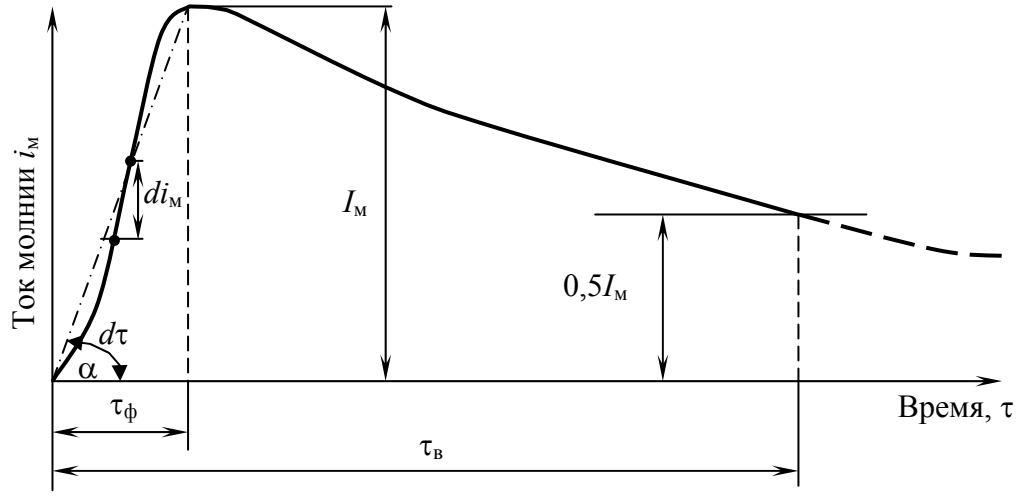


Рис. 8.3. Изменение тока молнии $i_м$ во времени τ

Амплитуда $I_м$ изменяется в очень широких пределах, достигая иногда 230-250 кА. Чем больше амплитуда, тем меньше вероятность ее появления. Оценка этой зависимости дается кривой на рис. 8.4. Видно, что амплитуда в 100 кА и выше возникает очень редко и составляет около 2 % общего числа разрядов. Наиболее часты амплитуды более 30 кА. Они появляются примерно в 50 % случаев. Расчетной величиной считают $I_м = 100$ кА, а в районах с малой грозовой деятельностью допустимо принимать 50 кА.

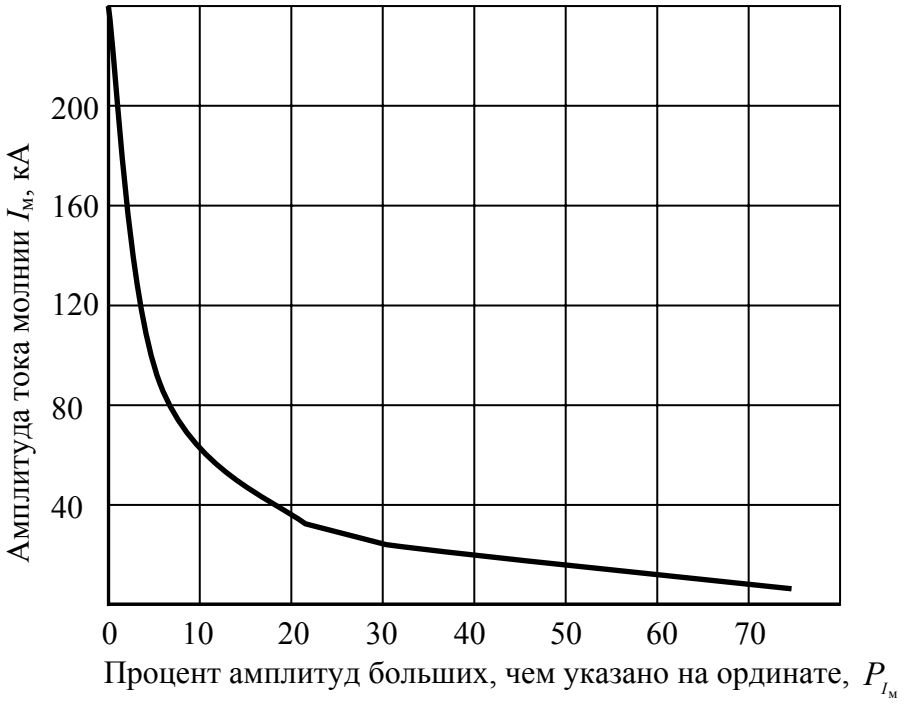


Рис. 8.4. Кривая вероятности амплитуд токов молнии (для высот над уровнем моря менее 500 м)

Вероятность P_1 может быть определена и по простой формуле

$$\lg P_1 = - I_м/60, \qquad (8.1)$$

которая пригодна для хорошо заземленных объектов. При ударе молнии в трос, провод или в плохо проводящую почву вероятность уменьшается. С увеличением высоты местности кривая вероятности идет ниже. Для горных районов $I_м$ при одной и той же вероятности уменьшается вдвое ввиду малой интенсивности главного разряда. Играет роль и высокое удельное сопротивление почвы в горах (скалы, снег).

Крутизна $\alpha = di_м/d\tau$ характеризует скорость нарастания тока, т.е. отношение приращения тока $\Delta i_м$ к очень малому промежутку времени Δt, и является переменной величиной. Она меньше в начале и в конце восходящей ветви тока, на которой происходит быстрое его изменение, и велика в ее середине. Величина α всегда превышает 5 кА/мкс и может достигать 80 кА/мкс. Средняя крутизна $\alpha = I_м/\tau_ф$ и пропорциональна $\mathrm{tg}\alpha$ (α - угол наклона штрихпунктирной кривой к оси времени) на рис. 8.3. Максимальная расчетная крутизна принимается равной 50 кА/мкс. На ниспадающей ветви кривой ток изменяется медленней, его крутизна гораздо меньше и ее во внимание не принимают.

Вероятность появления тока молнии с крутизной α или более определяется по формуле

$$\lg P_\alpha = - \alpha/36. \qquad (8.2)$$

Крутизна важна для расчета индуктивного падения напряжения в проводниках цепи тока молнии. Она определяет в основном и наведенные ЭДС, и разности потенциалов в тех контурах, на которые молния прямо не воздействует (провода электрической сети, антенны, трубопроводы). Крутизна при высоких объектах принимается такой же, как и для объектов высотой менее 30 м. Для горных районов (высота над уровнем моря более 700 м) при той же вероятности крутизна уменьшается вдвое. Общая вероятность одновременного появления тока молнии с амплитудой $I_м$ и более, с крутизной α и выше оценивается по аналогичной формуле

$$\lg P_{1,\alpha} = [(I_м/60)+(\alpha/36)]. \qquad (8.3)$$

На практике замечено сравнительно слабое увеличение крутизны при возрастании амплитуды тока молнии.

Длиной фронта $\tau_ф$ называют время от начала до конца нарастания тока молнии. На этом участке изменение тока наиболее интенсивное. Величина $\tau_ф$ первых компонент составляет 1,5–10 мкс. Чем больше амплитуда, тем обычно больше и $\tau_ф$. Для последующих компонент длина фронта волны меньше примерно в 2,5 раза. За расчетную величину рекомендуется принимать $\tau_ф = 1{,}5$ мкс.

Длиной волны принято считать время $\tau_в$, протекающее от начала до того момента, когда $i_м = 0{,}5I_м$ и изменяется от 20 до 100 мкс. Расчетной величиной принимают $\tau_ф = 50$ мкс.

Иногда кривую тока молнии идеализируют. Если интересуются процессами на фронте, то считают, что после $t = \tau_ф$ ток не изменяется и остается равным $I_м$. Наоборот, для анализа воздействия на ниспадающей ветви, например теплового воздействия, пренебрегают фронтом и полагают, что ток сразу достигает значения $I_м$ и затем медленно спадает по закону $i_м = I_м e^{-1/T}$, где T – некоторая постоянная величина.

8.2. ПОЖАРО- И ВЗРЫВООПАСНОСТЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЛНИИ

Воздействие молнии может быть двояким. Во-первых, оно может поражать здания и установки непосредственно, что называется *прямым ударом*, или *первичным воздействием*. Прямой удар молнии характеризуется непосредственным контактом канала молнии со зданием или сооружением и сопровождается протеканием через него тока молнии. Во-вторых, она может оказывать *вторичные воздействия*, объясняемые электростатической и электромагнитной индукцией, а также заносом высоких потенциалов через надземные и подземные металлические коммуникации, что является следствием прямого удара молнии. Вторичные воздействия создают опасность искрения внутри защищаемого объекта.

Воздействия прямого удара молнии

Прямой удар молнии обуславливает следующие воздействия на объекты: *термические*, *механические* и *электрические*. Все эти воздействия могут быть причинами пожаров, взрывов, механических разрушений, перенапряжения на пораженных элементах объекта, проводах и кабелях электрических сетей, поражения людей.

Термические воздействия связаны с резким выделением теплоты при прямом контакте канала молнии с содержимым пораженного объекта и при протекании через объект тока молнии. Канал молнии имеет высокую температуру (30 000°С и выше) и запас тепловой энергии. Выделяемая в канале молнии энергия определяется переносимым зарядом, длительностью протекания и амплитудой тока молнии. В 95 % случаев разрядов молнии эта энергия (в расчете на сопротивление 1 Ом) превышает 5,5 Дж [2], что на несколько порядков превышает минимальную энергию воспламенения газо-, паро- и пылевоздушных смесей. При этом вероятность воспламенения горючей среды зависит не только и не столько от амплитуды тока, сколько от величины и времени протекания длительного тока молнии в ее финальной стадии (ток 100-500 А, время 1-1,5 с).

Особую опасность прямой удар молнии представляет для зданий и наружных установок, где по условиям технологического процесса может образоваться взрывоопасная среда, что встречается редко; чаще она образуется при нарушении технологических процессов, авариях оборудования, вентиляции.

Опасность поражения прямым ударом молнии некоторых наружных взрывоопасных установок связана с проплавлением молнией металлических поверхностей, перегревом их внутренних стенок или воспламенением взрывоопасных смесей паров и газов, выделяющихся через дыхательные и предохранительные клапаны, газоотводные трубы, свечи. Сюда относятся металлические и железобетонные резервуары со сжиженными горючими газами, многие аппараты наружных технологических установок нефтеперерабатывающих, химических и других объектов.

Тепловые процессы в месте контакта молнии с металлом весьма сложны и плохо поддаются расчету. При упрощении модели этого явления можно предположить, что процесс тепловыделения в зоне контакта аналогичен стационарной электрической дуге. Доказано, что проплавление (прожог) металла установок током молнии возможно лишь при его толщине не более 4 мм.

В работе [31] указывается, что площадь прожога S, мм^2, слабо зависит от материала стенки, а определяется в основном ее толщиной δ, мм, и протекшим зарядом $q_м$, Кл. Экспериментальные данные удовлетворительно интерполируются следующими соотношениями для меди, железа, стали и алюминия:

при 0 мм < δ ≤ 0,9 мм

$$S = 25{,}3\delta^{-0{,}9} q_{\text{м}}; \tag{8.4}$$

при 0,9 мм < δ ≤ 3,8 мм

$$S = 24{,}5\delta^{-1{,}54} q_{\text{м}}. \tag{8.5}$$

Проплавление током молнии металлических поверхностей может привести к взрыву и разрушениям, если внутри установки содержится взрывоопасная концентрация горючих газов и паров, поэтому с учетом коррозии за минимальную толщину металла, способную сохранить герметичность установки (при отсутствии высоких давлений), принимают 5 мм. Необходимо учитывать, что внутренняя часть стенки установки, где содержится продукт, в месте удара молнии приобретает повышенную температуру, которая может оказаться критической для него и вызвать взрыв. Для объяснения этого явления можно воспользоваться теорией воспламенения горючих смесей от действия накаленных тел.

Пораженный участок стенки установки (рис. 8.5) примем за накаленное тело с температурой T_1. Если среда, соприкасающаяся с ним, инертна, то распределение температуры в ней изобразится кривой T_1A_1 (см.рис. 8.5). Если же среда представляет собой горючую смесь, то в силу дополнительного выделения тепла распределение температур в ней изобразится пунктирной линией T_1A_1'. Повышение начальной температуры стенки до T_2 приведет к тому, что в инертной среде ее распределение будет подобно прежнему, но с более резким снижением (кривая T_2A_2). В горючей же смеси, где с повышением температуры увеличивается выделение теплоты, распределение температуры снижается значительно медленней, чем T_2A_2. При определенном значении T_2 понижения температуры в горючей среде (вблизи накаленного участка стенки) не произойдет, а ее распределение изобразится пунктирной линией T_2A_2', т.е. температура горючей смеси за счет выделения тепла реакции поддерживается равной температуре накаленного участка стенки, который больше не участвует в процессе нагрева смеси.

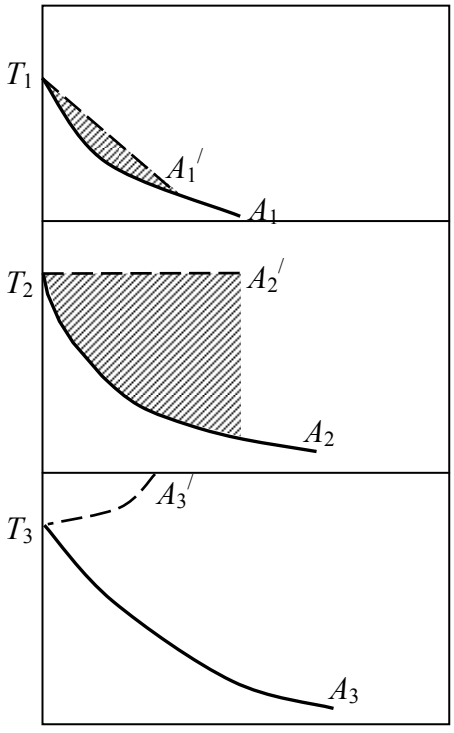


Рис. 8.5. Схема зажигания накаленным телом

При повышении температуры стенки до T_3 на некотором удалении от нее температура горючей смеси будет расти до тех пор, пока не возникнет горение. Такое изменение температуры изобразится кривой T_3A_3' (см. рис. 8.5).

Таким образом, температура накаленного участка стенки T_2 является предельной, так как при ней количество теплоты, выделяемое реакцией, равняется отводимому. Если немного повысить температуру участков стенки (до T_3), то скорость выделения теплоты превысит скорость теплоотвода, и смесь получит возможность разогреваться до воспламенения, следовательно, T_3 – температура самовоспламенения. В случае возникновения горения от действия местного источника критическая температура должна превышать температуру самовоспламенения (например, T_3), при этом чем меньше размеры накаленного участка стенки, тем выше критическая температура.

Были проведены опыты по выявлению влияния размеров шарика, рассматриваемого в качестве источника зажигания, на температуру самовоспламенения горючей смеси. Результаты опытов показали (рис. 8.6), что меньшему диаметру шарика соответствует большая температура самовоспламенения газовой смеси (светильного газа с воздухом). Диаметр накаленного участка в месте прямого удара молнии можно принять равным 10 см.

При воспламенении горючей смеси в аппарате, пораженном молнией, необходимо учитывать и то, что горючие смеси имеют *период индукции* или время запаздывания самовоспламенения. Воспламенения не произойдет, если указанный период окажется больше времени охлаждения накаленного участка стенки аппарата до величины ниже температуры самовоспламенения. Если же он меньше времени охлаждения этого участка, то горючая смесь воспламенится.

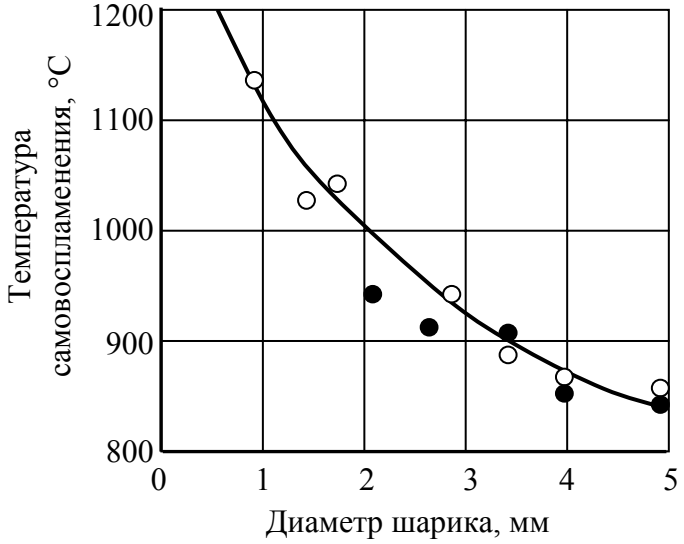


Рис. 8.6. Зависимость температуры самовоспламенения от диаметра шарика

Опытами установлено, что время нагрева и охлаждения пораженного молнией места в стальном листе от 0,1 до 10 с. Максимум температуры возникает через 1-2 с от начала удара молнии и уменьшается пропорционально толщине листа. Период же индукции у ряда веществ может быть меньше интервала между возникновением максимума температуры и охлаждением поражаемого участка стенки. У метановоздушных смесей в зависимости от процентного содержания метана (6-10 %) и температуры нагрева смесей (775-875 °С) период индукции колеблется от 0,35 до 1,23 с. У водородовоздушных смесей при концентрациях водорода от 27,8 до 34 % период индукции составляет 3 мс, а у ацетиленовоздушных смесей (концентрация ацетилена 10-18 %) – 4 – 14 мс. У пыли битуминозного угля он составляет примерно 4 мс, а у алюминиевой пыли практически отсутствует. Из приведенных примеров видно, что установки с водородом или ацетиленом более опасны, чем с метаном. Также опасны сооружения с алюминиевой пылью.

Представленная на рис. 8.7 кривая $t_{макс} = f(\delta)$ позволяет выбрать допустимую толщину металла для наружных взрывоопасных установок. Там, где допустимо повышение температуры внутренней стенки до 800-1200 °С (с учетом всех свойств среды) и нет высоких давлений, можно ограничиться толщиной стенки в 4-5 мм. В установках, содержащих газ или жидкость под давлением, толщина должна быть 5,5-6 мм, в противном случае силой давления разогретый металл разорвется или вспучится, что может привести к пожару или взрыву.

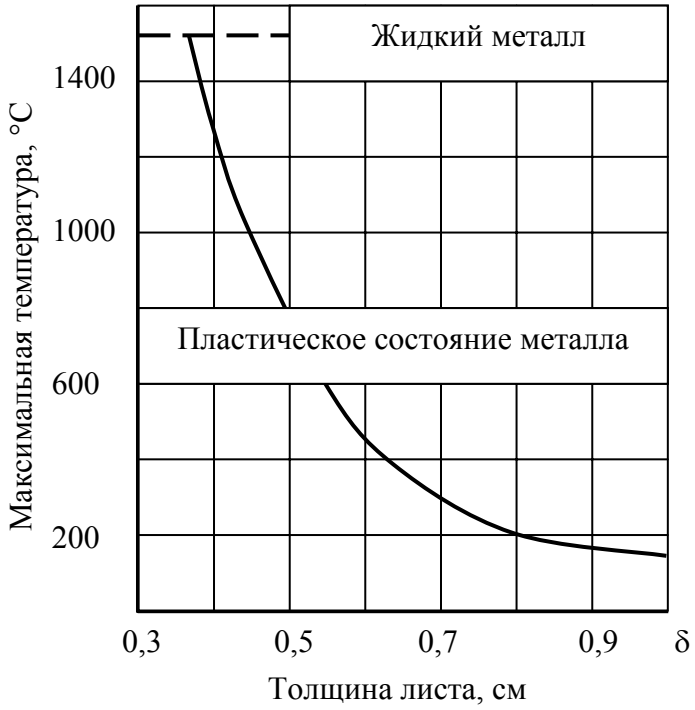


Рис. 8.7. Зависимость температуры от толщины листа

Таким образом, при решении вопроса об использовании взрывоопасных наружных технологических установок в качестве естественных молниеприёмников в каждом отдельном случае необходим тщательный анализ приведенных выше условий. В сомнительных случаях (установки находятся под избыточным давлением) для исключения непосредственного контакта канала молнии с установкой на последней сооружают специальный молниеприёмник. Такие молниеприёмники необходимы и в том случае, если на установках имеются дыхательные клапаны, газоотводные трубы, свечи. При этом молниеприёмники располагают так, чтобы контакт канала молнии с ними происходил вне взрывоопасной зоны распространения взрывоопасных смесей. Те же условия нужно соблюдать и при установке молниеотводов для защиты взрывоопасных зданий с устройствами для выделения горючих смесей, способных к воспламенению при контакте с каналом молнии. Большинство промышленных зданий и наружных установок представляет сложную сеть металлических конструкций, трубопроводов и т.д., по которым в момент прямого удара растекается ток молнии. При отсутствии контакта между отдельными конструкциями в местах сближения металлических частей может возникнуть мощная искра – источник воспламенения горючей среды.

Пожар или взрыв от прямого удара молнии может произойти и при наличии молниезащиты, если токоотводы имеют значительную протяженность и не предприняты меры по выравниванию потенциалов между ними и металлическими конструкциями здания или технологического оборудования. В противном случае между токоотводом и элементами здания, сохраняющими потенциал, близкий к потенциалу земли, возникает искра – источник взрыва или пожара. К пожару может привести также нарушение целостности токоотвода, проложенного по мягкой кровле или сгораемому утеплителю здания, и тогда в месте разрыва возникает мощная искра.

Пожаро- и взрывоопасность атмосферного электричества может быть обусловлена не только прямым ударом молнии, но и встречными (незавершенными) восходящими лидерами (размер канала составляет несколько десятков сантиметров), температура канала которых может достигать 2 000 – 7 000 К. Развивающиеся, например, от газоотводных и дыхательных труб, они даже при отсутствии разряда молнии могут вызвать воспламенение взрывоопасных смесей паров и газов, сбрасываемых в атмосферу. Такие случаи наблюдаются на нефтехимических предприятиях. Однако каких-либо нормативных мер защиты от указанных явлений не предусмотрено. Вероятность воспламенения сбрасываемых горючих смесей можно снизить примерно в 100 раз, если на устройствах по сбросу укрепить сетку-сферу (электростатический купол) с радиусом 1 м.

Отсутствуют нормативные рекомендации о необходимости учитывать при молниезащите дымовых труб не только ее высоту, но часть высоты струи выбрасываемого дыма. Высоту струи дыма над трубой следует принимать до точки, в которой температура горячих газов будет не более 100 °С. Следовательно, защитный уровень трубы будет равным $h_x = h_{тр} + h_{стр}$.

Термическое воздействие токов молнии на проводники вызывает не только их нагрев, но и оплавление. При этом может выделиться такое количество теплоты, которое при недостаточном сечении металла расплавит его или даже испарит. В местах разрыва проводников или плохого электрического контакта обычно появляется искра. При расчете минимальных сечений исходят из условия, что вся тепловая энергия, выделяемая током молнии, идет на нагрев металла токоотвода. Потерей теплоты в окружающую среду из-за кратковременности этого процесса пренебрегают.

Расчетами определено, что минимальное сечение стальных токоотводов, исключающее расплавление, составляет 16 мм^2, а медленных – 6 мм^2. С учетом коррозии металлов их минимальные сечения следует увеличить. В практике имелись случаи, когда от действия молнии токоотводы распадались на куски длиной в несколько сантиметров, что объясняется не только тепловыми, но и электродинамическими усилиями, возникающими в проводниках. В целях повышения механической прочности и увеличения срока службы рекомендуется применять токоотводы сечением не менее 29 мм^2 из круглой стали и 16 мм^2 из меди.

Механические воздействия токов молнии обусловливаются ударной волной, распространяющейся от канала молнии, и электродинамическими силами, действующими на проводники с токами молнии. Это воздействие может быть причиной, например, сплющивания тонких металлических трубок и схлестывания проводников. При поражении молнией сооружений из твердого негорючего материала (камня, кирпича, бетона) наблюдаются местные разрушения как результат динамического действия. Наиболее серьезные из них связаны с электрогидравлическими эффектами при разряде молнии. Если между пораженным участком объекта и землей нет токопроводящих путей, его потенциал по отношению к земле достигает высоких значений и возникает пробой (разряд) по пути наименьшей электрической прочности.

Ток молнии, устремляясь в узкие каналы пробоя, вызывает резкое повышение температуры и испарение (взрыв) в них материала. При этом давление достигает значительных величин, что приводит к взрыву (расщеплению) токонепроводящих частей объекта, например расщепление деревянных сооружений и деревьев, разрушение незащищенных кирпичных дымовых труб, башен. При этом степень разрушения определяется не столько током молнии, сколько содержанием влаги или газогенерирующей

способностью пораженного материала. Известны случаи частичного или даже полного разрушения бетонных и железобетонных сооружений. Это можно объяснить плохими контактами в местах соединений стальной арматуры. При надежных контактах арматура железобетонных сооружений может служить хорошим токоотводом для молнии, так как имеет большое общее сечение, исключающее опасные повышения температуры.

Электрические воздействия молнии связаны с поражением людей или животных электрическим током и появлением перенапряжений на пораженных элементах объекта. Перенапряжение пропорционально амплитуде и крутизне тока молнии, индуктивности конструкций и сопротивлению заземлителей, по которым ток молнии отводится в землю. Даже при выполнении молниезащиты прямые удары молнии с большими токами и крутизной могут привести к перенапряжениям в несколько мегавольт.

При отсутствии молниезащиты пути растекания тока молнии становятся неконтролируемыми и это может увеличить опасность поражения током людей, опасные напряжения шага и прикосновения, а также перекрытия на другие объекты.

Поэтому опасно укрываться во время грозы под деревьями, особенно высокими или стоящими отдельно, находиться вблизи металлических труб, мачт, молниеотводов, заземлителей и т.п.

Вторичные воздействия молнии

Под вторичными воздействиями молнии подразумеваются явления во время близких разрядов молнии, сопровождающиеся появлением разностей потенциалов на конструкциях, трубопроводах и проводах внутри помещений и сооружений, не подвергающихся непосредственному прямому удару. Они возникают в результате электростатической и электромагнитной индукции. К ним можно отнести также появление разностей потенциалов внутри помещений вследствие заноса высоких потенциалов через надземные и подземные металлические коммуникации (трубопроводы, кабели, воздушные линии).

Электростатическая индукция. Накопление в грозовом облаке и частичное перемещение зарядов в формирующийся канал молнии в ее начальной стадии вызывает скопление связанных зарядов противоположного знака на поверхности земли и наземных объектов. Развитие этих процессов происходит относительно медленно, поэтому перемещение зарядов не вызывает внутри наземных объектов заметных разностей потенциалов, несмотря на высокие сопротивления утечки. В стадии главного разряда освобождение связанных зарядов происходит настолько быстро, что могут возникнуть существенные разности потенциалов между металлическими конструкциями и землей, вызванные протеканием токов через большие сопро-

тивления утечки. Разности потенциалов даже при ударах молнии на расстоянии 100 м от здания могут достигать десятков и сотен киловольт и вызывать искры в воздушных промежутках. Несмотря на малую энергию, искры могут быть причиной взрывов в помещениях со взрывоопасными концентрациями горючих смесей газов, паров и пылей.

На таких устройствах, как провода воздушных линий (электрических линий связи), освободившиеся заряды распространяются в виде волн и создают напряжения по отношению к земле в десятки и сотни киловольт, способные вызывать в них мощные искровые разряды.

Электромагнитная индукция. Разряд молнии сопровождается появлением в пространстве быстро изменяющегося во времени магнитного поля, индуцирующего ЭДС, способную вызвать искрообразование в контурах из различных протяженных металлических предметов (трубопроводов, воздуховодов, проводов, кабелей). При полностью замкнутом контуре индуцированная ЭДС вызовет электрический ток и небольшое нагревание его элементов, не представляющее, как правило, какой-либо опасности.

Контуры могут быть незамкнутыми или иметь плохие контакты в местах соединений (во фланцах трубопроводов), где ЭДС и может вызвать искрение. Величина электродвижущей силы электромагнитной индукции зависит от параметров тока молнии, размера и конфигурации контура и их взаимного расположения. При расположении канала молнии и контура, как показано на рис. 8.8, напряжение в вольтах на разомкнутых концах контура может быть определено по формуле

$$U_к = M(di_м/d\tau) = M(I_м/\tau_ф), \qquad (8.6)$$

где $M = 2c \ln[(a+b)/c]10^{-9}$ – коэффициент взаимоиндукции между каналом молнии и контуром, Гн (a – расстояние от канала молнии до контура, см; b и c – размеры контура, см).

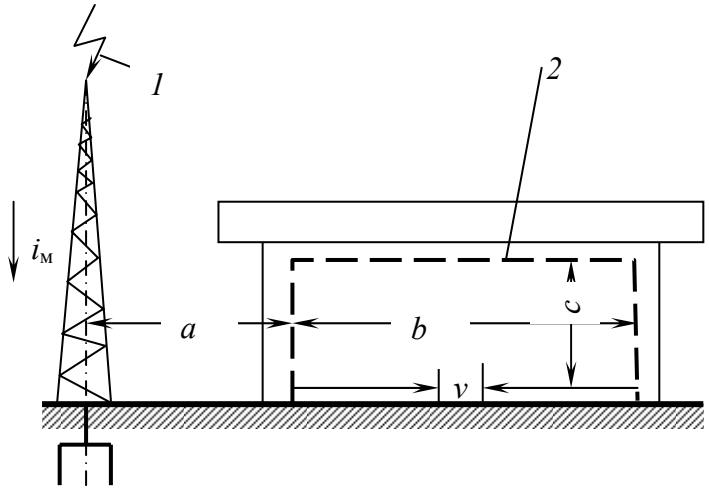


Рис. 8.8. Положение канала молнии и контура для расчета индуцированных напряжений:
1 – канал молнии; *2* - контур

Значительное число пожаров нефтяных цистерн, резервуаров и складских емкостей обусловлено вторичным (индуцированным) воздействием, а не прямым ударом молнии. Пожары являются результатом искр, генерированных в емкостях с горючими паровоздушными смесями. Для оценки пожаро- и взрывоопасности вторичных воздействий молнии были проведены исследования воспламеняющей способности электрических искр, обусловливаемых электромагнитной индукцией и нагревом мест плохих контактов [3]. Исследования проводились в полевых и лабораторных условиях.

В лабораторных условиях, используя генератор импульсных токов (ГИТ), исследовали величины энергии, рассеиваемой в искрах, возникающих в искровом промежутке вторичного контура, а также характер искрений и нагрев во фланцевых соединениях трубопроводов при протекании по ним импульсных токов.

Сравнение величин этой энергии с минимальной энергией электрических искр, достаточной для воспламенения более 50 различных паро-, газо- и пылевоздушных смесей, показало, что последняя в 5,6 – 14 раз превышает величины минимальной, достаточной для воспламенения даже трудновоспламеняемых пылевоздушных взрывоопасных смесей. Если взять только паро- и газовоздушные смеси, то превышение будет в 10^2-10^5 раз, причем оно должно быть еще больше, поскольку параметры разряда молнии значительно превышают те, которые имитировались в разрядах ГИТ. Необходимо учитывать и увеличенные размеры токопроводящих контуров на промышленных объектах по сравнению с экспериментальными.

Для исследования нагрева и искрообразований во фланцевых соединениях токопроводящих контуров при протекании по ним токов молнии или тока, обусловливаемого ЭДС индукции, были проведены два вида опытов как на чистых соединениях, так и с сильной коррозией [3].

Исследованиями установлено, что ни в одном из рассмотренных случаев какого-либо нагрева фланцевого соединения не наблюдалось, поэтому напрашивается вывод, что как чистые, так и корродированные фланцевые соединения (с точки зрения возможности их нагрева) для взрывоопасных сред никакой опасности не представляют.

Исследование искрообразований проводили на тех фланцевых соединениях, при тех же параметрах разрядного тока ГИТ, что и при опытах нагрева. Опыты с чистым фланцевым соединением на трех, четырех и пяти болтах выявили отсутствие искрений при протекании по нему тока даже с амплитудой 48,2 кА. При одном или двух болтах возникает сильное искрение как из-под шайб соединительных болтов, так и по периметру между фланцами.

Опыты с ржавыми фланцевыми соединениями показали, что в этом случае даже при четырех болтах диаметром 8 мм искрение из-под шайб

наблюдается при значительно более низкой амплитуде тока (10,7 кА). При больших величинах тока искрение происходило также и между фланцами. Таким образом, корродированные фланцевые соединения (с точки зрения искрообразования) представляют большую опасность, поэтому в зданиях со взрывоопасной и одновременно химически активной средой, где надлежащий контакт с допустимой величиной переходного сопротивления (0,03 Ом) не может быть обеспечен, необходима установка перемычек из стальной проволоки или шунтирующих устройств.

Заносы высоких потенциалов в здания возможны по рельсовым путям, эстакадам, подземным трубопроводам, кабелям и другим протяженным металлическим коммуникациям и могут сопровождаться мощными электрическими разрядами не только при прямом ударе молнии, но и в том случае, когда эти коммуникации расположены вблизи элементов молниеотводов. Значительное повышение потенциала на молниеотводе при прямом ударе молнии может вызвать перекрытие изоляции по воздуху, земле или дереву на части указанных коммуникаций. Искрообразование внутри взрывоопасных зданий, обусловливаемое заносом высокого потенциала по коммуникациям, является источником взрыва и представляет серьезную опасность для людей.

8.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПО УСТРОЙСТВУ МОЛНИЕЗАЩИТЫ

Категории молниезащиты

Тяжесть опасных последствий прямого удара молнии при ее термических, механических и электрических воздействиях, а также искрениях и перекрытиях, вызванных другими видами воздействий, зависит от конструктивно-планировочных особенностей зданий и сооружений и пожаровзрывоопасности технологического процесса. Например, в производствах, постоянно связанных с наличием открытого пламени, при применении несгораемых материалов и конструкций протекание тока молнии не представляет большой опасности. Однако наличие внутри объекта взрывоопасной или пожароопасной среды создает угрозу пожара, разрушений, человеческих жертв, больших материальных убытков.

При таком разнообразии конструктивных и технологических условий предъявлять одинаковые требования к молниезащите всех объектов означало бы или предусматривать чрезмерные излишества, или мириться с неизбежностью значительных убытков, вызванных последствиями поражения молнией. Поэтому в инструкции [2] принят дифференцированный подход к устройству молниезащиты различных объектов, в связи с чем – по устройству молниезащиты здания и сооружения разделены на три категории, отличающиеся по тяжести возможных последствий поражения молнией.

I категория – здания и сооружения или их части с взрывоопасными зонами классов В-I и В-II по Правилам устройства электроустановок (ПУЭ-86). В них хранятся или содержатся постоянно, либо появляются во время производственного процесса смеси газов, паров или пыли горючих веществ с воздухом или иными окислителями, способные взорваться от электрической искры.

II категория – здания и сооружения или их части, в которых имеются взрывоопасные зоны классов В-Iа, В-Iб, В-IIа согласно ПУЭ. В них взрывоопасные смеси могут появляться лишь при аварии или неисправностях в технологическом процессе. К этой категории принадлежат также наружные технологические установки и склады, содержащие взрывоопасные газы и пары, горючие и легковоспламеняющиеся жидкости (газгольдеры, цистерны и резервуары, сливно-наливные эстакады), отнесенные по ПУЭ к взрывоопасным зонам класса В-Iг.

III категория – несколько вариантов зданий, в том числе: здания и сооружения с пожароопасными зонами классов П-I, П-II и П-IIа согласно ПУЭ; наружные технологические установки, открытые склады горючих веществ, где применяются или хранятся горючие жидкости с температурой вспышки паров выше 61 °С или твердые горючие вещества, отнесенные по ПУЭ к зоне класса П-III.

Обязательность устройства молниезащиты

При выборе категории устройств молниезащиты учитывают важность объекта, его высоту, расположение соседних объектов, интенсивность грозовой деятельности и другие факторы. Интенсивность грозовой деятельности характеризуется средним количеством грозовых часов в год $n_ч$. Эта величина может быть получена по данным местной метеорологической станции. Кроме того, существует карта [2], на которой нанесены линии средней за год продолжительности гроз на территории России. На ней же приближенно размечены и крупные области, где наблюдается одна и та же грозовая деятельность. Диапазон ее изменения довольно велик и зависит от климатических факторов и рельефа местности. В северных областях (Мурманск, Камчатка) она составляет не более 10 ч в год, для районов на широте 50-55° она колеблется от 20 до 30 ч, а на юге (Кавказ, Донбас) она может достигать 100-200 ч в год. Да и в пределах одного района с низкой грозовой активностью встречаются участки с резко повышенным числом грозовых часов в год.

Иногда оценка грозовой деятельности измеряется количеством грозовых дней в году $n_д$. Принято считать продолжительность грозы приблизительно равной 1,5 ч, если $n_д = 30$ дням, и 2 ч, когда $n_д$ больше 30 дней. Следовательно, $n_ч = (1{,}5\text{-}2)\, n_д$.

Однако более важной и информативной характеристикой для оценки возможного числа поражений объектов молнией является плотность ударов нисходящих молний на единицу земной поверхности.

Плотность ударов молнии в землю сильно колеблется по регионам земного шара и зависит от тех же факторов, что и интенсивность гроз. Особенно велико влияние рельефа в горной местности, где грозовые фронты распространяются преимущественно по узким коридорам.

Наблюдениями установлена корреляционная связь между плотностью разрядов в землю и продолжительностью гроз. Эта корреляционная зависимость распространена на всю территорию Россию и связывает число ударов нисходящей молнии в 1 км^2 земной поверхности с конкретной продолжительностью гроз в часах. Для произвольного пункта на территории России удельная плотность ударов молнии в землю n определяется, исходя из средней продолжительности гроз в часах, следующим образом:

Средняя продолжительность гроз, ч	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100 и более
Удельная плотность ударов молнии в землю, 1/(км^2·год), n	1	2	4	5,5	7	8,5

Используя значения n, можно определить ожидаемое количество поражений молнией в год N:

для зданий и сооружений прямоугольной формы

$$N = [(S+6h_x)(L+6h_x)-7{,}7h^2_x]n10^{-6}; \qquad (8.7)$$

для сосредоточенных зданий и сооружений (дымовые трубы, вышки, башни)

$$N = 9\pi h^2_x n10^{-6}, \qquad (8.8)$$

где h_x – наибольшая высота здания или сооружения, м; S и L – соответственно ширина и длина здания или сооружения, м; n - среднегодовое число ударов молнии в 1 км^2 земной поверхности (удельная плотность ударов молнии в землю).

Если здание имеет сложную конфигурацию, то при расчете по формуле (8.7) в качестве S и L принимается ширина и длина наименьшего прямоугольника, в который может быть вписано здание или сооружение в плане. Принято считать, что молнии попадают в здание или сооружение в пределах территории, контур которой удален от контура сооружения на три его высоты.

Оценивая по формулам (8.7) и (8.8) число поражений молнией объектов разных размеров и форм, например, можно видеть, что при средней продолжительности гроз 40-60 ч в год для здания высотой 20 м и размерами в плане 100×100 м можно ожидать не более одного поражения за 5 лет,

для сосредоточенного объекта высотой 50 м можно ожидать не более одного поражения за 3-4 года.

Таким образом, при умеренных размерах зданий и сооружений (высота 20-50 м, длина и ширина примерно 100 м) поражение их молнией является редким событием.

Удельную плотность ударов молнии в землю n в месте дислокации объекта можно приближенно определить по формуле [31]

$$n = 0{,}23 n_{\text{д}}^{1{,}3}. \qquad (8.9)$$

На всей территории России здания и сооружения I категории должны быть обязательно защищены от прямых ударов молнии, электростатической и электромагнитной индукции и заноса в них высокого потенциала через наземные и подземные коммуникации, а молниеотводы должны предусматриваться с зонами защиты А. В районах с очень малой интенсивностью грозовой деятельности вероятность удара в здание I категории очень мала, но материальный ущерб может быть велик, и затраты на молниезащиту в этом случае вполне оправданы.

Здания и сооружения II категории должны быть защищены от прямых ударов молнии, вторичных ее воздействий и заноса в них высоких потенциалов через наземные и подземные коммуникации только в местностях со средней продолжительностью гроз $n_{\text{ч}} \geq 10$. Тип зоны защиты молниеотводов зависит от показателя N: зона типа А принимается при $N > 1$, а зона типа Б – при $N \leq 1$. Наружные технологические установки класса В-1г, относимые также ко II категории, подлежат защите от прямых ударов молнии на всей территории России, а молниеотводы предусматриваются с зонами типа Б. Некоторые из этих установок подлежат защите и от электростатической индукции (резервуары с плавающими крышами или понтонами).

Здания и сооружения III категории (с зонами классов П-I, П-II, П-IIа) подлежат молниезащите в местностях со средней продолжительностью гроз 20 и более часов в год, а тип зоны защиты молниеотводов зависит от степени огнестойкости здания. Например, зона типа Б требуется для зданий и сооружений I и II степени огнестойкости при $0{,}1 < N \leq 2$, а для III, IV и V степени огнестойкости при $0{,}02 < N \leq 2$; при $N > 2$ необходима зона типа А. Для наружных установок класса П-III молниезащита предусматривается при средней продолжительности гроз 20 и более часов в год при зоне защиты типа Б, если $0{,}1 < N \leq 2$; при $N > 2$ – зона типа А.

Все здания и сооружения III категории должны быть защищены от прямых ударов молнии и заноса высоких потенциалов через наземные металлические коммуникации, а наружные установки должны быть защищены только от прямых ударов молнии. Таким образом, обязательность устройства молниезащиты зданий или сооружений I, II и III категории

определяется средней продолжительностью гроз $n_ч$ и ожидаемым количеством поражений N молнией в год. При несовпадении одного из этих показателей с величинами по нормам [2] устройство молниезащиты становится необязательным.

Требования к устройствам молниезащиты

Молниезащита представляет собой комплекс мероприятий, направленных на предотвращение прямого удара молнии в объект или на устранение опасных последствий, связанных с прямым ударом; к этому комплексу относятся также средства защиты, предохраняющие объект от вторичных воздействий молнии и заноса высокого потенциала. К основным требованиям могут быть отнесены: соответствие молниезащиты категории здания характеру производственного процесса в здании, сооружении, на всем объекте; возможность типизации конструктивных элементов молниезащиты; надежность действия всех ее элементов и «равнопрочность» их в этом отношении; большой срок службы, достигающий десятка и более лет; возможность применения недорогостоящих материалов и использования конструктивных элементов здания и сооружения; наглядность монтажа, предупредительные и воспрещающие знаки или ограждения, т.е. создание условий безопасности для персонала объекта или посторонних людей; сравнительно несложная эксплуатация и доступность ко всем элементам при контроле, восстановлении или ремонте.

Кроме того, при выполнении молниезащиты зданий и сооружений всех категорий для повышения безопасности людей следует размещать заземлители (кроме углубленных) в редко посещаемых местах (на газонах, кустарниках), в удалении на 5 и более метров от основных грунтовых, проезжих и пешеходных дорог, располагать под асфальтовыми покрытиями, устанавливать предупреждающие плакаты. Токоотводы следует прокладывать в малодоступных местах, чтобы люди не могли к ним прикоснуться.

Для снижения опасности шаговых напряжений рекомендуется применять углубленные и рассредоточенные заземлители в виде лучей. При ширине зданий и сооружений более 100 м необходимо выполнять мероприятия по выравниванию потенциала внутри здания. При устройстве молниезащиты зданий и сооружений любой категории следует учитывать возможность экранирования их зонами защиты молниеотводов других близкорасположенных зданий и сооружений. При этом следует максимально использовать естественные молниеотводы (вытяжные трубы, водонапорные башни, дымовые трубы, линии электропередач и другие возвышающиеся сооружения).

Для нестандартных объектов, молниезащиту которых не удается осуществить по типовым рекомендациям [2], должны быть определены те

воздействия, которые представляют наибольшую опасность, а затем на основе технико-экономического анализа выбрать для них необходимые оптимальные меры защиты. В ряде случаев, особенно для объектов новой технологии, может оказаться решающей не стоимость устройств молниезащиты, а их совместимость с технологическими функциями объекта, поэтому иногда важно рассматривать вопросы молниезащиты не в процессе строительства объекта, а на стадии его проектирования, когда имеется возможность путем малых затрат и несущественных изменений повысить грозоупорность объекта и возложить хотя бы частично функции молниезащиты на его конструктивные элементы.

В практике проектирования и эксплуатации молниезащиты следует учитывать определенных размеров зоны взрывоопасности, так как многие здания, сооружения и наружные установки химических, нефтехимических, нефтеперерабатывающих и ряда других предприятий имеют устройства постоянного или периодического выброса в окружающее пространство горючих газов и паров жидкостей. Эти технологические выбросы, связанные с нормальным или аварийным режимом работы аппаратов и установок, происходят через постоянно или периодически действующие воздушки, свечи, газоотводные трубы, по специальным аварийным стравливающим линиям, а также через дыхательные и предохранительные клапаны. Значительное количество этих выбросов производится локальными механическими и естественными вентиляционными системами зданий. На отдельных объектах химической промышленности насчитывается до нескольких сотен воздушек. Перечисленные устройства располагаются, как правило, на зданиях, наружных установках, рабочих площадках и этажерках, в виде отдельно стоящих труб-свечей высотой более 30 м.

Большие потери наблюдаются от испарения нефтепродуктов с высокой упругостью паров и сырой нефти при их хранении и при различных операциях, связанных с загрузкой и выгрузкой емкостей. При этом продукты испарения, вытесняемые из наполняемых железобетонных резервуаров через дыхательные клапаны и неплотности крыши в атмосферу, при определенных технологических режимах и метеорологических условиях создают на прилегающей территории взрывоопасные зоны значительных размеров (10-40 м). Во многих случаях горючие продукты (газы и пары) выбрасываются либо в чистом виде, особенно при аварийных стравливаниях из аппаратов, либо в смеси с воздухом в границах концентрированных пределов взрыва (при выбросе газо- и паровоздушных смесей из дыхательных труб, воздушек), поэтому около таких устройств выброса также могут создаваться зоны взрывоопасности.

Непосредственный контакт канала молнии или нагретых до высокой температуры частей молниезащитных устройств с этой зоной может

привести к воспламенению, взрыву и разрушениям, поэтому вопросы молниезащиты зданий и наружных установок должны решаться с учетом возможных зон взрывоопасности, которые будут влиять на выбор схемы и типа молниезащитного устройства, мест их расположения, необходимого удаления и превышения зон защиты молниеотводов над устройством выброса. В практике проектирования молниезащиты встречались случаи, когда наличие большого количества газоотводных труб и вентиляционных устройств приводило к отказу от защиты зданий II категории молниеотводами, располагаемыми на них, и сооружались отдельно стоящие молниеотводы.

Трудности, возникающие при решении вопросов молниезащиты с учетом зон взрывоопасности, объяснялись, с одной стороны, весьма противоречивыми указаниями в литературных и нормативных источниках, с другой – отсутствием каких-либо исследований распределения взрывоопасных концентраций и зон. Все это приводило к усложнению и чрезмерному удорожанию молниезащитных устройств, применению недостаточно надежного и безопасного варианта молниезащиты. В связи с этим были проведены некоторые исследования распределений концентраций горючих смесей при непрерывном выбросе их в атмосферу [3].

8.4. МОЛНИЕОТВОДЫ

Средством защиты от прямых ударов молнии служит молниеотвод – устройство, рассчитанное на непосредственный контакт с каналом молнии и отводящее ее ток в землю.

Конструктивное выполнение молниеотводов

Здания и сооружения от прямых ударов защищают молниеотводами, каждый из которых конструктивно состоит из молниеприемника, непосредственно воспринимающего удар молнии, токоотвода, соединяющего молниеприемник с заземлителем, и заземлителя, через который ток молнии стекает в землю. Вертикальная конструкция (столб, мачта) или часть сооружения, предназначенная для закрепления молниеприемника и токоотвода, называется опорой молниеотвода.

Опоры стержневых и тросовых молниеотводов, как отдельно стоящих, так и устанавливаемых на защищаемом объекте, могут быть деревянными, металлическими и железобетонными (рис. 8.9).

Деревянная опора обычно состоит из основной стойки и пасынков, выполненных из дерева или железобетона (последние предпочтительнее). Деревянные части, особенно подземные, антисептируют. Высота такого молниеотвода редко превышает 25 м. В землю опора зарывается на 0,1–0,2 ее полной высоты в зависимости от грунта. Для опор используют древеси-

ну хвойной породы (сосна, лиственница, ель, пихта). Диаметр бревна в верхнем срубе должен быть не менее 100 мм.

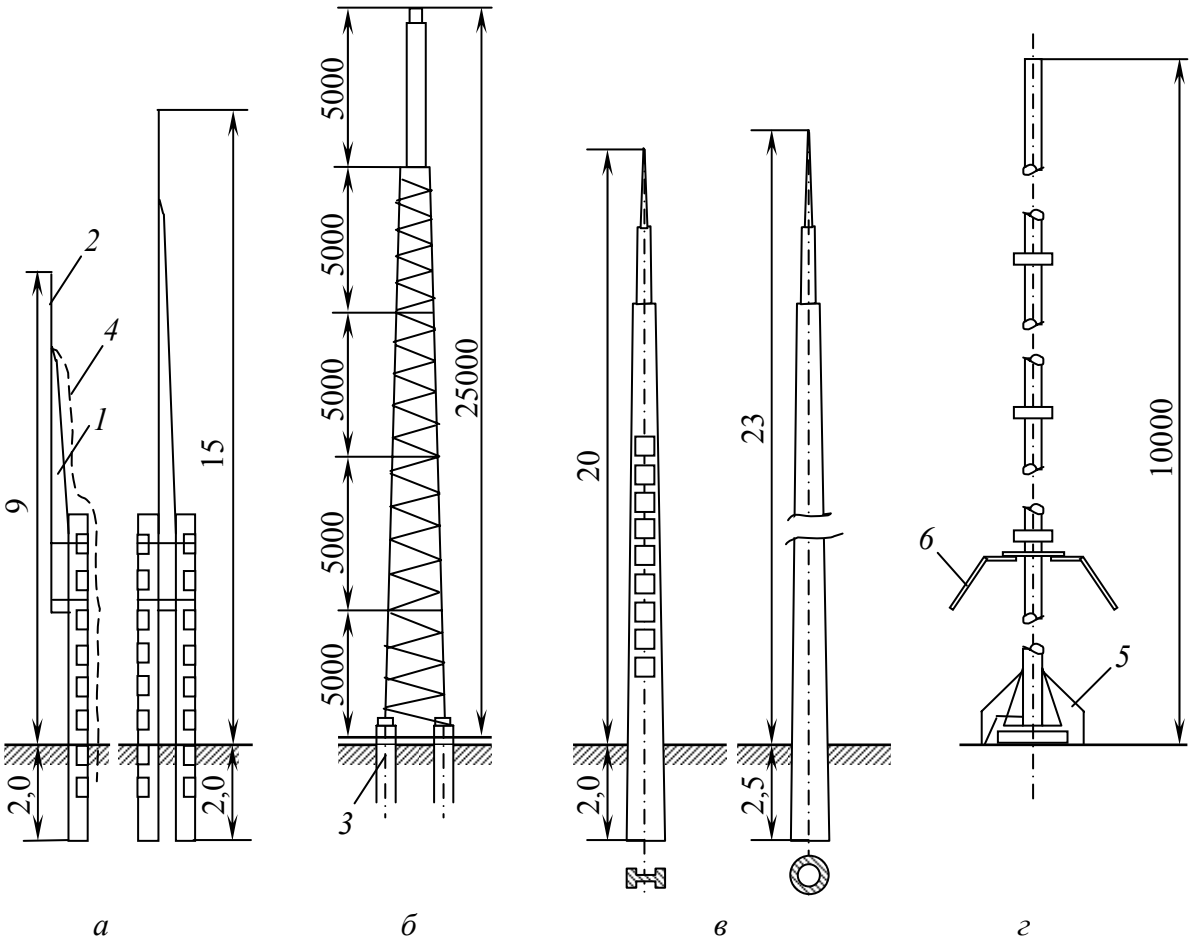


Рис. 8.9. Конструкции стержневых молниеотводов и молниеприемников:
а – на деревянной опоре; *б* – металлический решетчатый типа М-25; *в* – на железобетонной опоре; *г* – молниеприемник из металлических труб, установленных на крыше; *1* – опора (стойка); *2* – молниеприемник; *3* – подножник; *4* – токопровод (спуск); *5* – фланец; *6* – оттяжка

Опоры высотой более 8-10 м выполняют на одном или двух пасынках (рис. 8.9, *а*), высота которых зависит от высоты молниеотвода. Для увеличения срока службы деревянных опор рекомендуется применять железобетонные пасынки, особенно в грунтах, где процесс гниения наиболее интенсивен (в суглинках). Железобетонные пасынки изготовляют из бетона марки не ниже М200, армированного круглой сталью марки Ст 3 или Ст 5. В поперечнике пасынки могут быть прямоугольного двутаврового, круглого и других сечений.

Металлическую опору для молниеотвода высотой 20-75 м (рис. 8.9, *б*) чаще всего выполняют в виде жесткой решетчатой конструкции. Ее устанавливают на четырех железобетонных подножниках, наверху к ней приваривают молниеприемник и предохраняют от коррозии регулярной окра-

ской. Такой молниеотвод не требует специального токоотвода, так как сам хорошо проводит ток.

Железобетонные опоры могут быть различной формы (рис. 8.9, *в*), арматура в них частично или полностью предварительно напряженная. Бетон может быть вибрированным или центрифугированным. На вершине опоры устанавливают молниеприемник и соединяют с токоотводом, который прокладывают по опоре. В некоторых случаях молниеприемник соединяют с арматурой, используемой в качестве токоотвода. Но именно эти места оказываются нередко ненадежными, так как требуется либо вывод части арматуры наружу, либо пропуск в нее соединительных проводников. На этих участках постепенно начинается разрушение, особенно в прибрежных районах морей. Железобетонные опоры экономически более выгодны, они проще в эксплуатации и долговечны. Опоры стержневых молниеотводов должны быть рассчитаны на механическую прочность как свободно стоящие конструкции, а опоры тросовых молниеотводов – с учетом натяжения троса и действия на него ветровой и гололедной нагрузки.

Молниеотводы, устанавливаемые на сооружении, делятся на *настенные* и *кровельные*. Первые применяют чаще, их молниеприемники изготавливают из трубы или угловой стали и закрепляют посредством скоб, хомутов или кронштейнов. Молниеприемники кровельные (рис. 8.9, *г*) чаще всего выполняют из труб разного диаметра и снабжают фланцами для крепления к крыше при помощи болтов. Дополнительная устойчивость достигается посредством оттяжек из полосовой или угловой стали. Высота таких молниеприемников колеблется от 5 до 10 м. Опорами стержневых молниеотводов могут служить стволы деревьев, растущих вблизи защищаемых зданий и сооружений. При этом если дерево находится на расстоянии менее 5 м от зданий и сооружений III, IV и V степени огнестойкости (II и III категория молниезащиты), то необходимо по стене защищаемого здания против ствола проложить токоотвод и присоединить под землей к заземлителю или же от молниеприемника токоотвод перебросить на другое дерево, на отдельную стойку, отстоящие от здания более чем на 5 м. Если дерево невысокое, то на него устанавливают шест с молниеприемником, это удешевляет молниезащиту. Кроме того, деревья создают дополнительное экранирование от заряженного облака.

Для тросовых молниеотводов можно использовать те же опоры, но требуется иногда повышать их устойчивость оттяжками или подкосами. Выбор того или иного материала опор обуславливается в основном необходимой высотой молниеотводов, расчетными механическими нагрузками, а также экономическими соображениями. Следует также учитывать их сочетание с архитектурой защищаемого объекта, климатическими условиями.

Молниеприемники стержневые, тросовые и в виде сетки непосредственно воспринимают прямой удар молнии и должны выдерживать ее термическое и динамическое воздействия, быть надежными в эксплуатации.

Стержневые молниеприемники изготовляются из покрытой антикоррозийной защитой (оцинкование, лужение, покраска) круглой и угловой стали или из некондиционных водогазопроводных труб. Конец трубы сплющивают или надежно закрывают металлической пробкой. Наименьшее сечение молниеприемника должно быть 100 мм^2 (это позволяет выдержать термические и динамические воздействия тока молнии), а длина не менее 200 мм.

В качестве молниеприемников можно использовать дымовые, выхлопные и другие металлические трубы объекта, дефлекторы (если они не выбрасывают горючие пары и газы), кровлю и другие металлические элементы сооружений.

Применяют молниеприемники и в виде сетки, сваренной из круглой стали диаметром 6-8 мм или полосовой стали сечением не менее 48 мм^2, уложенных на кровлю под гидро- или теплоизоляцию (если они несгораемые). Это не затруднит отток воды с кровли и очистку от снега. Шаг ячейки берут 6×6 м для зданий II категории, а для зданий III - 12×12 м.

Однако укладка сеток рациональна лишь в зданиях с горизонтальными крышами, где равновероятно поражение молнией любого их участка. При больших уклонах крыши наиболее вероятны удары молнии вблизи ее конька, и в этих участках укладка сетки по всей поверхности кровли приведет к неоправданным затратам металла. В этом случае более экономичен вариант установки стержневых или тросовых молниеприемников, в зону защиты которых входит весь объект. По этой причине укладка молниеприемной сетки рекомендуется на неметаллических кровлях с уклоном не более 1:8.

Иногда возвышающиеся элементы кровли снабжают молниеприемниками, соединенными с сеткой посредством сварки. На деревьях молниеприемником может служить выступающий конец токоотвода в виде петли на участке до 400 мм от верхней точки. Тросовый молниеприемник выполняют из стального многопроволочного и только оцинкованного троса диаметром до 7 мм (сечение не менее 35 мм^2).

Токоотводы молниеотводов применяют для соединения молниеприемников с заземлителями из стали любого профиля. Их рассчитывают на пропускание полного тока молнии без нарушений и существенного перегрева. Они должны быть оцинкованы, пролужены или окрашены для предупреждения коррозии. Не рекомендуется применять многопроволочный стальной трос, если у него не оцинкована каждая нить. Наименьшее сечение токоотводов, выполненных из угловой и полосовой

стали и расположенных вне сооружения на воздухе, равно 48 мм^2, для расположенных внутри – 24 мм^2, а круглые токоотводы должны иметь наименьший диаметр 6 мм. Токоотводами могут служить арматура железобетонных конструкций, направляющие лифтов, пожарные лестницы, водопроводные, водосточные и канализационные трубы, колонны, стенки резервуаров, электрически надежно связанные по всей длине.

Соединения токоотводов, специальных и естественных, должны быть сварными (внахлест). Количество их необходимо резко ограничить. Болтовые соединения допускают только для объектов с III категорией устройства молниезащиты и тогда их не окрашивают, а лудят. С заземлителями токоотводы соединяют только сваркой, и площадь контакта во всех случаях не менее двух площадей сечения деталей, а длина – около шести диаметров проволоки или двойной ширины полосы или полки уголка. Если токоотводы присоединяют к отдельным заземлителям и они электрически связаны друг с другом, то на высоте около 1,5 м от поверхности земли устанавливают надежный болтовой зажим, позволяющий отсоединить токоотвод для контроля заземлителя (рис. 8.10). Токоотводы от молниеприемников прокладывают кратчайшим путем к заземлителю. От входов в здания их нужно располагать на таком расстоянии, чтобы с ними не могли соприкасаться люди. Необходимо избегать острых углов и тем более петель в токоотводе, так как значительные электродинамические усилия при больших токах молнии могут разорвать его на этих участках или вызвать искровое перекрытие между ближайшими точками петли. Металлическая кровля, короба и трубы могут быть соединены с токоотводами болтовыми зажимами (рис. 8.11).

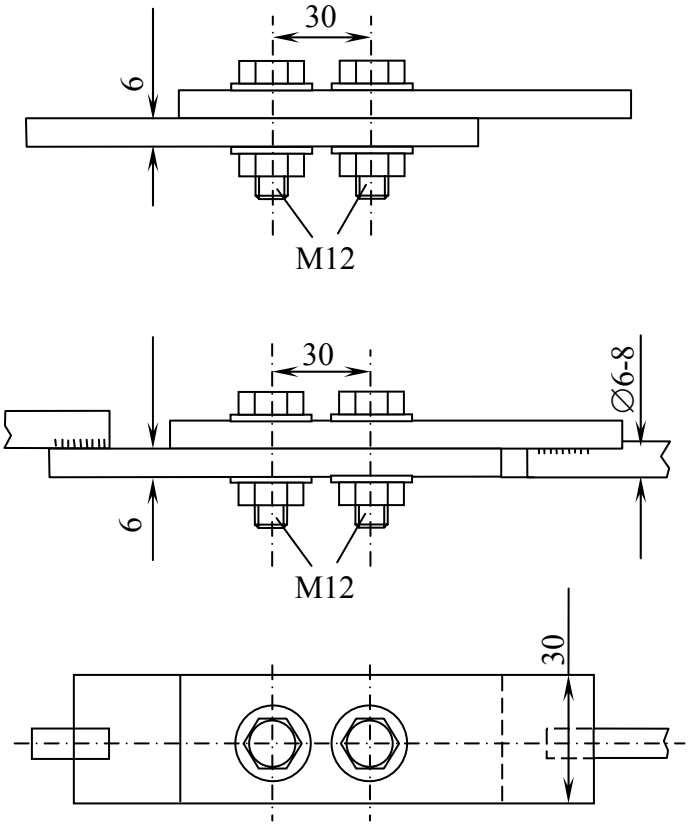


Рис. 8.10. Примерные конструкции разъемов токоотводов

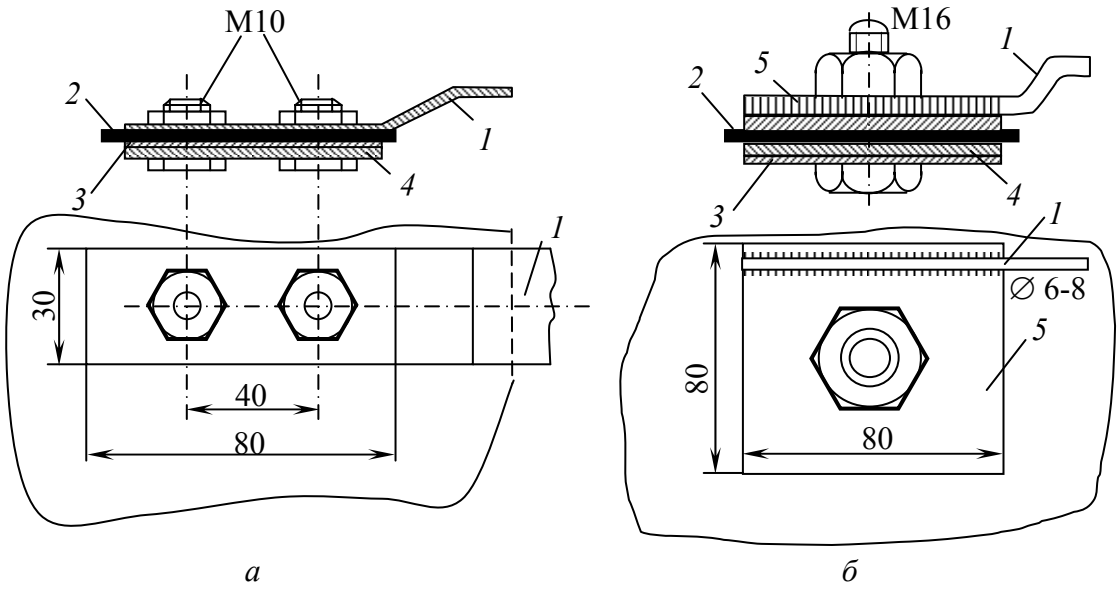


Рис. 8.11. Зажим для присоединения плоского (*а*) и круглого (*б*) токоотводов к металлической кровле:
1 – токоотвод; *2* – кровля; *3* – свинцовая прокладка; *4* – стальная пластина; *5* – пластина с приваренным токоотводом

Заземляющие устройства являются важнейшим элементом в комплексе средств обеспечения защиты объектов от прямого удара молнии, заноса высоких потенциалов по коммуникациям и электростатической индукции. Основной частью их являются собственно заземлители, находящиеся в достаточно хорошо проводящей среде.

Заземлитель молниезащиты – один или несколько заглубленных в землю проводников, предназначенных для отвода в землю токов молнии или ограничения перенапряжений, возникающих на металлических корпусах, коммуникациях при близких разрядах молнии. Они бывают *одиночными* (простыми) или сложными (комбинированными). К первым относятся трубы, электроды из круглой, полосовой, угловой и листовой стали, железобетонные подножки и сваи, а сложные образуются из комбинаций простых. Одиночные делятся на сосредоточенные и протяженные. У первых потенциал практически по длине не изменяется, у вторых потенциалы начала и конца отличаются друг от друга вследствие большой длины электродов, малого их сечения, высокого удельного сопротивления материалов или высокой удельной проводимости грунта.

Еще различают *искусственные* и *естественные* заземлители.

Искусственные заземлители – специально проложенные в земле контуры из полосовой или круглой стали, сосредоточенные конструкции, состоящие из вертикальных и горизонтальных проводников.

Естественные заземлители – заглубленные в землю металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений.

Заземлители могут быть *поверхностными* и *углубленными*. Последние обычно изготовляют из круглой или полосовой стали и укладывают в глубокие котлованы или траншеи, чаще всего по периметру фундамента, если последний не может быть использован в качестве естественного заземлителя. Наконец, существуют *вертикальные* заземлители (обычно стержни из круглой или угловой стали и трубы, железобетонные подножники и сваи, забиваемые в землю, реже – стальные круглые стержни, ввинченные в грунт) и *горизонтальные,* изготовленные из любой профильной стали, закапываемые неглубоко в грунт.

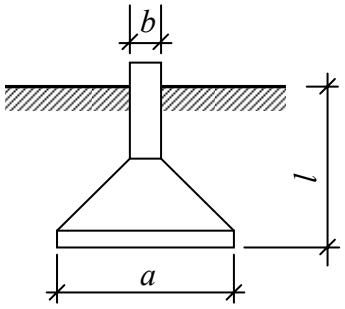
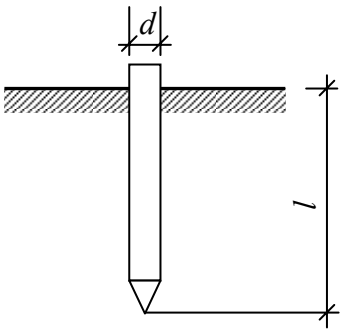
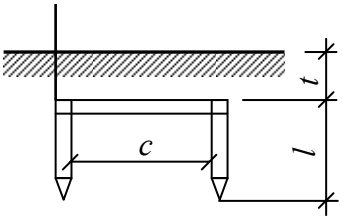
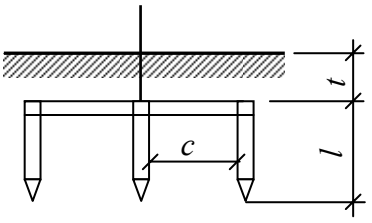
Вертикальные заземлители более эффективны, так как большая их часть располагается во влажных и менее промерзающих слоях почвы. Их длину берут от 2 до 5 м и применяют в глинистых или смешанных грунтах с удельным сопротивлением ρ менее 300 Ом·м и при сравнительно высоком уровне грунтовых вод. Если же верхние слои почвы обладают высоким ρ и этот уровень низок, то длину электродов увеличивают до 4-6 м. Наиболее употребительны и удобны заземлители из круглой стали диаметром 12-30 мм, угловой с шириной полок 40-50 мм, толщиной не менее 4 мм и трубы (чаще всего некондиционные или непригодные к дальнейшему использованию по назначению) с наружным диаметром 25-60 мм и толщиной стенки не менее 3,5 мм. Верхний конец вертикальных заземлителей располагают от поверхности земли на 0,5-1 м. На этом уровне высыхание или промерзание грунта затруднено.

Горизонтальные заземлители используют в грунтах с длительно влажными верхними слоями, где трудно забивать вертикальные электроды (гористая местность, районы вечной мерзлоты). Если грунт обладает плохой проводимостью (песок), то траншею для горизонтальных заземлителей заполняют другим грунтом, удобренным солями или их растворами. Для электродов берут преимущественно полосовую сталь сечением не менее 160 мм^2 (40×4 мм) и реже круглую сталь эквивалентного сечения. Электроды укладывают на глубину 0,6-0,8 м в виде одного или нескольких симметричных лучей, длина каждого из них, считая от токоотвода, обычно не превышает 25-30 м. Чем больше удельное сопротивление грунта, тем больше длина луча и их число. Электроды любого типа соединяют между собой и с токоотводами только сваркой.

Конструкция заземлителя зависит от типа молниеотвода, т.е. отдельно стоящего или установленного на здании.

При отдельно стоящих молниеотводах приемлемыми, без расчета их импульсного сопротивления растеканию тока молнии $r_и$, являются типовые конструкции заземлителей, приведенные в табл. 8.1 (см. также [2]).

Таблица 8.1

№ п/п	Заземлитель	Эскиз	Размеры, м
1	Железобетонный подножник		$a \geq 1{,}8$ $b \geq 0{,}4$ $l \geq 2{,}2$
2	Железобетонная свая		$d = 0{,}25 \div 0{,}4$ $l \geq 5$
3	Стальной двухстержневой: полоса размером 40×4 мм стержни диаметром $d = 10 \div 20$ мм		$t \geq 0{,}5$ $l = 3 \div 5$ $c = 3 \div 5$
4	Стальной трехстержневой: полоса размером 40 х 4 мм стержни диаметром $d = 10 \div 20$ мм		$t \geq 0{,}5$ $l = 3 \div 5$ c = 5÷6

При расположении молниеотвода на защищаемом здании в качестве заземлителей рекомендуется широко использовать железобетонные фундаменты зданий и сооружений.

Металлические и железобетонные конструкции зданий I категории по устройству молниезащиты могут быть использованы только для защитного заземления электроустановок и защиты от вторичных воздействий молнии. Для зданий II и III категории металлические и железобетонные конструкции используются и для защиты от прямых ударов молнии. Устройство молниезащиты зданий в железобетонном исполнении включает молниеприемную сетку, соединяемую сваркой с арматурой всех колонн. Ток

молнии через нее попадает на арматуру колонн, затем стекает на арматуру фундамента и через защитный слой бетона – в землю.

Основанием для использования арматуры железобетонных фундаментов в качестве заземлителей являются свойства бетона во влажном состоянии иметь проводимость, сопоставимую с проводимостью грунта, окружающего фундамент. При этом выполняются условия сохранения несущей способности здания и исключаются условия разрушения арматурных стержней и бетона от электрической коррозии, что обеспечивается уменьшением плотности тока, стекающего с арматуры фундамента, и ограничением его стекания через бетон в надземных конструкциях. Указанные меры включают объединение в единую систему всех железобетонных (или металлических) конструкций, соединение с помощью сварки всех элементов арматурного каркаса и создание непрерывной электрической цепи по арматуре.

Битумные и битумно-латексные покрытия фундаментов не являются препятствием для использования их в качестве заземлителей.

В средне- и сильноагрессивных грунтах, где защита железобетона от коррозии выполняется эпоксидными и другими полимерными покрытиями, а также при влажности грунта менее 3 % использовать железобетонные фундаменты в качестве заземлителей не допускается.

При использовании в качестве заземляющих устройств все элементы металлических и железобетонных конструкций (фундаменты, колонны, фермы, стропильные, подстропильные и подкрановые балки) должны образовывать непрерывную электрическую цепь по металлу, а в железобетонных элементах (колоннах) дополнительно должны предусматриваться закладные детали (изделия) для присоединения электротехнического и технологического оборудования.

В качестве заземлителей молниезащиты допускается использовать все рекомендуемые ПУЭ заземлители электроустановок, за исключением нулевых проводов воздушных линий электропередачи напряжением до 1 кВ.

Нормирование заземлителей молниезащиты. Принятый в инструкции [2] подход к нормированию и выбору заземлителей молниезащиты зданий и сооружений учитывает, что одним из эффективных способов ограничения грозовых перенапряжений в цепи молниеотвода, а также на металлических конструкциях и оборудовании объекта является обеспечение низких сопротивлений заземлителей растеканию в земле токов молнии. Поэтому при выборе молниезащиты нормированию подлежит сопротивление заземлителя или другие его характеристики, связанные с его сопротивлением.

До введения в нормативную практику [2] для заземлителей молниезащиты нормировалось импульсное $r_{и}$ сопротивление растеканию токов молнии: его максимально допустимое значение было принято равным 10 Ом для зданий и сооружений I и II категорий и 20 Ом для зданий и сооружений III категории. При этом допускалось увеличение импульсного

сопротивления до 40 Ом в грунтах с удельным сопротивлением более 500 Ом·м при одновременном удалении молниеотводов от объектов I категории на расстояние, гарантирующее от пробоя по воздуху и в земле. Для наружных установок максимально допустимое импульсное сопротивление было принято не более 50 Ом.

Импульсное сопротивление заземлителя является количественной характеристикой сложных физических процессов при растекании в земле токов молнии. Его значение отличается от сопротивления заземлителя при растекании токов промышленной частоты и зависит от нескольких параметров тока молнии (амплитуда, крутизна, длина фронта), варьирующихся в широких пределах. С увеличением тока молнии импульсное сопротивление заземлителя падает, причем в возможном интервале распределение токов молнии (от единиц до сотен килоампер) его значение может уменьшаться в 2-5 раз.

Поскольку при проектировании заземлителя нельзя предсказать значения токов молнии, которые будут через него растекаться, то, следовательно, невозможно оценить наперед соответствующие значения импульсных сопротивлений. С учетом этих условий нормирование заземлителей по их импульсному сопротивлению имеет очевидные неудобства. Разумнее выбирать конкретные конструкции (см. табл. 8.1) по следующему условию: импульсные сопротивления заземлителей во всем возможном диапазоне токов молнии не должны превышать указанных максимально допустимых значений.

Такое нормирование было принято в инструкции [2], где для ряда типовых конструкций заземлителей (см. табл. 8.1) были подсчитаны импульсные сопротивления при колебаниях токов молнии от 5 до 100 кА и по результатам расчетов проведен отбор заземлителей, удовлетворяющих принятому условию.

Наиболее распространенными и рекомендуемыми конструкциями заземлителей являются железобетонные фундаменты. К ним предъявляются дополнительные требования - исключение механических разрушений бетона при растекании через фундамент токов молнии. Исследования показали, что железобетонные конструкции выдерживают большие плотности растекающихся по арматуре токов молнии, что связано с кратковременностью этого растекания. Так, единичные железобетонные фундаменты (сваи длиной не менее 5 или подножники длиной не менее 2 м) способные без разрушения выдерживать токи молнии до 100 кА. Поэтому в табл. 8.1 заданы допустимые размеры единичных железобетонных заземлителей. Для фундаментов больших размеров с соответственно большей поверхностью арматуры опасная для разрушения бетона плотность тока маловероятна при любых возможных токах молнии.

Нормирование параметров заземлителей по их типовым конструкциям имеет ряд достоинств: оно соответствует принятой в строительной практике унификации железобетонных фундаментов с учетом их повсеместного использования в качестве естественных заземлителей; при выборе молниезащиты не требуется выполнять расчеты импульсных сопротивлений заземлителей, что сокращает затраты и объем проектных работ.

Опасность поражения током молнии. При растекании тока с заземлителя или с любого другого подземного металлического предмета в грунте образуется потенциальное (электрическое) поле. Распределение потенциала на поверхности земли при протекании тока молнии через трубчатый заземлитель показано на рис. 8.12. Оно зависит от геометрических размеров электрода, способа его установки, но не зависит от электрических свойств однородного грунта. На небольших удалениях от оси трубы потенциал уменьшается резко, после чего уменьшение делается более плавным. Считают, что на расстоянии x более 20 l потенциал на поверхности земли равен нулю. Наибольший потенциал появляется на самом заземлителе и он равен $U_{\text{м}} = I_{\text{м}} r_{\text{и}}$.

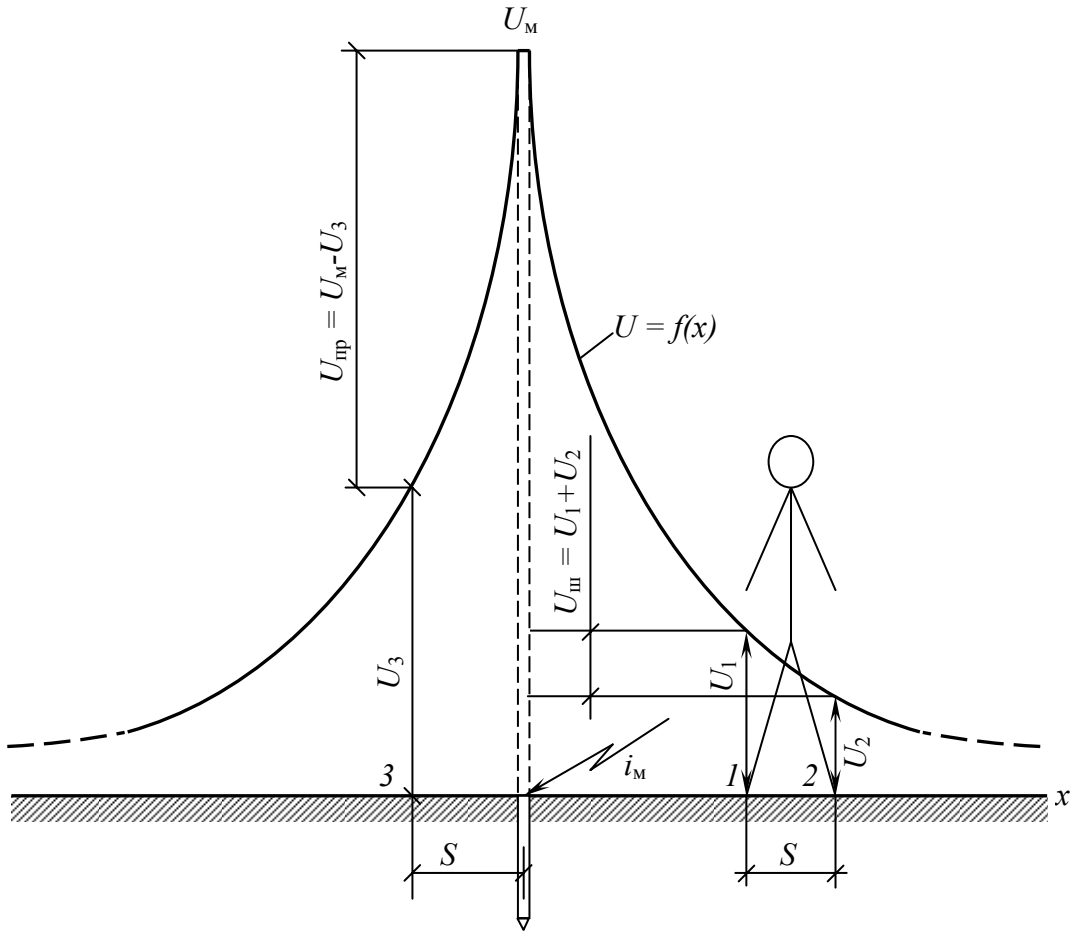


Рис. 8.12. Изменение потенциала на поверхности земли у заземлителя при растекании тока молнии

Если вблизи заземлителя будет находиться человек и расстояние между его ступнями равно S, то он подвергается действию шагового напряжения $U_{ш}$, равного разности потенциалов U_1 и U_2 в точках *1* и *2*, где находятся ступни. Это может быть опасным для жизни. Еще более опасно, если одна нога окажется непосредственно на заземлителе или человек прикоснется к заземлителю. Тогда он подвергается большей разности потенциалов, равной $U_{м}$-U_3 , и называемой напряжением прикосновения $U_{пр}$.

Снижения шагового напряжения и напряжения прикосновения можно добиться уменьшением сопротивления $r_{и}$ до значения ниже 10 Ом, что довольно трудно, и применением параллельно включенных добавочных электродов, выравнивающих потенциал внутри и вне контура заземлителей. Рациональным распределением вертикальных заземлителей, расположенных по контуру или лучам, и связывающих их горизонтальных электродов можно добиться безопасного распределения потенциала по любому направлению от точки присоединения токоотвода. Для безопасности рекомендуется ограждать или во время грозы не допускать людей к заземлителям ближе 5 м, располагать эти заземлители дальше от дорог, тротуаров или располагать под асфальтовым покрытием.

Зоны защиты молниеотводов

Защитное действие молниеотводов основано на свойстве молнии поражать наиболее высокие и хорошо заземленные металлические сооружения. Во время лидерной стадии разряда на вершине молниеотвода скапливаются заряды, создающие на ней очень большие напряженности электрического поля, куда и направляется разряд. Развитие с молниеотвода встречного лидера еще более усиливает напряженность поля в направлении лидера молнии и окончательно предопределяет ее удар в молниеотвод.

Защитное действие молниеотвода характеризуется вероятностью прорыва молнии. Под этой вероятностью понимают отношение числа разрядов молнии в защищаемой объект к общему числу разрядов в систему молниеотвод-объект. При анализе поражения молниями различных сооружений [31] было установлено, что вероятность прорыва молнии к объекту снижается по мере сокращения расстояний между молниеотводом и объектом. Однако определение вероятности прорыва для каждого конкретного сооружения - задача достаточно сложная, поэтому в проектной практике широко пользуются зонами защиты молниеотводов.

Под зоной защиты понимают пространство в окрестности молниеотвода, характеризующееся тем, что вероятность прорыва молнии к любому объекту внутри зоны не превышает некоторой достаточно малой величины. Конфигурация и размеры зон защиты получены на основе модельных экспериментов и расчетов [31] и было предложено два типа зон защиты:

зона типа А, обладающая степенью надежности 99,5 % и выше, и типа Б – 95 % и выше. Степень надежности защиты объекта в любом случае возрастает, когда объект удается расположить в глубине зоны защиты молниеотводов.

По типу молниеприемников молниеотводы делятся на *стержневые*, *тросовые* и *сеточные*; по количеству и общей зоне защиты – на *одиночные*, *двойные* и *многократные*. Кроме того, различают молниеотводы отдельно стоящие, изолированные и не изолированные от защищаемого здания. Чаще используют стержневые молниеотводы. Ниже дается методика построения и расчета зон защиты для молниеотводов высотой до 150 м [2], которые преимущественно поражаются нисходящими молниями.

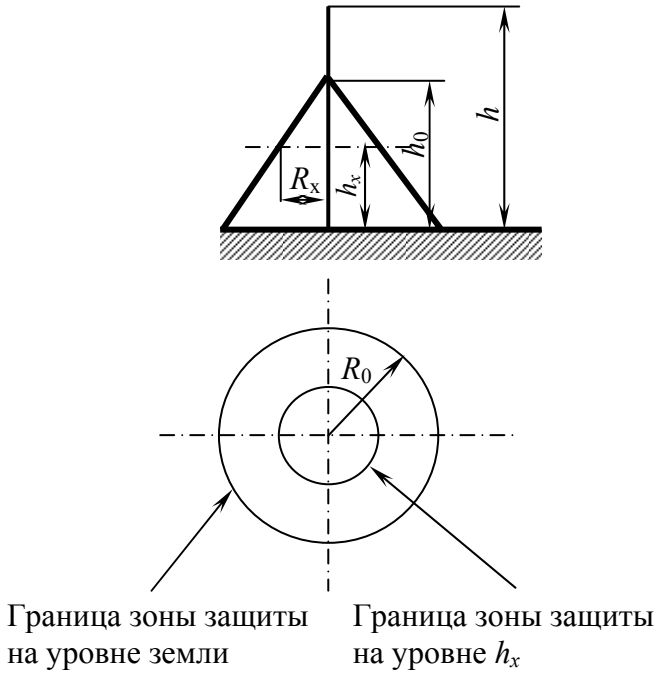


Рис. 8.13. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода

При одиночном стержневом молниеотводе зона защиты (при $h \le 150$ м) представляет собой конус (рис. 8.13). Вершина конуса находится на высоте $h_0 < h$. На уровне земли зона защиты образует круг радиусом R_0. Горизонтальное сечение зоны защиты на высоте защитного уровня сооружения h_x представляет собой круг радиусом R_x. Эти величины определяются следующим образом.

Зона типа А:

$$h_0 = 0{,}85h; \tag{8.10}$$

$$R_0 = (1{,}1\text{-}0{,}002h)h; \tag{8.11}$$

$$R_x = (1{,}1\text{-}0{,}002h)(h\text{-}h_x/0{,}85). \tag{8.12}$$

Зона типа Б:

$$h_0 = 0{,}92h; \tag{8.13}$$

$$R_0 = 1{,}5h; \tag{8.14}$$

$$R_x = 1{,}5(h\text{-}h_x/0{,}92), \tag{8.15}$$

где R_x и h_x определяются по закону подобия треугольников.

Для зоны типа Б высота молниеотвода при известных величинах R_x и h_x может быть определена по формуле

$$h = (R_x + 1{,}63h_x)/1{,}5. \tag{8.16}$$

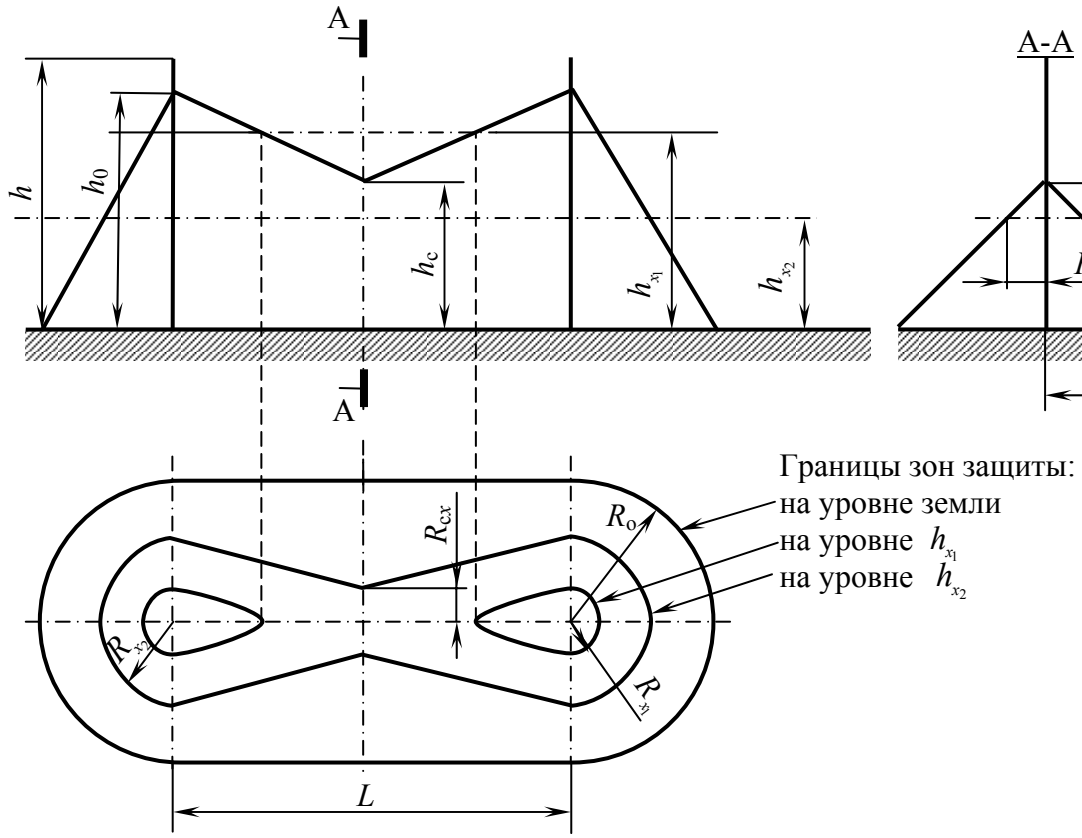


Рис. 8.14. Зона защиты двойного стержневого молниеотвода

Двойной стержневой молниеотвод (рис. 8.14). Торцевые части зоны защиты определяются как зоны одиночных стержневых молниеотводов. Значения h_0, R_0, R_{x_1} *и* R_{x_2} определяются по формулам (8.10) ÷ (8.16) для обоих типов зоны защиты. Другие величины этой зоны:

Зона типа А (существует при $L \le 4h$):

при $L \le h$

$$h_c = h_0; \quad R_{cx} = R_x; \quad R_c = R_0; \tag{8.17}$$

при $h < L \le 2h$

$$h_c = h_0\text{-}(0{,}17+3\cdot10^{-4}\cdot h)(L\text{-}h); \tag{8.18}$$

$$R_c = R_0; \quad (8.19)$$

$$R_{cx} = R_0(h_c - h_x)/h_c; \quad (8.20)$$

при $2h < L \le 4h$

$$h_c = h_0 - (0{,}17 + 3\cdot 10^{-4}\cdot h)(L-h); \quad (8.21)$$

$$R_c = R_0[1 - 0{,}2(L-2h)/h]; \quad (8.22)$$

$$R_{cx} = R_0(h_c - h_x)/h_c. \quad (8.23)$$

Зона типа Б (существует при $L \le 6h$):

при $L \le h$

$$h_c = h_0; \quad R_{cx} = R_x; \quad R_c = R_0; \quad (8.24)$$

при $h < L \le 6h$

$$h_c = h_0 - 0{,}14(L-h). \quad (8.25)$$

Величины R_c и R_{cx} определяются по формулам (8.19) и (8.20) соответственно. При известных h_c, L *и* $R_{cx} = 0$ высота молниеотвода для зоны типа Б определяется по формуле

$$h = (h_c - 0{,}14L)/1{,}06. \quad (8.26)$$

Если стержневые молниеотводы находятся на расстоянии $L > 4h$ и $L > 6h$, их надо рассматривать как одиночные.

Двойной стержневой молниеотвод разной высоты (рис. 8.15). Торцевые части также представляют собой зоны защиты одиночных стержневых молниеотводов соответствующей высоты, а h_{c_1}, h_{c_2}, R_{o_1}, R_{o_2}, R_{x_1} и R_{x_2} вычисляются по формулам (8.10÷8.16) для обоих типов зон. Остальные размеры зоны определяются по формулам

$$R_{cx} = R_c(h_c - h_x)/h_c; \quad (8.27)$$

$$R_c = (R_{o_1} + R_{o_2})/2; \quad (8.28)$$

$$h_c = (h_{c_1} + h_{c_2})/2, \quad (8.29)$$

где h_{c_1} и h_{c_2} для обоих типов зон защиты вычисляются по формулам (8.17), (8.18), (8.21), (8.24), (8.25).

Для разновысокого двойного стержневого молниеотвода зона защиты типа А существует при $L \le 4h_1$, а зона Б – при $L \le 6h_1$. При соответствующих больших расстояниях между молниеотводами они рассматриваются как одиночные.

Многократный стержневой молниеотвод. Зона защиты многократного стержневого молниеотвода определяется как зона защиты попарно взятых соседних стержневых молниеотводов (рис. 8.16). Основным условием защищенности одного сооружения или группы сооружений высотой h_x с надежностью, соответствующей зонам типа А и Б, является неравенство $R_{cx} \ge 0$ для

всех попарно взятых молниеотводов. В противном случае построение зон защиты должно быть выполнено для одиночных или двойных стержневых молниеотводов в зависимости от соотношений L и h. Величину R_{cx} для обоих типов определяют по формулам (8.17), (8.20), (8.23), (8.24) и (8.27).

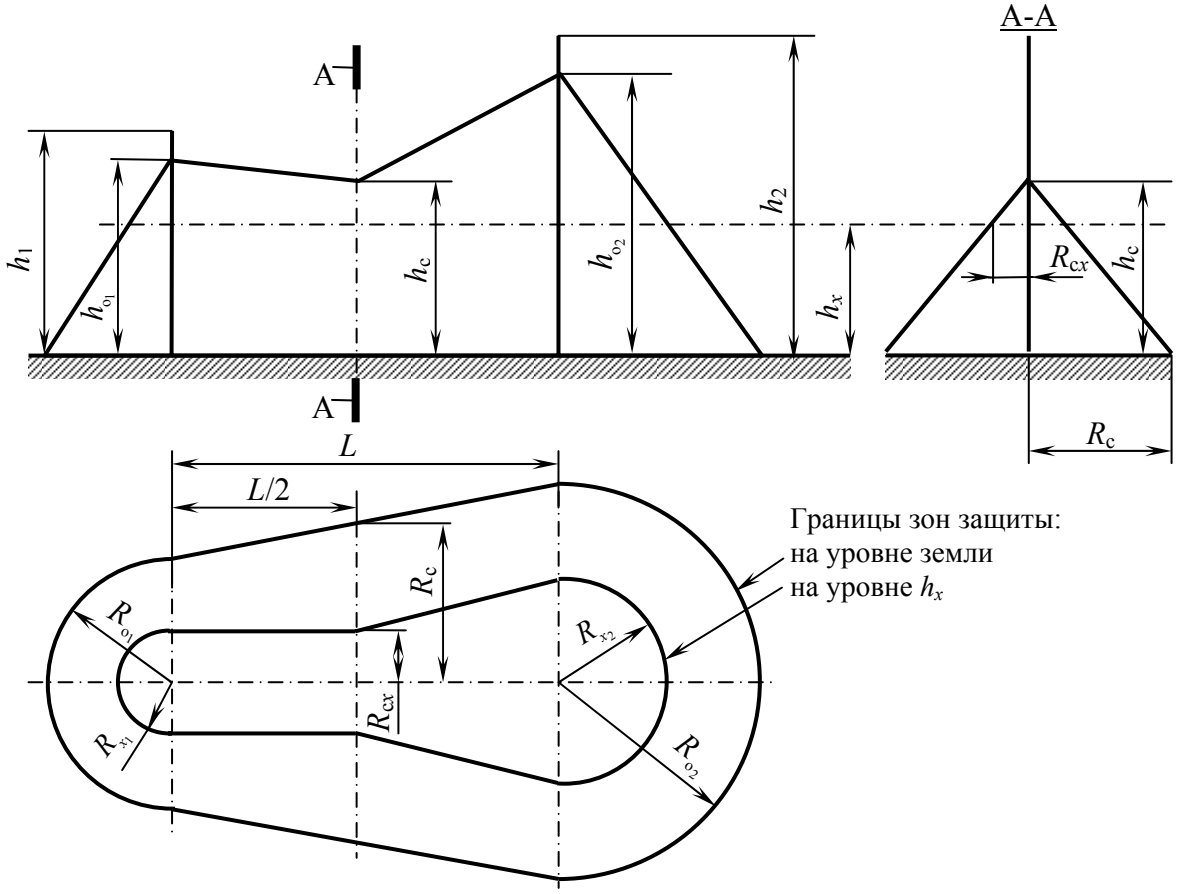


Рис. 8.15. Зона защиты двух стержневых молниеотводов разной высоты

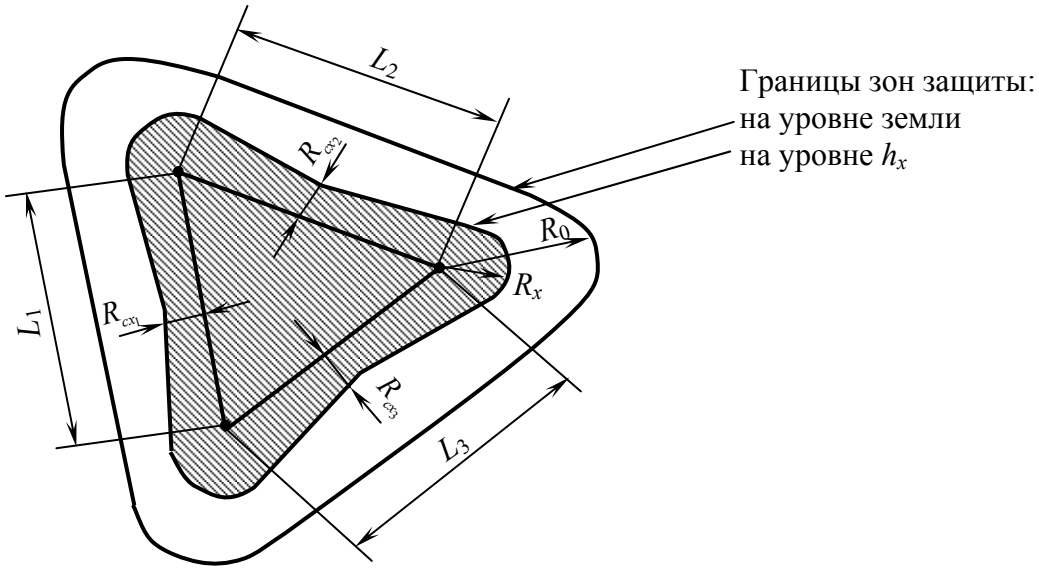


Рис. 8.16. Зона защиты (в плане) многократного стержневого молниеотвода

Одиночный тросовый молниеотвод (рис. 8.17). Здесь h – высота троса в точке наибольшего провеса. С учетом стрелы провеса троса сечением 35-50 мм^2 при известной высоте опор $h_{оп}$ и длине пролета $\alpha < 120$ м высота троса $h = h_{оп}$-2 м, а при α = 120-150 м $h = h_{оп}$-3 м.

Конфигурацию и размеры зоны защиты одиночных тросовых молниеотводов определяют по формулам (8.30 ÷ 8.35).

Зона типа А:

$$h_0 = 0{,}85h; \tag{8.30}$$

$$R_0 = (1{,}35\text{-}0{,}0025h)h; \tag{8.31}$$

$$R_x = (1{,}35\text{-}0{,}0025h)(h\text{-}h_x/0{,}85). \tag{8.32}$$

Зона типа Б:

$$h_0 = 0{,}92h; \tag{8.33}$$

$$R_0 = 1{,}7h; \tag{8.34}$$

$$R_x = 1{,}7(h\text{-}h_x/0{,}92). \tag{8.35}$$

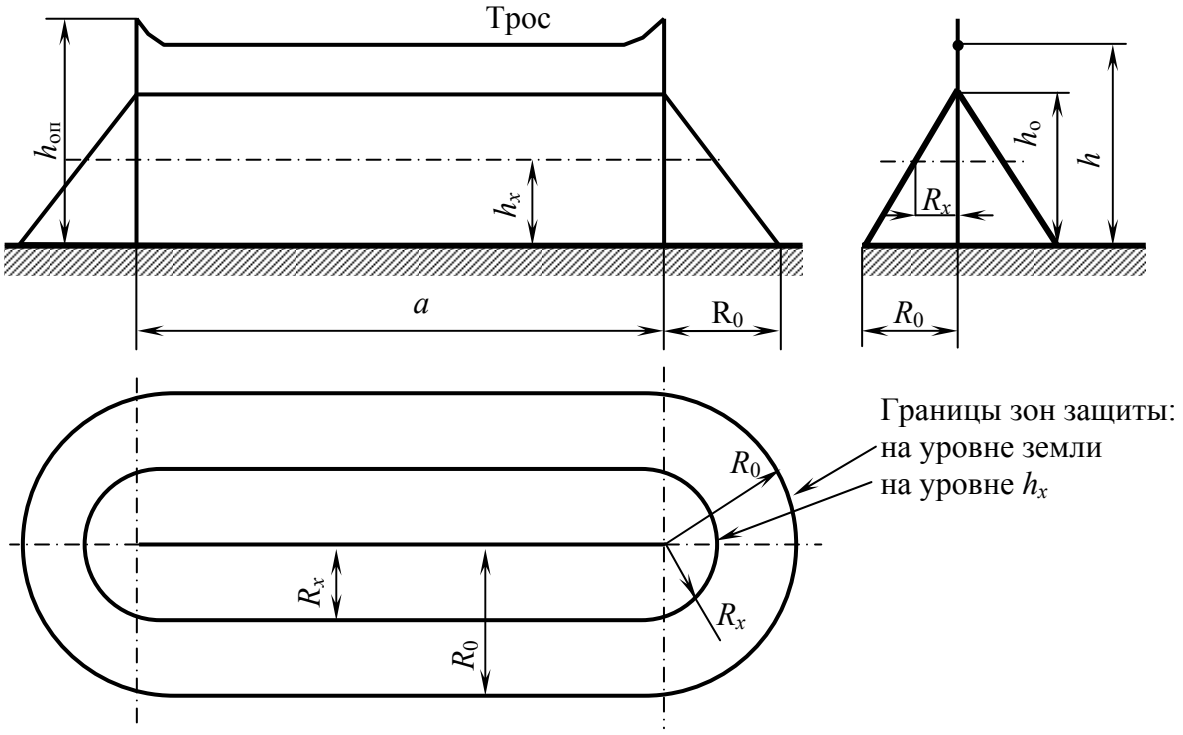


Рис. 8.17. Зона защиты одиночного тросового молниеотвода

Для зоны типа Б высота одиночного тросового молниеотвода при известных h_x и R_x равна

$$h = (R_x + 1{,}85h)/1{,}7. \tag{8.36}$$

Двойной тросовый молниеотвод (рис. 8.18). Здесь показаны очертания зоны защиты двойного тросового молниеотвода. Размеры h_0, R_0, R_x для обоих типов зон защиты определяются по формулам (8.30-8.36). Остальные габариты зоны защиты двойного тросового молниеотвода определяются следующим образом.

Зона типа А (существует при $L \le 4h$):

при $L < h$

$$h_c = h_0; \quad R_{cx} = R_x; \quad R_c = R_0; \tag{8.37}$$

при $h < L \le 2h$

$$\left.\begin{aligned} h_c &= h_0\text{-}(0{,}14+5\cdot10^{-4}\cdot h)(L\text{-}h);\\ R_x' &= L/2[(h_0\text{-}h_x)/(h_0\text{-}h_c)];\\ R_c &= R_0;\\ R_{cx} &= R_0(h_c\text{-}h_x)/h_c; \end{aligned}\right\} \tag{8.38}$$

при $2h < L \le 4h$

$$R_c = R_0[1\text{-}0{,}2(L\text{-}2h)/h]; \tag{8.39}$$

$$R_{cx} = R_c(h_c\text{-}h_x)/h_c. \tag{8.40}$$

Размеры h_c и R_x' определяются по формулам (8.38).

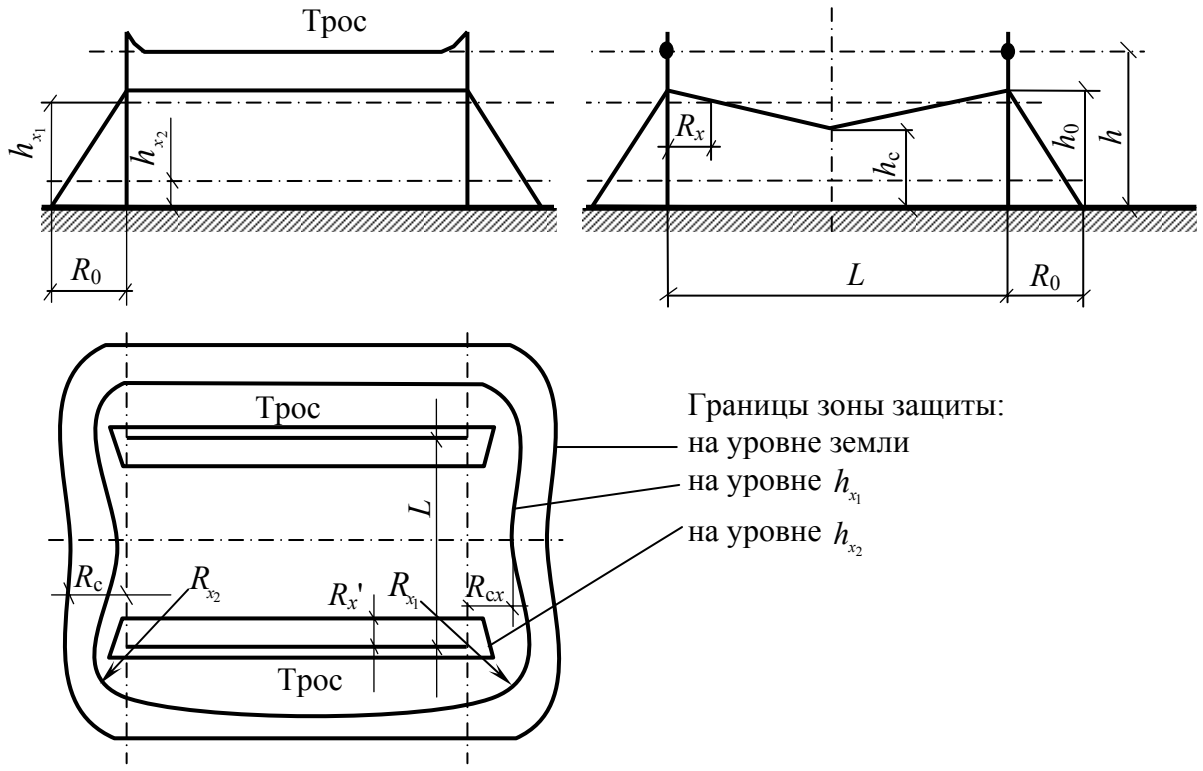


Рис. 8.18. Зона защиты двойного тросового молниеотвода

Зона типа Б (существует при $L \le 6h$):

при $L \le h$

$$h_c = h_0;\ R_{cx} = R_x;\ R_c = R_0; \tag{8.41}$$

при $h < L \le 6h$

$$\left.\begin{aligned} h_c &= h_0\text{-}0{,}12(L\text{-}h);\\ R_x' &= L/2[(h_0\text{-}h_x)/(h_0\text{-}h_c)];\\ R_c &= R_0;\ R_{cx} = R_0(h_c\text{-}h_x)/h_c. \end{aligned}\right\} \tag{8.42}$$

При известных h_c и L ($R_{cx} = 0$) высота тросового молниеотвода для зоны Б определяется по формуле

$$h = (h_c+0{,}12h)/1{,}06. \tag{8.43}$$

Зона защиты одиночных стержневых молниеотводов высотой $150 < h < 600$ м имеет следующие габаритные размеры.

Зона типа А:

$$h_0 = [0{,}85\text{-}1{,}7\cdot 10^{-3}(h\text{-}150)]/h; \tag{8.44}$$

$$R_0 = [0{,}8\text{-}1{,}8\cdot 10^{-3}(h\text{-}150)]/h; \tag{8.45}$$

$$R_x = [0{,}8\text{-}1{,}8\cdot 10^{-3}(h\text{-}150)]/h\left\{1-\frac{h_x}{[0{,}85-1{,}7\cdot 10^{-3}(h-150)]/h}\right\}. \tag{8.46}$$

Зона типа Б:

$$h_0 = [0{,}92\text{-}0{,}8\cdot 10^{-3}(h\text{-}150)]/h; \tag{8.47}$$

$$R_0 = 225 \text{ м}; \tag{8.48}$$

$$R_x = 225-\frac{225h_x}{[0{,}92-0{,}8\cdot 10^{-3}(h-150)]/h}. \tag{8.49}$$

На сегодняшний день объем фактических данных о поражаемости нисходящими молниями объектов большой высоты (более 150 м) очень мал и в большей своей части относится к Останкинской телевизионной башне. На основании фоторегистраций поражаемости нисходящими молниями башни утверждается [2], что нисходящие молнии прорываются более чем на 200 м ниже ее вершины и поражают землю на расстоянии около 200 м от основания башни. Рассматривая Останкинскую телевизионную башню как стержневой молниеотвод, можно сделать вывод, что относительные размеры зон защиты молниеотводов высотой более 150 м резко сокращаются с увеличением высоты молниеотвода. С учетом ограниченности фактических данных о поражаемости сверхвысоких объектов в РД [2] включены формулы (8.44 ÷ 8.49) для построения зон защиты только для стержневых молниеотводов.

8.5. ЗАЩИТА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ОТ ПРЯМЫХ УДАРОВ МОЛНИИ

Защита зданий и сооружений I категории

Защиту от прямых ударов молнии выполняют отдельно стоящими стержневыми (рис. 8.19) или тросовыми молниеотводами (рис. 8.20). Тем самым резко снижаются перенапряжения между элементами здания и вероятность искрения. Молниеотводы должны обеспечивать зону защиты типа А. При ударе молнии в молниеотвод высокий потенциал приобретает все его части. Возникающие при этом разности потенциалов могут оказаться достаточными для пробоя изоляции между токоотводом и частями здания или пробоя в земле между заземлителем молниеотвода и подземными металлическими коммуникациями, связанными со зданием.

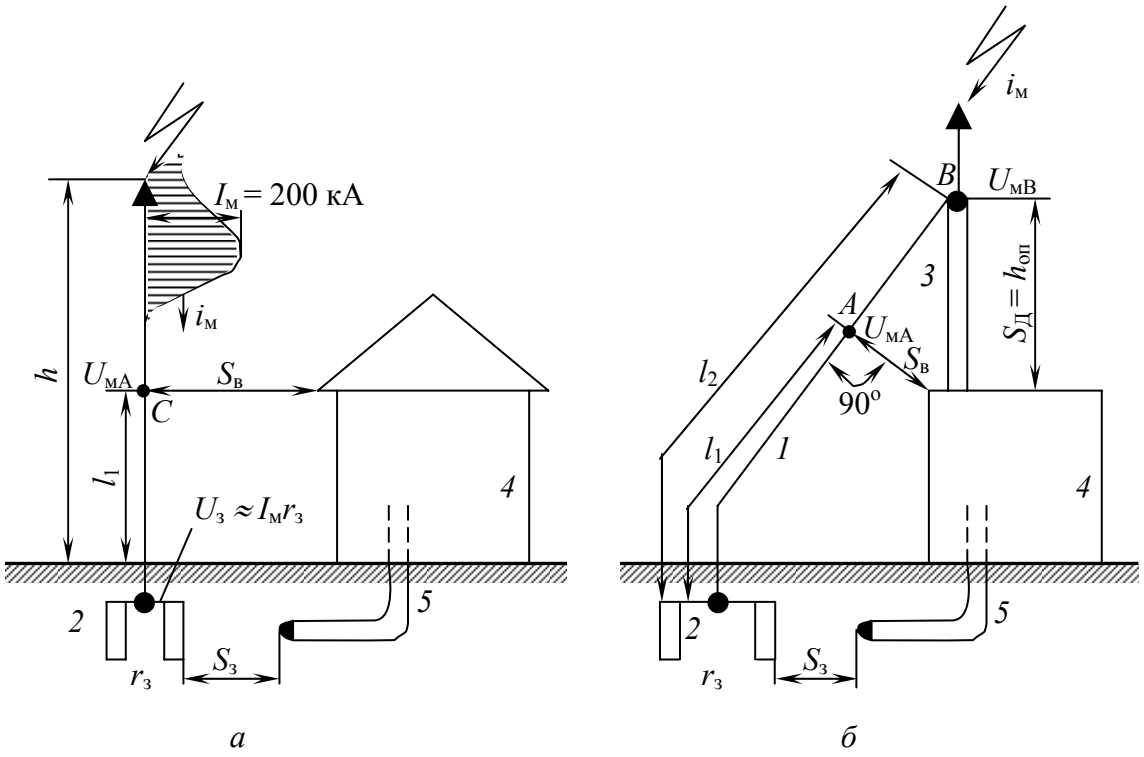


Рис. 8.19. Расчетная схема определения безопасных расстояний от отдельно стоящего стержневого молниеотвода до сооружения:
а - отдельно стоящий стержневой молниеотвод; *б* – изолированный молниеотвод на здании; *1* - токоотвод; *2* – заземлитель; *3* – опора изолированного молниеотвода; *4* – сооружение I категории; *5* – металлическая коммуникация

В связи с этим одним из основных элементов расчета молниезащиты здания I категории является определение минимально допустимых расстояний от молниеотвода до защищаемого здания. Они определяются по воздуху или земле на основании расчета потенциалов в тех точках, где может произойти наиболее вероятное перекрытие на здание. Согласно рис. 8.19 и 8.20, такими точками могут быть *C*, *A* и *B*. Потенциал этих точек зависит от

величины амплитуды и крутизны тока, индуктивного или волнового сопротивления токоотвода, от длины участков $l_А$ и $l_Б$ и от сопротивления заземлителя $r_з$ поскольку оно включено последовательно с этими участками.

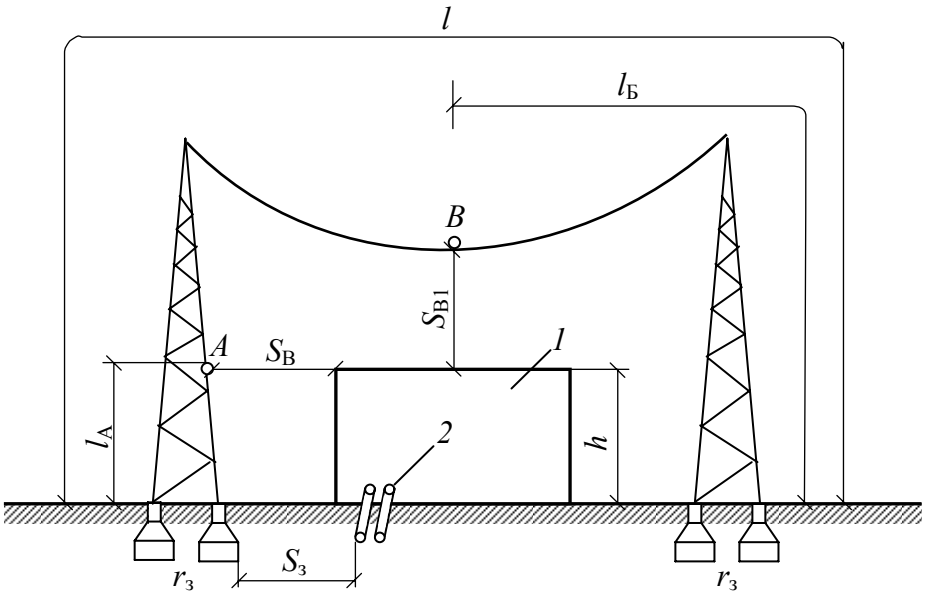


Рис. 8.20. Расчетная схема для определения безопасных расстояний от отдельно стоящего тросового молниеотвода до сооружения:
1 – защищаемый объект; *2* – металлические коммуникации

Выбор заземлителя защиты от прямых ударов молнии (естественного или искусственного) определяется общими требованиями, изложенными в параграфе 8.4 «Заземляющие устройства». При этом для отдельно стоящих молниеотводов приемлемыми являются варианты, приведенные в табл. 8.1, с учетом следующих уточнений:

а) один (и более) железобетонный подножник длиной не менее 2 м или одна (и более) железобетонная свая длиной не менее 5 м;

б) одна (и более) заглубленная в земле не менее чем на 5 м стойка железобетонной опоры диаметром не менее 0,25 м;

в) железобетонный фундамент произвольной формы с площадью поверхности контакта с землей не менее 10 м^2;

г) искусственный заземлитель, состоящий из трех и более вертикальных электродов длиной не менее 3 м, объединенных горизонтальным электродом, при расстоянии между вертикальными электродами не менее 5 м. Минимальные сечения (диаметры) электродов принимаются: круглые вертикальные диаметром не менее 10 мм; прямоугольные не менее 160 мм^2, при толщине не менее 4 мм.

Наименьшее допустимое расстояние $S_в$ по воздуху от защищаемого объекта до опоры (токоотвода) стержневого или тросового молниеотвода

(см. рис. 8.19 и 8.20) определяется в зависимости от высоты здания, конструкции заземлителя и эквивалентного удельного сопротивления грунта.

Для зданий и сооружений высотой не более 30 м наименьшее допустимое расстояние $S_в$, м, определяется по табл. 8.2.

Таблица 8.2

$S_в$, м (рис. 8.19 и 8.20)	ρ, Ом·м	Вариант конструкции заземлителя
3	$\rho \le 100$	1. Заземлитель любой конструкции (см. пп. а-г)
$3 + 10^{-2}(\rho - 100)$	$100 < \rho \le 1000$	2. Одна железобетонная свая либо подножник или углубленная стойка железобетонной опоры, длины которых указаны в пп. а, б
4		3. Четыре железобетонные сваи или подножники, расположенные в углах прямоугольника на расстоянии 3-8 м один от другого, или железобетонный фундамент произвольной формы с площадью поверхности контакта с землей не менее 70 м^2, или искусственный заземлитель, указанный в п. г

Для зданий и сооружений большей высоты определенное по табл. 8.2 $S_в$ должно быть увеличено на 1 м в расчете на каждые 10 м высоты объекта сверх 30 м.

Наименьшее допустимое расстояние $S_{в1}$ от защищаемого объекта до троса в середине пролета (рис. 8.20) определяется в зависимости от конструкции заземлителя, эквивалентного удельного сопротивления грунта ρ и суммарной длины l молниеприемников и токоотводов.

При длине $l < 200$ м наименьшее допустимое расстояние $S_{в1}$ определяется по табл. 8.3.

Таблица 8.3

$S_{в1}$, м (рис. 8.19)	ρ, Ом·м	Вариант конструкции заземлителя
3,5	$\rho \le 100$	Заземлитель любой конструкции (см. пп. а-г)
$3,5 + 3\cdot10^{-3}(\rho - 100)$	$100 < \rho \le 1000$	Заземлитель по варианту 2 (табл. 8.2)
4		Заземлитель по варианту 3 (табл. 8.2)

При суммарной длине молниеприемников и токоотводов l=200-300 м наименьшее допустимое расстояние $S_{в1}$ должно быть увеличено на 2 м по сравнению с определенными по табл. 8.3.

Для исключения заноса высокого потенциала в защищаемое здание или сооружение по подземным металлическим коммуникациям любого назначения заземлители защиты от прямых ударов молнии должны быть удалены от этих коммуникаций на максимальные расстояния, допустимые по технологическим требованиям.

Наименьшие допустимые расстояния $S_з$ (см. рис. 8.19 и 8.20) в земле должны составлять $S_з = S_в + 2$(м), при $S_в$ по табл. 8.3.

Зоны взрывоопасности. Для зданий и сооружений, имеющих газоотводные трубы, свечи или вентиляционные устройства, через которые происходит выброс взрывоопасных смесей горючих газов и паров в атмосферу, молниеотводы надо располагать так, чтобы контакт молнии с молниеприемником происходил вне пределов взрывоопасной зоны, которая должна вписываться в зону защиты молниеотвода. Необходимость выполнения этого требования тем более очевидна, если газоотводные или дыхательные трубы не имеют огнепреградителей. Размеры зон взрывоопасности, полученные исследованиями [3] и по инструкции [2], приведены в табл. 8.4

Таблица 8.4

Избыточное давление внутри установки, кПа	Плотность газа	Зоны взрывоопасности от обреза трубы, ограниченные цилиндром высотой H и радиусом R, м
Не более 5,05 (0,05 ат.)	Тяжелее воздуха	$H = 1$ м, $R = 2$ м
От 5,05 до 25,25 (0,05-025 ат.)	То же	$H = 2{,}5$ м, $R = 5$ м
Не более 25,25	Легче воздуха	$H = 2{,}5$ м, $R = 5$ м
Свыше 25,25	Любая	$H = 5$ м, $R = 5$ м

В табл. 8.4 зоны взрывоопасности от обреза трубы приведены при наличии конических колпаков, или «гусаков», над газоотводными или дыхательными трубами. Для газоотводных и дыхательных труб, не оборудованных коническими колпаками, зоной взрывоопасности является пространство над их обрезом, ограниченное полушарием радиусом 5 м. Оно должно входить в зону защиты молниеотвода. Размеры зоны взрывоопасности установлены независимо от избыточного давления взрывоопасной установки и наличия огнепреградителей на газоотводных трубах.

Молниезащита с учетом зон взрывоопасности не обязательна: для труб аварийного выброса горючих газов; труб с постоянно горящими факелами, поджигаемыми в момент выброса газов; при выбросе газов невзрывоопасной концентрации или при азотном дыхании технологических аппаратов; для вентиляционных шахт, предохранительных и аварийных клапанов, выброс газов взрывоопасной концентрации из которых осуществляется только в аварийных случаях.

Защита зданий и сооружений II категории

Защиту от прямых ударов молнии зданий и сооружений с металлической кровлей выполняют отдельно стоящими или установленными на зданиях неизолированными стержневыми, либо тросовыми молниеотводами,

обеспечивающими тип зоны в зависимости от количества поражений (см. параграф 8.3, формула (8.7)). От каждого стержневого молниеприемника или от каждой стойки тросового молниеотвода на здании прокладывают два токоотвода. При использовании сосредоточенных заземлителей они должны быть проложены по противоположным сторонам зданий.

При уклоне кровли не более 1/8 может быть использована также молниеприемная сетка.

Молниеприемная сетка должна быть выполнена из стальной проволоки диаметром не менее 6 мм и уложена на кровлю сверху или под несгораемые или трудносгораемые утеплитель или гидроизоляцию. Шаг ячеек сетки должен быть не более 6×6 м. Узлы сетки соединяются сваркой. Выступающие над крышей металлические элементы (трубы, шахты, вентиляционные устройства) необходимо присоединять к молниеприемной сетке, а выступающие неметаллические элементы – оборудовать дополнительными молниеприемниками, присоединяемыми к молниеприемной сетке.

На зданиях и сооружениях с металлической кровлей в качестве молниеприемника необходимо использовать металлическую кровлю. При этом все выступающие неметаллические элементы необходимо оборудовать молниеприемниками, присоединяемые к металлу кровли.

Установка молниеприемников или наложение молниеприемной сетки не требуется для зданий и сооружений, имеющих металлические фермы, при условии, что в их кровлях используются несгораемые или трудносгораемые утеплители и гидроизоляция. Металлические фермы необходимо соединить токоотводами с заземлителями.

Токоотводы, соединяющие молниеприемную сетку или металлическую кровлю с заземлителями, прокладываются не реже чем через 25 м по периметру здания. Токоотводы, прокладываемые по наружным стенам зданий, следует располагать не ближе чем на 3 м от входа или в местах, недоступных для прикосновения к ним людей.

При использовании молниеприемной сетки и установке молниеприемников на защищаемом объекте, всюду, где возможно, в качестве токоотводов следует использовать металлические конструкции зданий и сооружений (колонны, фермы, рамы, металлические направляющие лифтов и т.п., а также арматуру железобетонных конструкций) при условии обеспечения непрерывной электрической связи в соединениях конструкций и арматуры с молниеприемниками и заземлителями, выполняемых, как правило, сваркой.

В качестве заземлителей защиты от прямых ударов молнии следует использовать железобетонные фундаменты зданий и сооружений (см. параграф 8.4 «Заземляющие устройства»). При невозможности такого варианта предусматриваются искусственные заземлители:

при наличии стержневых и тросовых молниеотводов каждый токоотвод присоединяют к заземлителю, отвечающему требованиям варианта 4 табл. 8.1;

при наличии молниеприемной сетки или металлической кровли по периметру здания или сооружения прокладывается наружный контур следующей конструкции:

в грунтах с эквивалентным удельным сопротивлением $\rho \leq 500$ Ом·м при площади здания более 250 м^2 выполняется контур из горизонтальных электродов, уложенных в земле на глубине не менее 0,5 м, а при площади здания менее 250 м^2 к этому контуру в местах присоединения токоотводов приваривается по одному вертикальному или горизонтальному лучевому электроду длиной 2-3 м;

в грунтах с $500 < \rho \leq 1000$ Ом·м при площади здания более 900 м^2 достаточно выполнить контур только из горизонтальных электродов, а при площади здания менее 900 м^2 к этому контуру в местах присоединения токоотводов приваривается не менее двух вертикальных или горизонтальных лучевых электродов длиной 2-3 м на расстоянии 3-5 м один от другого.

В зданиях большой площади (шириной более 100 м) наружный контур заземления может использоваться и для выравнивания потенциала внутри здания.

Во всех возможных случаях заземлитель защиты от прямых ударов молнии необходимо объединять с заземлителями электроустановок.

При установке отдельно стоящих молниеотводов расстояние от них по воздуху и в земле до защищаемого объекта и вводимых в него подземных коммуникаций не нормируется.

Для зданий и сооружений, имеющих газоотводные трубы и свечи, молниезащита проектируется с учетом зон взрывоопасности, как и для зданий I категории.

Защита взрывоопасных наружных технологических установок и открытых складов

Защита указанных в заголовке сооружений от прямых ударов молнии определяется рядом условий и специфических особенностей: материалом корпуса (металл, железобетон или синтетика); наличием дыхательной и предохранительной аппаратуры и возможностью выделения через нее (или неплотности крыши) горючих паров и газов и образования зон взрывоопасности; наличием большого количества горючих и легковоспламеняющихся жидкостей или горючих газов и т.д. [2]. Так, для защиты от прямых ударов молнии металлических установок или отдельных резервуаров при толщине металла крыши 4 мм и более и отсутствии дыхательных клапанов, а также отдельных резервуаров объемом меньше 200 м^3 (независимо от толщины металла) достаточно заземлить корпус.

Технологические установки и резервуары при толщине металла крыши 4 мм защищают отдельно стоящими или устанавливаемыми на них молниеотводами. Установки класса В-1г, корпуса которых выполнены из железобетона или синтетических материалов, защищают любым молниеотводом или укладывают на крышу молниеприемную сетку, присоединяя ее к заземлителю. Она допускается только при полной герметичности крыши.

Парк резервуаров со сжиженными газами при общем объеме более 8 тыс. $м^3$, а также парки резервуаров из любого материала с общим объемом более 100 тыс. $м^3$ защищают от прямых ударов молнии, как правило, отдельно стоящими молниеотводами. При защите металлических резервуаров отдельно стоящими молниеотводами корпуса резервуаров присоединяют к заземлителям; к этим же заземлителям допускается присоединение токоотводов отдельно стоящих молниеотводов. Парки подземных железобетонных резервуаров (класса В-1г), не облицованных внутри металлом, защищают только отдельно стоящими молниеотводами. В зону защиты молниеотводов должны входить: вся площадь крыши резервуаров и часть площади круга с радиусом 40 м от стенок крайних резервуаров. Высота молниеотводов должна быть равна высоте дыхательной аппаратуры плюс 2,5 м.

Парки подземных железобетонных резервуаров, содержащих мазут, при подмешивании к нему легких углеводородов и при подогреве должны защищаться от прямых ударов молнии также, как и подземные железобетонные резервуары с ЛВЖ, однако в зону защиты необходимо включать пространство с основанием, совпадающим с размерами резервуаров. Если на наружных технологических установках или резервуарах класса В-1г имеются газоотводные трубы, дыхательные или предохранительные клапаны, то они и зоны взрывоопасности около них также должны входить в зону защиты молниеотводов.

Исследованиями установлено, что размеры взрывоопасных зон для наземных вертикальных резервуаров со стационарными крышами и емкостью от 3 до 20 тыс. $м^3$ зависят в основном от мощности выброса паров и газов и скорости ветра. Эти зоны можно определить по графику (рис. 8.21). На нем размеры взрывоопасных зон $X_м$ соответствуют скорости ветра 1 м/с. При увеличении скорости ветра до 2 м/с размеры взрывоопасных зон можно уменьшить в 2 раза. При пользовании графиком следует иметь в виду: нулевой размер зоны означает, что вся площадь крыши резервуара является взрывоопасной зоной; размеры взрывоопасных зон для резервуаров, заполняемых сырой нефтью, могут быть уменьшены на 10 % по сравнению с зонами соответствующих бензинов. Для других наружных технологических установок класса В-1г, имеющих газоотводные и дыхательные трубы, размеры взрывоопасных зон определяются по табл. 8.4 и нормам [2].

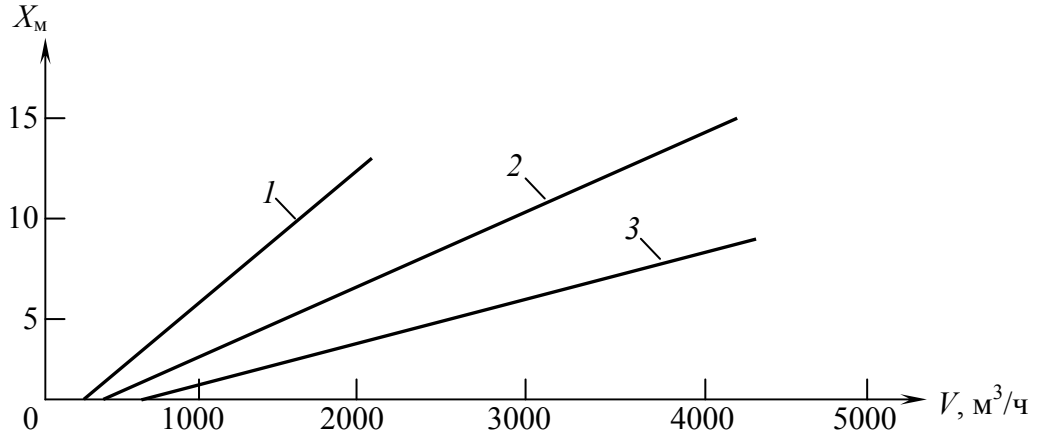


Рис. 8.21. Размеры взрывоопасных зон для вертикальных резервуаров:
1 – нестабильные бензины (для них *V* – мощность выбросов паров и газов); *2* – стабильные бензины при $t = 40$ °С; *3* – стабильные бензины при $t = 20$ °С (для стабильных бензинов *V* – производительность закачки)

Такое же пространство защищается над срезом горловины цистерн, в которые происходит открытый (негерметизированный) налив продукта на сливной эстакаде. Защите от прямых ударов молнии подлежат также дыхательные клапаны и пространство над ними, ограниченное цилиндром высотой 2,5 м с радиусом 5 м.

Для резервуаров с плавающими крышами или понтонами в зону защиты молниеотводов должно входить пространство, ограниченное поверхностью, любая точка которой отстоит на 5 м от легковоспламеняющейся жидкости в кольцевом зазоре.

Очистные сооружения защищают от прямых ударов молнии в том случае, когда температура вспышки содержащегося в сточных водах продукта превышает его рабочую температуру менее чем на 10 °С. В зону защиты молниеотводов должно входить пространство, основание которого выходит за пределы очистного сооружения на 5 м в каждую сторону от его стенок, а высота равна высоте сооружения плюс 3 м.

Для всех наружных взрывоопасных установок в качестве заземлителей защиты от прямых ударов молнии следует, по возможности, использовать их железобетонные фундаменты или опоры отдельно стоящих молниеотводов, либо выполнять искусственные заземлители, состоящие из одного вертикального или горизонтального электрода длиной не менее 5 м. К этим заземлителям должны присоединяться корпуса наружных установок или токоотводы установленных на них молниеприемников.

Число присоединений и соответственно количество заземлителей зависит от периметра основания установки. Необходимо, чтобы присоединения располагались не более чем в 50 м друг от друга, но число присоединений должно быть не менее двух.

Защита зданий и сооружений III категории

Защита от прямых ударов молнии обычно выполняется одним из способов, рекомендуемых для II категории. Отличием является лишь то, что площадь ячейки молниеприемной сетки допускается с шагом не более 12×12 м.

В качестве заземлителей защиты от прямых ударов молнии следует использовать железобетонные фундаменты зданий и сооружений. При невозможности их использования выполняют искусственные заземлители:

каждый токоотвод от стержневых и тросовых молниеприемников должен присоединяться к заземлителю, состоящему минимум из двух вертикальных электродов длиной не менее 3 м, объединенных горизонтальным электродом длиной не менее 5 м;

при варианте применения молниеприемной сетки или использования металлической кровли в качестве молниеприемников по периметру здания в земле на глубине 0,5 м прокладывается наружный контур, состоящий из горизонтальных электродов. В грунтах с $500 < \rho \leq 1000$ Ом·м и при площади здания менее 900 м^2 к этому контуру в местах присоединения токоотводов следует приваривать по одному вертикальному или горизонтальному лучевому электроду длиной 2-3 м.

В зданиях большей площади (шириной более 100 м) наружный контур заземления может также использоваться для выравнивания потенциалов внутри здания.

Молниезащиту пожароопасных наружных установок класса П-III, содержащих горючие жидкости с температурой вспышки паров выше 61 °С, рекомендуется выполнять следующим образом:

корпуса установок из железобетона, а также корпуса установок и резервуаров при толщине крыше менее 4 мм оборудуются отдельно стоящими или установленными на защищаемом сооружении молниеотводами;

металлические корпуса установок и резервуаров при толщине крыши 4 мм и более достаточно присоединить к заземлителю;

над дыхательными и газоотводными трубами и клапанами зона взрывоопасности не учитывается.

Конструкция заземлителей и их число принимаются как для взрывоопасных наружных установок класса В-1г.

8.6. ЗАЩИТА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ОТ ВТОРИЧНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ МОЛНИИ

Защите от вторичных воздействий молнии (электростатической и электромагнитной индукции) подлежат здания и сооружения I и II категории и некоторые виды наружных установок классов В-1г и П-III. Она почти всегда сочетается с защитой от статического электричества.

Защита зданий I категории от электростатической индукции выполняется присоединением металлических корпусов всего оборудования и металлических конструкций здания к защитному заземлителю электроустановок, железобетонному фундаменту или специальному заземлителю, а расстояние от этих заземлителей до заземлителей молниеотводов определяется по параграфу 8.5.

Для защиты от искрения, обусловленного электромагнитной индукцией, все трубопроводы и другие протяженные металлические предметы здания и оборудования на участке их взаимного сближения на 10 см и меньше необходимо электрически соединять перемычками через каждые 20 м. Для кабелей с металлическими оболочками или броней перемычки должны выполняться из гибкого медного проводника в соответствии с указаниями СНиП 3.05.06-85. Необходимо также обеспечить переходное сопротивление каждого электрического контакта не более 0,03 Ом во всех местах соединений трубопроводов (например, на фланцах) и других протяженных предметов. Если переходное сопротивление более 0,03 Ом, то на соединении устраивается перемычка.

Защита от опасности заноса высокого потенциала по линиям электропередачи напряжением до 1000 В сетей телефона, радио, сигнализации и др. обеспечивается тем, что ввод воздушных линий в здания должен осуществляться только кабелями длиной не менее 50 м с металлической броней или оболочкой или кабелями, проложенными в металлических трубах. На вводе в здание металлические трубы, броня и оболочки кабелей, в том числе с изоляционным покрытием металлической оболочки (например, ААШв, ААШп), должны быть присоединены к железобетонному фундаменту здания или к искусственному заземлителю по варианту 4 табл. 8.1.

В месте перехода воздушной линии в кабельную вставку металлические оболочки и броня кабеля, а также штыри или крючья изоляторов должны присоединяться к заземлителю по варианту 4 табл. 8.1. В этом же месте между каждой жилой кабеля и заземленными элементами должны быть устроены закрытые воздушные искровые промежутки с межэлектродным расстоянием 2-3 мм или установлен низковольтный разрядник, например РВН-0,5. У следующей ближайшей опоры воздушной линии - также заземлитель и к нему должны быть присоединены штыри и крючья изоляторов.

Для защиты от заносов высоких потенциалов по подземным металлическим коммуникациям (трубопроводы, кабели в наружных металлических оболочках и трубах) при вводе в здание или сооружение эти коммуникации присоединяют к арматуре их железобетонных фундаментов, к заземлителю электроустановок или специальному заземлителю (вариант 4 табл. 8.1).

В здание допускается вводить трубопроводы и кабели, монтируемые на эстакадах. У ввода в здание и на двух ближайших к этому вводу опорах

эстакады трубопроводы и металлические оболочки кабелей присоединяют к заземлителям. В качестве заземлителей следует использовать железобетонные фундаменты здания и каждой из опор, а при невозможности - искусственные заземлители.

Защита зданий II категории от электростатической индукции обеспечивается присоединением металлических корпусов всего оборудования к защитному заземлению электроустановок или железобетонному фундаменту здания. Плавающие крыши (понтоны) резервуаров в установках классов В-1г и П-III независимо от материала крыш и корпусов резервуаров соединяют гибкими металлическими перемычками с токоотводами или металлическим корпусом не менее чем в двух точках. Защита от электромагнитной индукции выполняется как и в зданиях I категории, но перемычки устанавливаются через 30 м в местах опасного сближения. Перемычки в местах соединений (на фланцах) трубопроводов и других протяжных конструкций не требуются.

Ввод воздушных линий любого назначения непосредственно в здание не допускается. Необходимо прокладывать кабельную вставку от воздушных линий, как и для I категории. Для защиты от заноса высоких потенциалов по подземным коммуникациям при вводе в здание или сооружение их необходимо присоединить к любому из заземлителей. Эстакадные трубопроводы на вводе в здание следует подключать к заземлителю электроустановок или заземлителю молниеотвода, а на ближайшей к вводу опоре эстакады - к ее железобетонному фундаменту.

При невозможности использования фундамента должен быть установлен искусственный заземлитель, состоящий из одного вертикального или горизонтального электрода длиной не менее 5 м.

Защита зданий III категории. Ввод воздушных линий напряжением до 1000 В в здания должен выполняться в соответствии с ПУЭ, а линии связи, сигнализации, радио - по указаниям соответствующих ведомств.

Для защиты от заноса высоких потенциалов трубопроводы и металлические оболочки кабелей, проложенные на эстакадах, следует присоединять на вводе в здание к заземлителям молниеотводов или к защитному заземлению электроустановок.

8.7. ЭКСПЛУАТАЦИЯ УСТРОЙСТВ МОЛНИЕЗАЩИТЫ

Испытания и приемка в эксплуатацию устройств молниезащиты

Устройства молниезащиты должны быть заложены в проект и график строительства или реконструкции здания или сооружения таким образом, чтобы выполнение молниезащиты происходило одновременно с основными строительно-монтажными работами.

Устройства молниезащиты зданий и сооружений от прямых ударов молнии, электростатической и электромагнитной индукции и заноса высоких потенциалов должны быть испытаны и введены в эксплуатацию к началу отделочных работ, а при наличии взрывоопасных зон (I и II категории) - до начала комплексного опробования технологического оборудования. При этом оформляется и передается заказчику скорректированная при строительстве и монтаже проектная документация по устройству молниезащиты (чертежи и пояснительная записка) и акты приемки устройств молниезащиты, в том числе акты по выполнению малодоступных элементов (молниеприемников, их креплений на сооружении), акты на скрытые работы по присоединению заземлителей к токоотводам и токоотводов к молниеприемникам, за исключением случаев использования стального каркаса здания в качестве токоотводов и молниеприемников, а также результаты замеров сопротивлений току промышленной частоты заземлителей отдельно стоящих молниеотводов.

Приемка в эксплуатацию устройств молниезащиты производится комиссией в составе представителей заказчика, генподрядной и монтажной организаций, представителя местных органов Госгортехнадзора (для объектов надзора, поднадзорных Госгортехнадзору), представителя органов госпожнадзора и др. (примерный состав). Вся техническая документация по окончании приемки устройств молниезащиты передается организации, ведущей ее эксплуатацию. В акте приемки-сдачи следует указывать гарантийный срок работы устройств молниезащиты.

Контроль состояния и обслуживание устройств молниезащиты

Эффективность действия устройств молниезащиты в значительной степени зависит от исправного технического состояния всех элементов.

Контроль за состоянием устройств молниезащиты и проведение ремонта и технического обслуживания должны проводиться по системе планово-предупредительных ремонтов и осмотров.

Проверка состояния устройств молниезащиты должна производиться для зданий и сооружений I и II категории - один раз в год перед началом грозового сезона; для зданий и сооружений III категории - один раз в 3 года. Цель ревизии следующая:

проверить надежность электрической связи между токоведущими элементами (в местах сварки, в болтовых и прочих соединениях);

выявить элементы в защитных устройствах, требующие замены или усиления из-за механических повреждений;

определить степень разрушения коррозией отдельных элементов молниезащиты, принять меры по антикоррозийной защите и усилению элементов, поврежденных коррозией;

проверить соответствие устройств молниезащиты категории здания или установки;

измерить сопротивление всех заземлителей отдельно стоящих молниеотводов.

При превышении сопротивления заземлителя более чем в 5 раз, по сравнению с результатами соответствующих замеров на стадии приемки, следует проводить полную ревизию заземлителя.

На основании ревизий определяют объем предупредительного ремонта устройств молниезащиты, который должен быть закончен к началу грозового сезона (март - для южных и апрель - для центральных районов РФ). Мелкие текущие ремонты молниезащитных устройств могут быть произведены во время грозового сезона, капитальные - в негрозовое время года.

Недостаточно квалифицированный надзор за состоянием и соответствием молниезащиты требованиям пожарной безопасности приводит к тому, что строительно-монтажные и технологические изменения на объекте повышают степень его пожаровзрывоопасности, а молниезащита остается без изменений.

Высококвалифицированный надзор за молниезащитными устройствами может быть достигнут на таких объектах, на которых в составе электроцеха создана специальная группа или бригада, занимающаяся вопросами эксплуатации молниезащитных устройств и устройств по защите от статического электричества. Главный энергетик (или начальник электроцеха) должен разработать инструкцию по эксплуатации указанных устройств, учитывающую все конкретные особенности объекта. Лица, проводящие ревизию молниезащиты, должны составлять акт осмотра и проверки с указанием обнаруженных дефектов. Результаты ревизий молниезащитных устройств по защите от разрядов статического электричества, проверочных испытаний заземляющих устройств, ремонтов и т.д. заносятся в эксплуатационный журнал произвольной формы.

После каждой грозы следует тщательно осмотреть все устройства молниезащиты в целях выявления повреждений. Обнаруженные неисправности и дефекты заносятся в акт осмотра и устраняются.

Глава 9

ЗАЩИТА ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ ОТ РАЗРЯДОВ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Ряд производственных процессов с участием твердых, жидких или газообразных диэлектрических сред сопровождается статической электризацией, т.е. возникновением и разделением положительных и отрицательных зарядов. Иногда эти заряды быстро стекают в землю, рассеиваются или нейтрализуются. В других случаях они накапливаются и создают поле с высокой электрической напряженностью, обусловливающее электрические разряды (пробои воздуха или среды). В производствах, связанных с применением легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, газов с наличием горючих пылей и волокон, искровые разряды статического электричества могут вызвать взрыв и пожар. В некоторых случаях статическое электричество приводит к браку продукции, препятствует увеличению скорости работы машин и аппаратов и, следовательно, повышению производительности труда. При определенных условиях разряды статического электричества причиняют травмы обслуживающему персоналу.

9.1. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ

Возникновение статического электричества – сложный процесс, зависящий от множества факторов, и в настоящее время нет еще единой теории, объясняющей это явление. Наиболее распространена гипотеза о контактной электризации веществ и материалов. Согласно этой гипотезе, электризация возникает при соприкосновении двух разнородных веществ, обладающих различными атомными и молекулярными силами притяжения на поверхности соприкосновения. Одна из контактирующих поверхностей должна быть из диэлектрического материала. При этом происходит перераспределение электронов или ионов веществ, образующее двойной электрический слой с зарядами противоположных знаков.

Однако образование двойных электрических слоев возможно при контакте тел и из одинаковых диэлектрических материалов за счет наличия на их поверхностях загрязнений, различной температуры тел и т.д. Находящиеся в контакте тела с образовавшимся на границе раздела двойным электрическим слоем остаются электрически нейтральными, т.е. суммарный заряд системы может быть равен нулю, если до соприкосновения тела не несли избыточного заряда. Каждое из контактирующих тел приобретает электрический заряд, плотность которого равна плотности заряда, возникшего двойного электрического слоя. Знаки зарядов взаимодействующих тел противоположны. Заряды будут оставаться на поверхности тел после

их разделения, если время разрушения контакта между ними будет меньше времени релаксации зарядов.

При оценке наэлектризованности пользуются удельной поверхностной (у твердых диэлектриков) или объемной (у сыпучих и жидких диэлектриков) плотностью заряда, а в некоторых случаях удельным зарядом, приходящимся на единицу длины. Наэлектризованные тела или их участки, несущие заряды статического электричества, оказывают силовое воздействие друг на друга. В окружающем их пространстве образуется электрическое поле, действие которого проявляется и обнаруживается при внесении в него заряженных и нейтральных предметов. Основными параметрами, характеризующими электрическое поле зарядов, являются напряженность электрического поля и потенциалы его отдельных точек.

Контактная разность потенциалов не одинакова и зависит от диэлектрических свойств соприкасающихся материалов, их физического состояния, величины давления поверхностей друг на друга, а также от влажности, температуры поверхности и окружающей среды. При разделении поверхностей с возникшей контактной электризацией каждая из них сохраняет свой заряд, а контактная разность потенциалов по мере уменьшения емкости между поверхностями может достичь десятков и сотен киловольт. Так, при максимальной плотности (30 мкКл/м^2 и более) увеличение расстояния между наэлектризованными поверхностями на 1 см повышает разность потенциалов на десятки киловольт. Этим и объясняются высокие потенциалы, встречающиеся в производстве. Экспериментами установлено также, что из двух трущихся веществ положительно заряжается то, у которого диэлектрическая проницаемость больше. Если вещества имеют одинаковую диэлектрическую проницаемость, то заряды не возникнут. В ряде технологических процессов потенциал относительно земли (или проводящих металлических тел, связанных с землей) при статической электризации достигает десятков киловольт. Ниже приведены потенциалы от электрического поля статического электричества, кВ.

В кинофотопленочной промышленности	15 и выше
На предприятиях резиновой промышленности и искусственной кожи	10-15
В производствах, связанных с размолом, тонким добавлением и т.д.	10-15
При разбрызгивании красок	10
При трении целлулоида	40
При движении резиновой ленты транспортера (со скоростью 4 м/с)	45
При фильтрации смеси бензина с асфальтом через шелк	335

Токи при статической электризации составляют обычно несколько микроампер и даже меньше. Так, при протекании к цистернам бензина по трубопроводу был измерен ток от 1 до 10 мкА и этот ток оказался прямо пропорционален скорости течения бензина.

Статическое электричество может накапливаться и на людях, особенно если на человеке обувь с непроводящими электричество подошвами, одежда и белье из шерсти, шелка и искусственного волокна, а также при движении по токонепроводящему полу и при выполнении ручных операций с диэлектриками. Потенциал изолированного от земли тела человека может превышать 7 кВ. Иногда (в зависимости от вида полимера и интенсивности трения частей костюма) этот потенциал может достигать 14-45 кВ.

Гипотеза о контактной разности потенциалов не может дать количественной, а иногда и качественной оценки процесса электризации. Однако наряду с этой гипотезой имеются и другие, где образование двойного электрического слоя объясняется поверхностной ориентацией нейтральных молекул, содержащих электрические диполи, пьезоэлектрическими явлениями, трением или образованием электролита на контактирующих поверхностях и т.д. Таким образом, при статической электризации могут наблюдаться процессы, которые пока еще изучены недостаточно, поэтому для борьбы со статическим электричеством в конкретных условиях требуются предварительные экспериментальные исследования и проверка предложенных защитных мер.

9.2. ВОСПЛАМЕНЯЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ИСКР СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И ЕГО ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

Когда на разделенных поверхностях веществ образуются электрические заряды Q и эти поверхности становятся пластинами конденсатора с емкостью C, между ними возникает напряжение U, равное

$$U = Q / C, \tag{9.1}$$

где U – напряжение, В; C – емкость, Ф; Q – заряд, Кл.

Энергия искры ($W_{и}$, Дж), способной возникнуть под действием этого напряжения (или напряжения между пластиной и каким-либо заземленным предметом), может быть оценена по запасенной конденсатором энергии

$$W_{и} = 0{,}5\ CU^2, \tag{9.2}$$

поэтому воспламеняющую способность искровых зарядов характеризуют в основном их энергией. Однако формула (9.2) не может быть использована для расчета энергии разряда между заряженными диэлектрическими поверхностями, так как только часть накопленного заряда на диэлектрике может быть перенесена в разряде.

Энергия $dW_{и}$, рассеиваемая при переносе бесконечно малого заряда dq с заряженной поверхности, при разряде равна

$$dW_{и} = U\,dq, \tag{9.3}$$

где U – разность потенциалов между начальной и конечной точками траектории разряда.

Полная энергия определяется по формуле

$$W_{\text{и}}=\int_0^q U dq\,. \tag{9.4}$$

Определение полной энергии, выделенной в разряде, представляет значительную трудность, так как заряженные диэлектрики имеют неэквипотенциальную поверхность. Кроме того, поверхность заряженного диэлектрика, которая отдает заряд, не имеет точных размеров. В этом случае энергию электростатического разряда можно приближенно определить, если принять в формуле (9.4) вместо переменной U максимальный потенциал на диэлектрической поверхности, рассчитанный по пробивному расстоянию для данной конфигурации электродов. Для определения полного заряда, переносимого в единичном разряде с заряженного диэлектрика, можно использовать метод осциллографирования.

В некоторых случаях для приближенной оценки энергии разрядов статического электричества с диэлектрических поверхностей применяют методы непосредственного контроля искровых разрядов статического электричества (на слух, по физиологическому воздействию, визуально и фотографированием и др.), аналитические методы, а также экспериментальное воспламенение горючих смесей электростатическими разрядами. Следует отметить, что экспериментальное исследование воспламеняющей способности электростатических разрядов является наиболее объективным методом оценки их энергии.

Реальная воспламеняющая способность электрической искры зависит от концентрации, температуры и давления взрывоопасной смеси. Условием воспламенения (взрыва) такой смеси от искры статического электричества является следующее:

$$W_{\text{и}} \geq W_{\text{мин}}, \tag{9.5}$$

где $W_{\text{и}}$ – энергия разряда статического электричества с заряженного материала (зависит от свойств материала, конструкции аппарата, технологического процесса и др.); $W_{\text{мин}}$ – минимальная энергия зажигания горючей смеси, образование которой возможно в данном технологическом процессе (зависит только от свойств горючей смеси и является характеристикой чувствительности ее к воспламенению), определяется экспериментально.

Обычно минимальная энергия, необходимая для воспламенения пылевоздушных взрывоопасных смесей, выше энергии, воспламеняющей паровоздушные взрывоопасные смеси. Например, для многих паро- и газовоздушных взрывоопасных смесей $W_{\text{мин}}$ составляет 0,009…2 мДж, а для пылевоздушных – 2…250 мДж. Примеры минимальных энергий приводятся в

прил. 1 и 2 [3], а также в правилах [4]. Разряды статического электричества не в состоянии воспламенять смеси с минимальной энергией воспламенения 100 мДж и выше.

Средняя напряженность электрического поля, при которой возможен разряд, составляет $4 \cdot 10^2 \ldots 5 \cdot 10^2$ кВ/м для резко неоднородного, $1{,}5 \cdot 10^2 \ldots 20 \cdot 10^2$ кВ/м для слабонеоднородного и до $30 \cdot 10^2$ кВ/м для однородного электрического поля.

При разности потенциалов 3 кВ искровой разряд может воспламенить почти все горючие газы, а при 5 кВ также большую часть горючих пылей.

Степень электризации предмета (машины, аппарата и т.п.) или вещества является безопасной, если измеренная поверхностная плотность заряда σ, напряженность поля E или потенциал V на любом участке этой поверхности не превосходит допустимых значений в этой среде. При этом допустимыми считаются такие значения σ, E и V, при которых максимально возможная энергия разряда с поверхности данного предмета или вещества не превосходит 1/4 минимальной энергии воспламенения окружающей среды (например, смеси горючих паров жидкости с воздухом).

Таким образом, статическое электричество может вызвать воспламенение взрывоопасной смеси при совокупности следующих условий:

наличии источника статических электрических разрядов;

накоплении значительных зарядов на контактирующих поверхностях;

достаточной разности потенциалов для электрического пробоя среды;

наличии достаточной запасенной электрической энергии;

возможности возникновения электрических разрядов.

Отсутствие любого из условий исключает пожаровзрывоопасные последствия статического электричества.

Условие безопасности от статического электричества может быть выражено неравенством

$$W_{\text{и}} \le 0{,}4 W_{\text{мин}}. \qquad (9.6)$$

В пожаро- и взрывоопасных производствах реальную опасность представляет «контактная» электризация людей, работающих с движущимися диэлектрическими материалами (при прорезинивании тканей, покрытии резиной кордов на каландрах, обработке синтетических тканей и нитей, полимерных пленок и т.д.). На человеке накапливается статическое электричество, которое при соприкосновении человека с заземленным предметом вызывает искры и воспламенение смеси. Энергия разряда этой искры может составлять 2,5-7,5 мДж. Кроме того, такое электричество оказывает неприятное физиологическое воздействие на человека, вызывая слабые, умеренные или сильные уколы или удары, зависящие от энергии разряда. Так как ток при этом незначителен, уколы и удары непосредственную опасность для человека не представляют. Но известны случаи с тяжелым исходом, когда

искра, проскакивающая между телом человека и заряженным объектом, вызывает испуг, сопровождающийся непроизвольными нескоординированными движениями и соприкосновением с неогороженными вращающимися частями машин, падение с высоты и т.п. Длительное воздействие статического электричества является причиной ряда заболеваний.

Расчетная зависимость, показывающая, при каком значении будет существовать опасность физиологического воздействия на человека и при каком потенциале возникает опасность воспламенения некоторых горючих смесей, представлена на рис. 9.1. Границы зон видов физиологического воздействия несколько условны, так как это воздействие зависит от особенностей человеческого организма и специфики производства. Поэтому допустимым потенциалом на человеке по физиологическому воздействию считают $V_{доп}$ = 4…6 кВ. Допустимый же потенциал по пожаро- и взрывоопасности для некоторых сред определяется непосредственно по кривой (см. рис. 9.1).

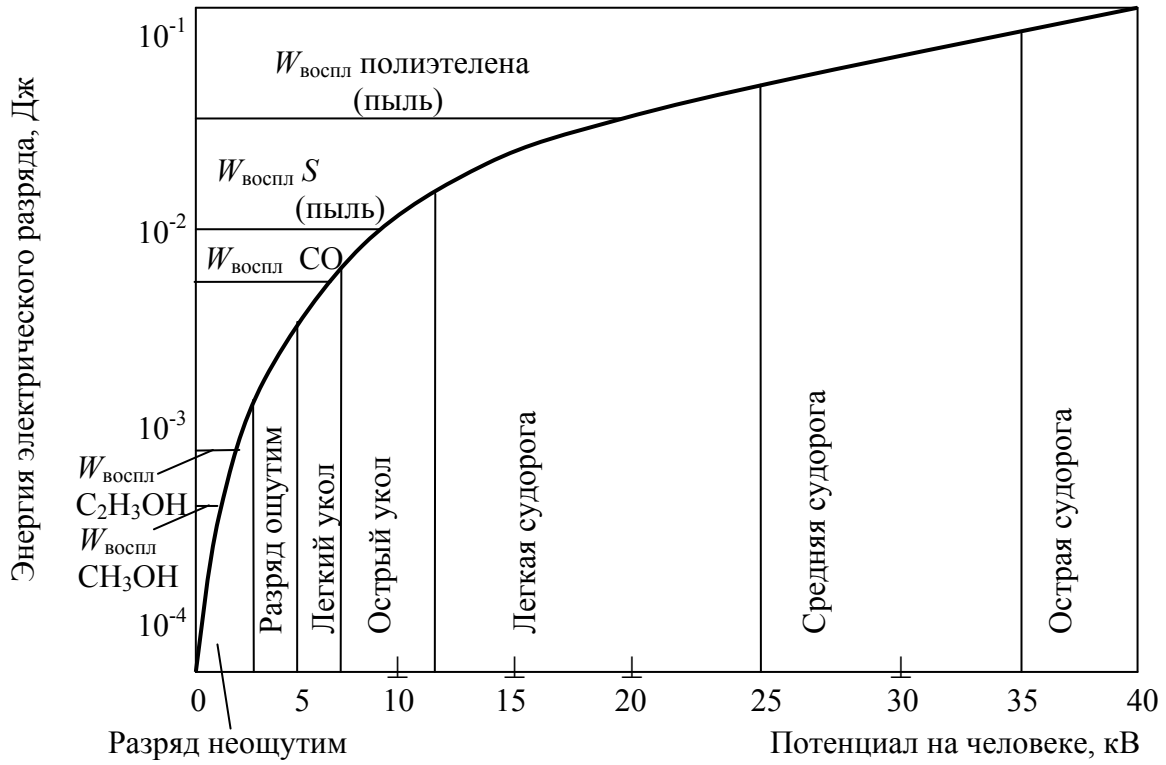


Рис. 9.1. Зависимость энергии электрического разряда с тела человека и физиологического воздействия от потенциала зарядов статического электричества

Чтобы исключить формирование воспламеняющих разрядов с человека, необходимо обеспечить быструю утечку зарядов. С этой целью уменьшают сопротивление обуви и пола. В производствах, где существует опасность воспламенения взрывоопасных смесей разрядом с человека, необходимо обеспечивать работающих электропроводящей (антистатической)

обувью (например, с кожаным верхом и подошвой из электропроводящей резиновой пластины).

Обувь считается электропроводящей, если электрическое сопротивление между электродом в форме стельки, находящимся внутри обуви, и наружным электродом меньше 10^7 Ом.

Покрытие пола считается электропроводящим из бетона толщиной 3 см, спецбетона или пенобетона, ксилолита, настила из антистатической резины и т.д.

Особое внимание устранению электрического заряда с человека следует уделять при выполнении некоторых ручных операций (промывка, чистка, протирка, проклеивание, прорезинивание) с применением бензина, бензола, ацетона, резинового клея и т.п.

9.3. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Электрические измерения необходимы для изучения причин и условий электризации и постоянного контроля электростатических величин: разности потенциалов U между заряженным телом и землей или заземленными предметами; поверхностной плотности электрических зарядов σ и напряженности электрического поля E.

Указателями электрических потенциалов служат различные механические (лепестковые, стрелочные, струнные, квадрантные) и электронные электрометры. В механических электрометрах измеряемый заряд подается на один из пары электродов, кулоновское взаимодействие которых фиксируется различными методами. Например, принцип действия квадрантных электрометров положен в основу электростатических вольтметров. Электростатический заряд воздействует на подвижный секторный электрод, который под воздействием кулоновских сил перемещается. По углу поворота судят о величине измеряемого напряжения. При этом потенциал, показываемый прибором, нельзя считать потенциалом заряженного тела, так как входная емкость его переменна и вносит погрешность. Основные характеристики выпускаемых промышленностью электростатических вольтметров приведены в табл. 9.1. Время успокоения у всех – 6 с, класс точности – 1.

Таблица 9.1

Тип прибора	Конечное значение рабочей части шкалы, кВ	Входная емкость, пФ
С50/1	0,08	10
С50/2	0,075	7
С50/3	0,15	7
С50/4	0,3	7
С50/5	0,6	4
С50/6	1,0	4

Окончание табл. 9.1

Тип прибора	Конечное значение рабочей части шкалы, кВ	Входная емкость, пФ
С50/7	1,5	4
С50/8	3,0	4
С50/9	0,45	4
С196	7,5-15-30	12

Примечание. Выпускаются приборы С53 класса точности 0,5, имеющие такую же модификацию, как приборы типа С50.

Электронные электрометры позволяют измерять электростатические величины без непосредственного контакта с заряженным телом. В простейших статических индукционных электрометрах с преобразованием входного сигнала удаленный от заряженной диэлектрической поверхности конец проводника-датчика соединен с сеткой электрометрической лампы или полевого транзистора. Поэтому индуцированный на нем заряд определяет ток анода лампы (ток транзистора).

По такому принципу работает прибор ПК2-3А, созданный научно-исследовательским институтом охраны труда. Прибор проградуирован в единицах поверхностного потенциала и плотности заряда. Диапазон 0,1-50 кВ (0,2-20 мкКл/м^2) перекрывается тремя пределами: 0,1-1 кВ; 0,5-10 кВ; 1,0-50 кВ. Перейти с одного предела на другой можно с помощью сменных насадок с дисковыми диафрагмами, надеваемых на переднюю цилиндрическую часть прибора, внутри которой находится электрометрическая лампа в герметичном стальном экране. Прибор не может применяться во взрывоопасных зонах. Характеристики некоторых приборов приведены в табл. 9.2.

Таблица 9.2

Прибор	Характеристика прибора и измерения
Индикатор статических зарядов типа:	
ИСПИ-4	Потенциал заряженной поверхности до 50 кВ. Питание батарейное. Взрывозащищенный.
МИЭП-1 и МИЭП-2	Потенциал до 40 кВ. Без питания. Взрывозащищенный
Статический вольтметр с датчиком СМ-2/С-95	Напряжение 0,03-3 кВ. Питание батарейное 1,6 В. Взрывозащищенный
Электрометр электронного типа:	
ПК-2-3А	Потенциал поверхности и тела человека до 50 кВ. Поверхностный заряд 0,2-20 мкКл/м^2
П2-1	Напряженность электрического поля до 50 кВ/м. Питание 3-127-220 В
П2-2	Напряжение до 2,5 кВ. Питание батарейное 1,6 В. Взрывозащищенный

Окончание табл. 9.2

Прибор	Характеристика прибора и измерения
ИСЭП-9	Напряженность электрического поля до 260 кВ/м. Питание батарейное 1,5 В. Взрывозащищенный
Динамический электрометр с вращающимся экраном:	
ВИНЭП-2	Напряженность электрического поля 3-2400 кВ/м. Питание батарейное 9 В. Взрывозащищенный
ИНЭП-1	Напряженность электрического поля 4-2500 кВ/м. Питание 127/220 В.
ПЗСЭ-73	Напряжение до 15 кВ. Питание 220 В. Сжатый воздух 4 кПа

По условиям пожаро- и взрывобезопасности приборы для электростатических измерений во взрывоопасных зонах должны иметь соответствующий уровень и вид взрывозащиты, а их датчики (в частности, у переносных приборов) должны соответствовать требованиям электростатической искробезопасности. Датчик прибора считают искробезопасным для данной взрывоопасной смеси, если искровой разряд на него с металлического электрода, имеющего потенциал 50 кВ и емкость 60-100 пФ, вызывает воспламенение этой смеси с вероятностью не более 10^{-3} (либо энергия этих зарядов, по крайней мере, в 2,5 раза меньше энергии воспламенения смеси).Так, датчик прибора ИСПИ-4 с отклонением электронного потока в вакууме покрыт толстым слоем диэлектрика (фторопластом), что обеспечивает электростатическую искробезопасность. В приборе СМ-2/С-59 взрывозащита достигнута путем заключения электростатического вольтметра С-53 во взрывонепроницаемый корпус, а специальное покрытие датчика (например, фторопласт) обеспечивает его электростатическую безопасность. Взрывобезопасность процесса измерения достигается в том случае, когда во взрывоопасной зоне применяется искробезопасный датчик, а сам прибор (например, статический вольтметр любого типа) устанавливается в невзрывоопасной зоне.

9.4. СПОСОБЫ УСТРАНЕНИЯ ОПАСНОСТИ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Согласно действующим правилам [4], защита от разрядов статического электричества должна осуществляться во взрыво- и пожароопасных производствах с наличием зон классов В-I, В-Ia, В-II, В-IIa, П-I и П-II, в которых применяются и вырабатываются вещества с удельным объемным электрическим сопротивлением, превышающим 10^5 Ом·м. В остальных случаях защита осуществляется лишь тогда, когда статическое электриче-

ство представляет опасность для обслуживающего персонала, отрицательно влияет на технологический процесс или качество продукции. Основными способами устранения опасности от статического электричества (в соответствии со степенью эффективности и частотой применения) являются:

заземление оборудования, коммуникаций, аппаратов и сосудов, а также обеспечение постоянного электрического контакта с заземлением тела человека;

уменьшение удельного объемного и поверхностного электрического сопротивления путем повышения влажности воздуха или применения антистатических примесей;

ионизация воздуха или среды, в частности, внутри аппарата, сосуда и т.д.

Кроме этих способов прибегают к дополнительным, дающим в конкретных случаях нужный эффект при операциях с жидкими, газообразными и сыпучими материалами и веществами: предотвращение образования взрывоопасных концентраций, ограничение скорости движения жидкости, замена ЛВЖ на негорючие растворители и т.д.

Практический способ устранения опасности от статического электричества выбирается с учетом эффективности и экономической целесообразности.

Заземление

Заземление – наиболее часто применяемая мера защиты от статического электричества, его целью является устранение формирования электрических разрядов с проводящих элементов оборудования. Поэтому все проводящие части оборудования и электропроводные неметаллические предметы подлежат обязательному заземлению, независимо от того, применяются ли другие способы защиты от статического электричества. Заземлять следует не только те части оборудования, которые участвуют в генерировании, но и все другие, так как они могут зарядиться по законам электростатической индукции. Во многих случаях индуцированные заряды более опасны, чем заряды, которые являются причиной их образования.

В случаях, когда оборудование выполнено из проводящих электрический ток материалов, заземление является основным и почти всегда достаточным способом защиты. Особенно эффективно заземление токопроводящих частей оборудования при переработке веществ с удельным сопротивлением не более 10^8 Ом·м для жидкостей и 10^7 Ом·м для твердых тел. Если же на внешней поверхности или внутренних стенках металлических аппаратов, резервуаров и трубопроводов образуются отложения непроводящих веществ (смолы, пленки, осадки), заземление становится неэффективным и создается ложное впечатление о надежности и безопасности. Заземление не устраняет опасности и в случае применения аппаратов с эмалированными и другими неэлектропроводящими покрытиями.

Неметаллическое оборудование считается электростатически заземленным, если сопротивление растеканию тока на землю с любых точек его внешней и внутренней поверхности не превышает 10^7 Ом при относительной влажности воздуха не выше 60 %. Такое сопротивление обеспечивает необходимое значение постоянной времени релаксации в пределах десятой доли секунды в невзрывоопасной и тысячные доли секунды во взрывоопасной среде. Постоянная времени релаксации τ связана с сопротивлением r заземления предмета или оборудования и его емкостью C соотношением $\tau = rC$.

Если емкость C мала, сопротивление растеканию тока может быть выше 10^7 Ом. С учетом этой величины рассчитываются максимально допустимые значения сопротивлений заземляющих устройств.

Трубопроводы наружных установок (на эстакадах или в каналах), оборудование и трубопроводы, расположенные в цехах, должны представлять на всем протяжении непрерывную электрическую цепь и присоединяться к заземляющим устройствам. Считается, что электрическая проводимость фланцевых соединений трубопроводов и аппаратов, соединений крышек с корпусами аппаратов и т.п. достаточно высока (обычно не более 10 Ом) и не требуется установки специальных параллельных перемычек.

Каждая система аппаратов и трубопроводов в пределах цеха должна быть заземлена не менее чем в двух местах. Все резервуары и емкости вместимостью более 50 $м^3$ и диаметром более 2,5 м заземляют не менее чем в двух противоположных точках. На поверхности горючих жидкостей в резервуарах не должно быть плавающих предметов.

Наливные стояки эстакад для заполнения железнодорожных цистерн и рельсы железнодорожных путей в пределах сливоналивного фронта должны быть электрически соединены между собой и надежно заземлены. Автоцистерны, наливные суда, самолеты, находящиеся под наливом или сливом горючих жидкостей и сжиженных газов, должны также заземляться. Контактные устройства (без средств взрывозащиты) для присоединения заземляющих проводников должны быть установлены за пределами взрывоопасной зоны (не менее 5 м от места налива или слива [1]). При этом проводники вначале присоединяются к корпусу объекта заземления, а затем к заземляющему устройству. Применяемые для этих целей зажимы, розетки, магниты и другие примитивные устройства и приспособления не отвечают требованиям электростатической искробезопасности и не имеют соответствующих разрешительных документов (лицензии, свидетельство об электростатической искробезопасности и взрывозащите, сертификаты качества и т.д.) на право их изготовления и применения во взрывоопасной зоне.

Кроме того, имеют место существенные конструктивные различия устройств для заземления автоцистерн (АЦ) на нефтебазах и автозапра-

вочных комплексах (АЗК) от аналогичных на автозаправочных станциях (АЗС) общего пользования и ведомственных пунктов заправки топливом.

Подобные различия существуют и при оборудовании АЦ заземляющими проводниками, конструктивно непригодными для применения при наливе топлива на нефтебазе (или АЗК) или при сливе его на АЗС.

Таким образом, применяемые до сих пор для этих целей заземляющие устройства не обеспечивают требуемого уровня пожаровзрывобезопасности технологии налива или слива топлива и других ЛВЖ.

В целях устранения указанных недостатков и нарушений требований пожарной безопасности [35, 36, 37] в настоящее время разработаны и серийно выпускаются специальные устройства заземления автоцистерн (УЗА) типов УЗА-2МИ, УЗА-2МК и УЗА-2МК-03. УЗА соответствуют требованиям ГОСТов [14, 18, 20, 38, 39], являются взрывозащищенными с маркировкой соответственно 1ExsIIT6 и 1Exsi$_b$IICT6 могут устанавливаться во взрывоопасных зонах класса В-Iг [1]. УЗА имеют необходимые разрешительные документы на их изготовление и применение: разрешение и лицензию Госгортехнадзора, свидетельство о взрывозащищенности и электростатической искробезопасности.

УЗА состоит из самого заземляющего устройства, устанавливаемого в зоне наливного стояка нефтебазы (или АЗК) или сливного устройства АЗС, заземляющего проводника, имеющего с одной стороны наконечник, закрепляемый жестко на автоцистерне болтом М6, а с другой стороны – специальный ключ. Предохранение ключа в транспортном положении обеспечивается специальным держателем, закрепленным на АЦ.

УЗА выполняет следующие функции:

УЗА-2МИ заземляет автоцистерну, блокирует систему налива (слива) и информирует о наличии заземления при помощи светоиндикатора. Применяется при наливе или сливе нефтепродуктов на нефтебазах (или АЗК) и АЗС.

УЗА-2МК* заземляет автоцистерну, блокирует запуск системы налива (слива), контролирует целостность цепи «транспортная емкость – УЗА» и индицирует при помощи светоиндикатора о заземлении АЦ. Применяется при наливе или сливе нефтепродуктов на нефтебазах (или АЗК) и АЗС.

Технические характеристики УЗА приведены в табл. 9.3.

С учетом малых разрядных токов при статической электризации допускается сопротивление заземляющего устройства до 100 Ом. Однако допустимое сопротивление заземления, определяемое скоростью накопления электрических зарядов, может составлять 10^7 Ом. При таком сопротивлении удаляются заряды, накапливающиеся со скоростью 100 мкКл/с.

* Модификация УЗА-2МК-03- работает на автономном электропитании и не требует питающей электросети.

Обычно же скорость накопления зарядов, например, при перекачке жидких углеводородов, значительно ниже и часто равна одному или нескольким микрокулонам в секунду. Если объект защищают одновременно и от вторичных воздействий молнии (с использованием общего заземления), то сопротивление такого заземления устранит формирование зарядов статического электричества.

Таблица 9.3

№ п/п	Характеристика	УЗА-2МИ	УЗА-2МК
1	Световая сигнализация о заземлении	Есть	Есть
2	Контакты для схемы блокировки	Есть	Есть
3	Контроль цепи «транспортная емкость – УЗА»	Нет	Есть
4	Электропитание	220 В, 50 Гц	12 В
5	Ток потребления, не более, А	0,008	0,3
6	Потребляемая мощность, не более, ВА	2,0	9,0
7	Нагрузочная способность контакта для схемы блокировки: напряжение, В ток, не более, А	 220 1,0	 220 1,0
8	Маркировка по взрывозащите	1ExsIIT6	1Exsi$_b$IICT6

Если для защиты от статической электризации проводящего неметаллического оборудования с проводящей футеровкой применяется заземление, к нему применяются те же требования, что и к заземлению металлического оборудования. Например, заземление трубопровода из диэлектрического материала, но с проводящим покрытием (краска, лак) может выполняться присоединением его к заземляющему контуру с помощью металлических хомутов и проводников через 20-30 м.

Заземление не всегда решает проблему защиты от статического электричества. Так, заземление резервуара, заполняемого наэлектризованной жидкостью, лишь исключает накопление заряда (натекающего из объема жидкости) и на его стенках, но не ускоряет процесс рассеяния заряда в жидкости. Это объясняется тем, что скорость релаксации зарядов статического электричества в объеме диэлектрической жидкости нефтепродуктов определяется постоянной времени релаксации τ. Следовательно, в заполняемом наэлектризованными нефтепродуктами резервуаре в течение всего времени закачки жидкости и в течение времени, приблизительно равном 3τ, после ее окончания существует электрическое поле зарядов независимо от того, заземлен этот резервуар или нет. Именно в этот промежуток времени может существовать опасность воспламенения паровоздушной смеси нефтепродуктов в резервуаре разрядами статического электричества.

Особую опасность, в свете указанного, представляет собой забор проб из резервуара сразу после его заполнения. Однако через промежуток времени,

примерно равный 3τ, после окончания заполнения заземленного резервуара заряды статического электричества в нем практически полностью релаксируют, электрическое поле исчезает и проведение каких-либо манипуляций по забору проб жидкости становится безопасным. Поэтому в целях исключения разрядов при заполнении стационарных резервуаров или железнодорожных цистерн на пробоотборник при отборе проб через люк из резервуара или на наливную трубу в процессе ее извлечения из цистерны необходимо выдержать промежуток времени, равный [3]

$$T = 3K\tau, \qquad (9.7)$$

где τ - постоянная времени релаксации нефтепродукта, с; K – коэффициент, учитывающий увеличение времени релаксации за счет поверхностного заряда нефтепродукта.

Для светлых нефтепродуктов, имеющих низкий уровень электропроводности (при $\rho_v > 10^{11}$ Ом·м), необходимое время выдержки T, обеспечивающее безопасность дальнейших операций, должно быть не менее 10 мин после успокоения жидкости. Заземление резервуара и выдержка необходимого времени после заполнения не дадут нужного эффекта безопасности в случаях, когда в резервуаре имеются плавающие на поверхности жидкости изолированные предметы, которые могут приобрести заряд статического электричества в ходе заполнения резервуара и сохранять его в течение времени, значительно превышающем 3τ. В этом случае приближение к плавающему предмету заземленного проводящего тела может сопровождаться опасным искрообразованием.

Уменьшение объемного и поверхностного удельных электрических сопротивлений

Снижением объемного и поверхностного сопротивлений обеспечивается соответствующая электропроводность и способность диэлектрика отводить заряды статического электричества. Устранение опасности статической электризации диэлектриков этим способом является весьма эффективным и может быть достигнуто повышением влажности воздуха, химической обработкой поверхности, применением электропроводных покрытий и антистатических веществ (присадок).

Повышение относительной влажности воздуха. Большинство пожаров от искр статического электричества происходит обычно зимой, когда относительная влажность воздуха низка. При относительной влажности воздуха выше 65-70 %, как показывают исследования и практика, число вспышек и загораний становится незначительным.

Ускорение стекания электростатических зарядов с диэлектриков при высокой влажности воздуха связывают с тем, что на поверхности

гидрофильных диэлектриков адсорбируется тонкая пленка влаги, содержащая обычно большое количество ионов из загрязнений и растворенного вещества, за счет которых обеспечивается достаточная поверхностная электропроводность электролитического характера. Электропроводность адсорбированной пленки влаги при прочих равных условиях определяется ее толщиной и в связи с этим в значительной степени зависит от относительной влажности воздуха. Чем она выше, тем толще пленка. Водные пленки толщиной 10^{-5} см визуально нельзя обнаружить, однако они увеличивают поверхностную электропроводность диэлектрика и способствуют утечке зарядов. Поэтому поверхностное сопротивление диэлектрика уменьшается. Однако если материал находится при более высокой температуре, чем та, при которой пленка может удерживаться на поверхности, указанная поверхность не может стать проводящей даже при очень высокой влажности воздуха. Эффект также не будет достигнут, если заряженная поверхность диэлектрика гидрофобна (сера, парафин, масла и другие углеводороды) или скорость ее перемещения больше, чем скорость образования поверхностной пленки. Таким образом, способ увлажнения воздуха не всегда эффективен.

Увеличение влажности воздуха достигается распылением водяного пара или воды, циркуляцией влажного воздуха, а иногда свободным испарением с поверхности воды.

В некоторых случаях желаемый эффект достигается местным увлажнением паров или охлаждением электризующейся поверхности до температуры на 10 ^{o}C ниже температуры окружающей среды.

Химическая обработка поверхности, электропроводные покрытия. Снижение удельного поверхностного сопротивления полимерных материалов может быть достигнуто химической обработкой поверхности кислотами (например, серной или хлорсульфоновой). В результате этого поверхности полимера (полистирол, полиэтиленовые и полиэфирные пленки) окисляются или сульфируются. При этом удельное поверхностное сопротивление снижается до 10^{6} Ом при относительной влажности воздуха 75 %.

Положительный эффект достигается и при обработке изделий из полистирола и полиолефинов погружением образцов в петролейный эфир при одновременном воздействии ультразвуком. Методы химической обработки эффективны, но требуют точного соблюдения технологических условий.

Иногда необходимый эффект достигается нанесением на диэлектрик поверхностной хорошо проводящей пленки. Например, металлические тонкие пленки получают распылением, разбрызгиванием или испарением в вакууме или наклеиванием металлической фольги. Пленки на углеродной основе получают распылением углерода в жидкой среде или порошка (частицы меньше 1 мкм).

Применение антистатических веществ. Большинство горючих и легковоспламеняющихся жидкостей характеризуется высоким удельным электрическим сопротивлением. Поэтому при некоторых операциях, например с нефтепродуктами, происходит накопление зарядов статического электричества, которое не только препятствует интенсификации технологических операций, но и служит источником многочисленных взрывов и пожаров на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях.

Движение жидких углеводородов относительно твердого, жидкого или газообразного тела может привести к разделению электрических зарядов на поверхности соприкосновения. При движении жидкости по трубе слой находящихся на поверхности жидкости зарядов уносится ее потоком, а заряды противоположного знака остаются в трубе и, если металлическая труба заземлена, стекают в землю. Если металлический трубопровод изолирован или изготовлен из диэлектрических материалов, он приобретает положительный заряд, а жидкость – отрицательный.

Степень электризации нефтепродуктов зависит от состава и концентрации содержащихся в них активных примесей, физико-химического состава нефтепродуктов, состояния внутренней поверхности трубопровода (коррозии и т.д.) или технологического аппарата, диэлектрических свойств, вязкости и плотности жидкости, а также от скорости движения жидкости, диаметра и длины трубопровода. Так, присутствие 0,001 % механических примесей превращает инертное углеводородное топливо в электризуемое до опасных пределов.

Один из наиболее эффективных методов, позволяющих устранить электризацию нефтепродуктов, - введение специальных антистатических веществ. Добавление присадок в тысячных и десятитысячных долях процента позволяет на несколько порядков уменьшить удельное сопротивление нефтепродуктов и обезопасить операции с ними. Электрическую проводимость углеводородов и нефтепродуктов наиболее эффективно повышают олеаты и нафтенаты хрома и кобальта, соли хрома синтетических жирных кислот, присадка «Сигбаль» и другие вещества. Так, присадка на основе олеиновой кислоты олеат хрома повышает электропроводность бензина Б-70 в $1{,}2 \cdot 10^4$ раза. Широкое применение в операциях по промывке деталей нашли присадки «Аккор-1» (10-15 г присадки на 100 л жидкости) и АСП-1.

Для получения «безопасной» электропроводности нефтепродуктов в любых условиях необходимо вводить 0,001-0,005 % присадок. Они обычно не влияют на физико-химические свойства нефтепродуктов.

Для получения проводящих растворов полимеров (клеев) также применяют антистатические присадки, растворимые в них, например соли металлов переменной валентности высших карбоновых и синтетических кислот.

Положительные результаты достигаются при использовании антистатических веществ на предприятиях по переработке синтетических волокон. Наиболее важным свойством антистатических веществ является способность увеличивать ионную проводимость и тем самым снижать электрическое сопротивление волокнистых материалов. Обработку волокнистых материалов антистатическими веществами производят до процесса либо непосредственно в процессе их изготовления.

Есть несколько главных групп химических препаратов, применяемых для приготовления антистатических материалов, которые влияют на электрические свойства волокон: углеводороды парафинового ряда, жиры, масла, гигроскопические вещества, поверхностно-активные вещества (ПАВ).

Углеводороды парафинового ряда, жиры и масла влияют на электрический контакт между волокнами и частями машин, способствуя образованию проводящих масляных пленок между ними. Гигроскопические вещества образуют на поверхности волокон пленку влаги, снижая таким образом трение. При наличии влаги и веществ, обладающих свойствами электролитов, образуются ионы. Поверхностно-активные вещества при добавлении в воду снижают ее поверхностное натяжение, в результате улучшается смачивание, пенообразующие, моющие и другие важные для текстильной промышленности свойства воды.

Эффективность антистатических веществ используют в промышленности полимеров, например при обработке полистирола и полиметилметакрилата. Обработка полимеров антистатическими добавками производится как поверхностным нанесением, так и введением в расплавленную массу. В качестве антистатических добавок применяют, например, некоторые образцы ионогенных поверхностно-активных веществ. При поверхностном нанесении ПАВ обладают хорошим антистатическим эффектом. Удельное поверхностное сопротивление полимеров при этом снижается на 5-8 порядков, но срок эффективного действия незначителен (до одного месяца). Введение антистатических добавок внутрь более перспективно, так как антистатические свойства полимеров стабильны во времени (несколько лет), менее подвержены действию растворителей, истиранию и т.д. Для каждого диэлектрика оптимальные концентрации ПАВ различны: например, для полиэтилена низкого давления 0,05-0,1 %, полиэтилена высокого давления 0,2-0,3 %, полипропилена 0,5 %, поливинилхлорида твердого 0,5-1,5 %, полиакрила 2-3 %, полистирола 1,5-2,5 %.

Широкое применение труб для пневмотранспорта, продуктопроводов и других устройств из полимеров (например, полиэтилена низкой и высокой плотности) привело к созданию полупроводящих полимерных композиций путем введения наполнителей (ацетиленовой сажи, алюминиевой пудры, графита, цинковой пыли).

Лучший наполнитель – ацетиленовая сажа, хорошо распределяемая в полимере и снижающая сопротивление на 10-11 порядков даже при 20 % от массы полимера. Оптимальная массовая концентрация ацетиленовой сажи для создания электропроводящего полимера составляет 25 %. Для пневмотранспорта могут быть рекомендованы неметаллические трубы из проводящей полиэтиленовой композиции.

В народном хозяйстве широко используются резинотехнические изделия, обычно диэлектрические. Это связано с опасностью статической электризации. Чтобы получить электропроводные или антистатические резины, в них вводят электропроводящие наполнители – порошковый графит, различные сажи (например, липецкую, ацетиленовую), мелкодисперсные металлы. В таких резинах образуется токопроводящая структура. Так, при введении в латекс сажи электропроводность резины (вследствие лучшего распределения наполнителя) оказалась на 2-3 порядка выше электропроводности резины, полученной на основе твердого каучука. Удельное сопротивление антистатической резины достигает 10^6 Ом·м, проводящей до $5 \cdot 10^2$ Ом·м.

Антистатическими резинами марки КР-388, КР-245 пользуются во взрывоопасных производствах, покрывают полы, рабочие столы, детали оборудования и колеса внутрицехового транспорта. Такое покрытие лучше металлического или бетонного, оно более гигиенично, быстрее отводит возникающие заряды, снижает электризацию людей до безопасного уровня.

В последнее время разработана рецептура маслобензостойкой электропроводящей резины с использованием бутадиеннитрильных и полихлоропреновых каучуков. Наиболее широко эти резиновые смеси используются при изготовлении напорных рукавов и шлангов для перекачки ЛВЖ. Такие рукава значительно снижают опасность воспламенения при сливе и наливе ЛВЖ в авто- и железнодорожные цистерны и другие емкости, исключают применение специальных устройств для заземления заправочных воронок и наконечников.

До последнего времени электропроводящие слои создавали вакуумным напылением или катодным нанесением металла на поверхность диэлектрика. Но этот способ не всегда приемлем. Были эффективны специальные лакокрасочные покрытия, основанные на образовании в полимерном связующем цепочных структур наполнителя. Эти структуры, образованные контактирующими частицами проводящего наполнителя, обеспечивают покрытию хорошую электропроводность. Наполнителями служат порошкообразные металлы, сажа, графит. Так, 15 % карбонильного никеля в полимере снижает удельное сопротивление до 10^4 Ом·м и менее, а 35-40% такого никеля приближает проводимость ряда полимеров к металлической. Для «чистых» полимерных связующих без наполнителя удельное сопротивление $\rho = 10^9$-10^{13} Ом·м.

В настоящее время созданы электропроводящие эмали марки ХС-928 и АК-562. Их наносят на поверхность в два слоя кистью или пульверизатором, и они дают пленку черного цвета, устойчивую к температуре, давлению, вакууму, агрессивным средам и радиационному облучению. Электропроводными эмалями окрашивают заземляемые устройства технологического оборудования: внутренние части химической реакционной аппаратуры, изготовленной из стекла и пластмассы, внутренние части диэлектрического трубопровода, по которому транспортируются жидкости или сыпучие материалы, способные электризоваться, и т.д.

Если во взрывоопасных производствах работают ременные передачи и ленточные транспортеры, изготовленные из материалов с $\rho_r > 10^5$ Ом·м, заряды статического электричества и потенциал ремней и лент достигает нескольких десятков киловольт. Эффективное снижение потенциала получается при увеличении поверхностной проводимости ремня и обязательном заземлении установки. Внутреннюю поверхность ремня покрывают антистатической смазкой, возобновляемой не реже одного раза в неделю. Для кожаных и резиновых ремней рекомендуется, например, такая смазка: 100 вес. ч. глицерина и 40 вес. ч. сажи. Иногда хорошее снижение потенциала дают увеличение относительной влажности воздуха в месте нахождения ременной передачи до 70 % и более и снижение линейной скорости движения ремня и лент.

Ионизация воздуха

Сущность этого способа заключается в нейтрализации или компенсации поверхностных электрических зарядов ионами разного знака, которые создают специальные приборы, называемые нейтрализаторами. Ионизация воздуха осуществляется двумя способами: электрическим полем с высокой напряженностью *E* и радиоактивным излучением.

Принцип работы нейтрализаторов состоит в том, что они создают вблизи наэлектризованного диэлектрика положительные и отрицательные ионы. Ионы, имеющие полярность, противоположную полярности зарядов наэлектризованного материала, под действием электрического поля оседают на поверхности диэлектрика, нейтрализуя его.

Ионизация воздуха электрическим полем с высокой напряженностью получается от нейтрализаторов двух типов: индукционных и высоковольтных.

Индукционные нейтрализаторы очень просты и давно применяются. Существуют индукционные нейтрализаторы с остриями и проволочные. В нейтрализаторе с остриями (рис. 9.2, *а*) в деревянном или металлическом стержне укреплены заземленные острия, тонкие проволочки или фольга. У проволочного нейтрализатора (рис. 9.2, *б*) вместо острия применена тонкая стальная проволочка, натянутая поперек движущегося заряженного материала.

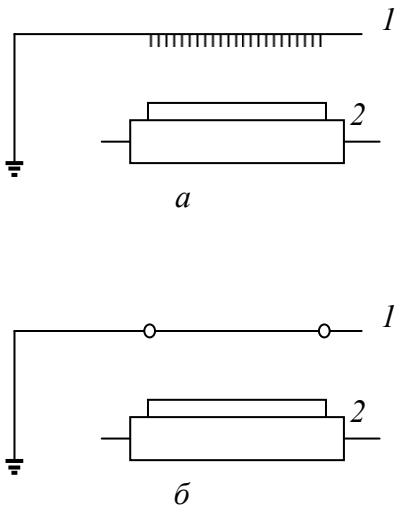


Рис. 9.2. Схема индукционного нейтрализатора:
а – с остриями; *б* – проволочного; *1* – острия и проволока; *2* – заряженная поверхность

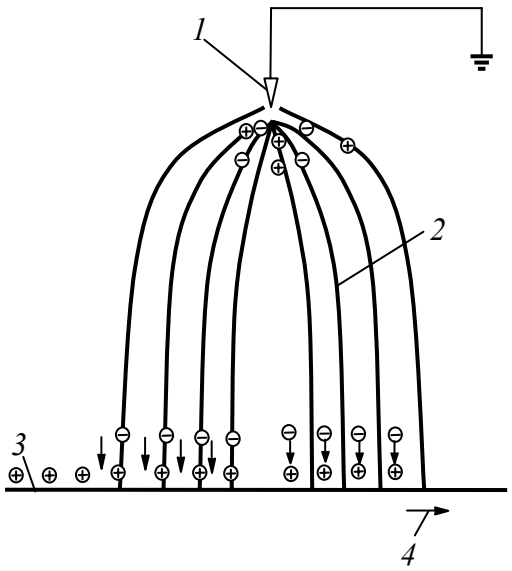


Рис. 9.3. Схема нейтрализации зарядов индукционным нейтрализатором:
1 – разрядный электрод; *2* – зона ударной ионизации; *3* – наэлектризованный диэлектрик; *4* – направление движения диэлектрика

Действие индукционных нейтрализаторов основано на использовании электрического поля наэлектризованного тела, и постороннего источника напряжения для них не требуется. Под действием сильного электрического поля вблизи разрядного электрода происходит ударная ионизация, в результате которой образуются ионы обоих знаков (рис. 9.3). Для увеличения эффективности действия нейтрализаторов следует стремиться к сокращению расстояния между кончиками игл и нейтрализуемой поверхностью до 5-20 мм. Нейтрализаторы монтируются непосредственно перед местом, где заряды создают технологические помехи, или вблизи от места генерации зарядов. Они обладают высокой ионизационной способностью, особенно при высоких потенциалах заряженного тела. Проволочные нейтрализаторы менее эффективны. Основным их недостатком является то, что они действуют, если потенциал наэлектризованного тела достигает нескольких киловольт. Основные преимущества индукционных нейтрализаторов заключаются в простоте конструкции, низкой стоимости, минимальных эксплуатационных затратах и отсутствии источников питания.

Высоковольтные нейтрализаторы работают на переменном, постоянном и токе высокой частоты. Они состоят из трансформатора с высоким выходным напряжением и игольчатого разрядника (рис.9.4). В нейтрализатор на постоянном токе входит и высоковольтный выпрямитель. Принцип действия всех трех типов нейтрализаторов, основанный на ионизации воздуха высоким напряжением, одинаков, но эффективность различна. Максимальное расстояние между разрядным электродом и нейтрализуемым

материалом, при котором нейтрализатор еще эффективен, может достигать 600 мм. Обычно рабочее расстояние принимается равным 200-300 мм. Достоинство всех трех типов нейтрализаторов – достаточное ионизирующее действие и при низком потенциале тела. Особенно полезны нейтрализаторы там, где не соблюдаются температурно-влажностные условия и относительная влажность воздуха может быть ниже 50 %. Недостатком высоковольтных нейтрализаторов является большая энергия возникающих искр, способных воспламенять любые взрывоопасные смеси. Поэтому нейтрализаторы для взрывоопасных зон должны иметь только взрывозащищенное исполнение.

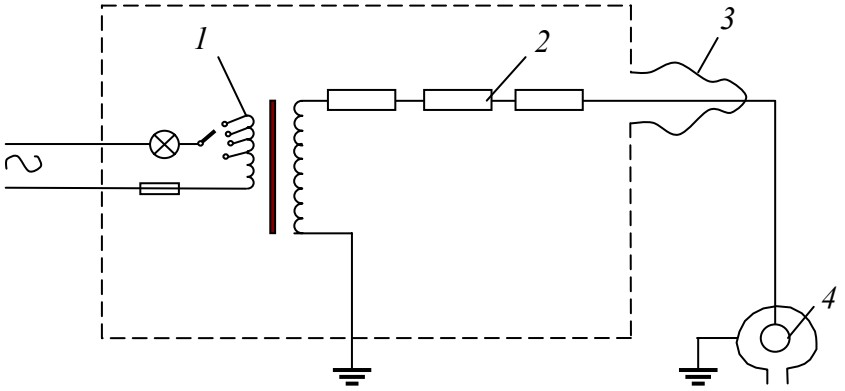


Рис. 9.4. Высоковольтный нейтрализатор переменного тока:
1 – трансформатор; *2* – защитное сопротивление; *3* – проходной изолятор;
4 – игольчатый разрядник

При использовании высоковольтных нейтрализаторов должна быть предусмотрена надежная защита обслуживающего персонала от высокого напряжения. В этих целях в высоковольтную цепь нейтрализатора включаются защитные сопротивления (см. рис. 9.4), которые ограничивают ток до величины в 50-100 раз меньше тока, опасного для жизни.

Радиоизотопные нейтрализаторы очень просты по устройству, не требуют источника питания, достаточно эффективны и безопасны при использовании в пожаровзрывоопасных средах. Они широко применяются в химической, резинотехнической, текстильной, бумажной, полиграфической и других отраслях промышленности. При использовании радиоизотопных нейтрализаторов необходимо предусматривать надежную защиту людей, оборудования и выпускаемой продукции от вредного воздействия радиоактивного излучения.

Радиоизотопные нейтрализаторы чаще всего имеют вид длинных плоских пластинок (рис. 9.5) или маленьких дисков. Одна сторона их содержит радиоактивное вещество, создающее радиоактивное излучение, ионизирующее воздух. Чтобы не загрязнять воздух, продукцию и оборудование, радиоактивное вещество покрывают тонким защитным слоем из спе-

циальной эмали или фольги. Для защиты от механических повреждений ионизатор помещают в металлический кожух, который создает нужное направление ионизированного воздуха.

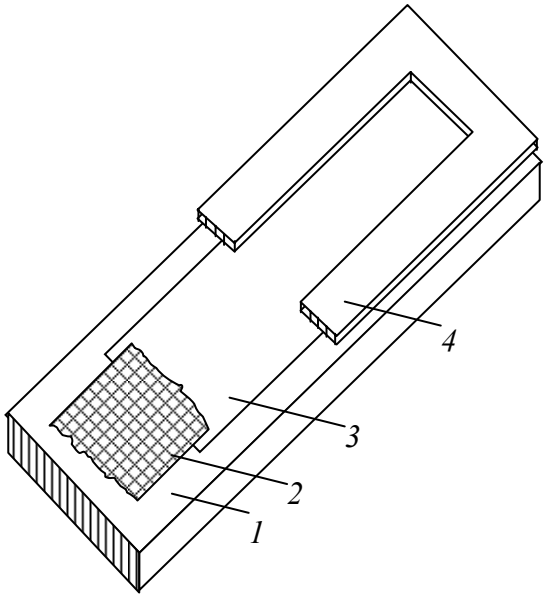


Рис. 9.5. Радиоизотопный нейтрализатор в виде полосы:
1 – основание; *2* – радиоизотопная фольга; *3* - защитная алюминиевая фольга;
4 – пластина, удерживающая фольгу

Радиоактивные вещества выбираются с учетом типа энергии, частиц излучения, длины их пробега, действия излучения на людей и т.д. В табл. 9.4 приведены данные о проникающей способности всех трех видов излучений.

Таблица 9.4

Излучение	Число пар ионов, создаваемых в 1 мм^3 воздуха	Проникающая способность частиц в воздухе, м
α-частицы или ядра гелия (радий-226, полоний-208, плутоний-238, 239 и 240)	600	0,1
β-частицы или электроны (гелий-204, стронций-90, криптон-85 и др.)	6	10
γ-лучи	0,1	600

Наиболее эффективны и безопасны радиоактивные вещества с α-частицами. Проникающая способность α-частиц в воздухе составляет до 10 см. В более плотных средах проникающая способность α-частиц еще меньше. Лист обычной писчей бумаги полностью ее поглощает.

Нейтрализаторы с таким излучением пригодны для локальной ионизации воздуха и нейтрализации зарядов в месте их образования. Там, где необходимо нейтрализовать электрические заряды в аппарате с большим

объемом, лучше использовать β-излучатели. Среди β-излучателей широко распространены тритиевые источники. Подножки у них изготовляют из молибдена, нержавеющей стали или меди; на подножки наносят слой титана, насыщаемый тритием. Как видно из табл. 9.4, ионизирующая способность β-частиц в 100 раз меньше, чем у α-частиц. Однако они обладают большой проникающей способностью. Длина пробега β-частиц в воздухе исчисляется метрами, но в более плотных средах она поглощается сравнительно легко. Свинцовые защитные экраны толщиной 1,5 мм, стальные толщиной 3 мм или деревянные толщиной 20 мм полностью поглощают β-лучи. Радиоактивные вещества с γ-излучением из-за высокой проникающей способности и опасности для людей при нейтрализации электрических зарядов не применяются. Сравнительные характеристики различных типов нейтрализаторов, выпуск которых налажен в нашей стране, приведены в табл. 9.5.

Таблица 9.5

Нейтрализатор	Принцип действия	Длина рабочей части, мм	Максимальный ионный ток, А, на 1см длины при E = 200 кВ/м
НР-1	α-излучение, плутоний 239	140	$1{,}2\cdot10^{-7}$
НРИ-1	Радиоактивно-индукционный	140	$5\ldots10^{-5}$
НР-3	α-излучение, плутоний 239	210	$1{,}2\cdot10^{-7}$
НРИ-3	Радиоактивно-индукционный	210	$5\cdot10^{-5}$
НР-5	α-излучение, плутоний 239	350	$1{,}2\cdot10^{-7}$
НРИ-5	Радиоактивно-индукционный	350	$5\cdot10^{-5}$
НР-7	α-излучение, плутоний 239	800	$(0{,}6\text{-}0{,}9)\cdot10^{-7}$
НР-8 до НР-14	То же	1000 1800	$(0{,}3\text{-}0{,}6)\cdot10^{-7}$ $(0{,}6\text{-}1{,}2)\cdot10^{-7}$
НСЭ-350АТ-1	«	350	$0{,}6\cdot10^{-7}$
НСЭ-200А	«	20	$0{,}5\cdot10^{-7}$
НСЭ-140АТ-1	«	140	$0{,}6\cdot10^{-7}$
НСЭ-1000Б	α-излучение, прометий-147	1000	$(0{,}2\text{-}0{,}4)\cdot10^{-7}$
Тритиевые	β-излучение, тритий	-	$(0{,}5\text{-}1{,}2)\cdot10^{-7}$

Основным недостатком радиоизотопных нейтрализаторов является малый ионизационный ток по сравнению с другими типами нейтрализаторов.

Для нейтрализации электрических зарядов могут использоваться комбинированные нейтрализаторы, например, сочетание высоковольтного и радиоизотопного, и индукционного. Подобные комбинации из двух типов нейтрализаторов позволяют улучшить их рабочие характеристики и увеличить эффективность. Подобные нейтрализаторы (например, типа НРИ) также выпускаются промышленностью (см. табл. 9.5).

Эффективность различных типов нейтрализаторов сравнивают по рабочим характеристикам (рис. 9.6). Рабочие характеристики выражают зависимость разряжающего ионизационного тока от величины потенциала заряженного тела.

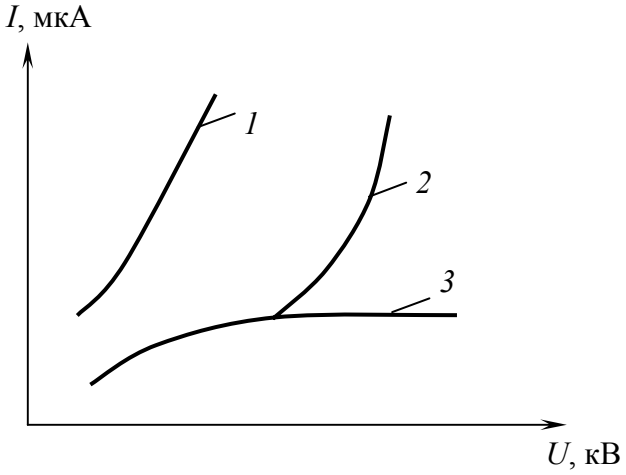


Рис. 9.6. Рабочие характеристики нейтрализаторов различных типов:
1 – высоковольтный; *2* – индукционный;
3 - радиоизотопный

Дополнительные способы уменьшения опасности от статической электризации

Рассмотренные способы уменьшения опасности статической электризации могут оказаться иногда малоэффективными или неприемлемыми во взрывоопасных производствах. Поэтому может возникнуть необходимость создания условий, исключающих образование взрывоопасных концентраций, например, применение в резервуарах плавающих крыш, заполнение свободного пространства в аппаратах азотом или углекислотой, применение постоянно действующей вентиляции с высокой кратностью обмена воздуха, а также автоматическое включение аварийной вентиляции и т.п.

Иногда удовлетворительные результаты дает подбор контактных пар, изменение отдельных операций или замена горючих жидкостей на негорючие. Опасность статической электризации легковоспламеняющихся и горючих жидкостей может быть значительно снижена или даже устранена, например, уменьшением скорости потока v. Эффективность этого способа объясняется тем, что при ламинарном потоке степень электризации пропорциональна скорости движения и не зависит от диаметра трубопровода $D_т$, а при турбулентном потоке она пропорциональна скорости жидкости v в степени 1,75 и диаметру трубопровода в степени 0,75. При этом статическое электричество более интенсивно возникает в трубопроводах с шероховатой поверхностью.

Рекомендуется следующая скорость v диэлектрических жидкостей: при удельном сопротивлении $\rho \le 10^5$ Ом·м принимают $v \le 10$ м/с; $\rho > 10^5$ Ом·м – $v \le 5$ м/с. Для жидкостей с $\rho > 10^9$ Ом·м скорость транспортировки и истечения устанавливается отдельно для каждой жидкости. Устанавливается такая скорость для данного диаметра трубопровода, при которой потенциал на поверхности жидкости в приемном сосуде не превосходил бы предельно допустимого. Безопасной для таких жидкостей обычно является скорость движения или истечения 1,2 м/с.

Для транспортировки жидкостей с $\rho > 10^{11} - 10^{12}$ Ом·м со скоростью не менее 1,5 м/с рекомендуется применять релаксаторы (например, горизонтальные участки трубы увеличенного диаметра) непосредственно у входа в приемный резервуар. Необходимый диаметр $D_р$, м, этого участка определяется по формуле

$$D_р = 1{,}4 D_т \sqrt{v_т}\,. \tag{9.8}$$

Длина релаксатора $L_м$ определяется по формуле

$$L \ge 2{,}2 \cdot 10^{-11} E\rho\,, \tag{9.9}$$

где E – диэлектрическая проницаемость жидкости.

При заполнении резервуара жидкостью с $\rho > 10^5$ Ом·м до момента затопления загрузочной трубы рекомендуется подавать ее со скоростью не более 1 м/с, а затем со скоростью, соответствующей удельному сопротивлению, как было указано выше.

При использовании релаксаторов в современных крупнотоннажных производствах необходимо иногда увеличивать скорость жидкости в трубопроводе до 4-5 м/с. Диаметр, рассчитанный по формуле (9.8), оказывается непомерно большим. Поэтому для увеличения эффективности релаксатора рекомендуется применять их со струнами (рис. 9.7) или с иглами (рис. 9.8). Это позволяет использовать эффект увеличения электропроводности органических жидкостей в сильном электрическом поле.

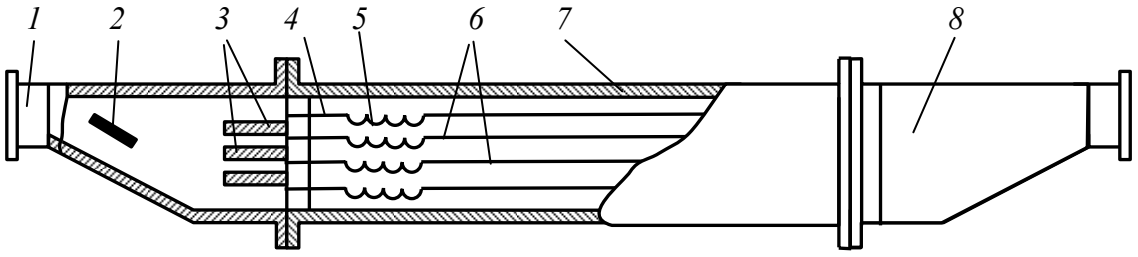


Рис. 9.7. Схема релаксатора со струнами:
1 – входной конический переход; *2* – рассеивающая пластина; *3* – направляющие пластины; *4* – вертикальные пластины для крепления струн; *5* – натяжные пружины; *6* – струны; *7* – корпус релаксатора; *8* – выходной конический переход

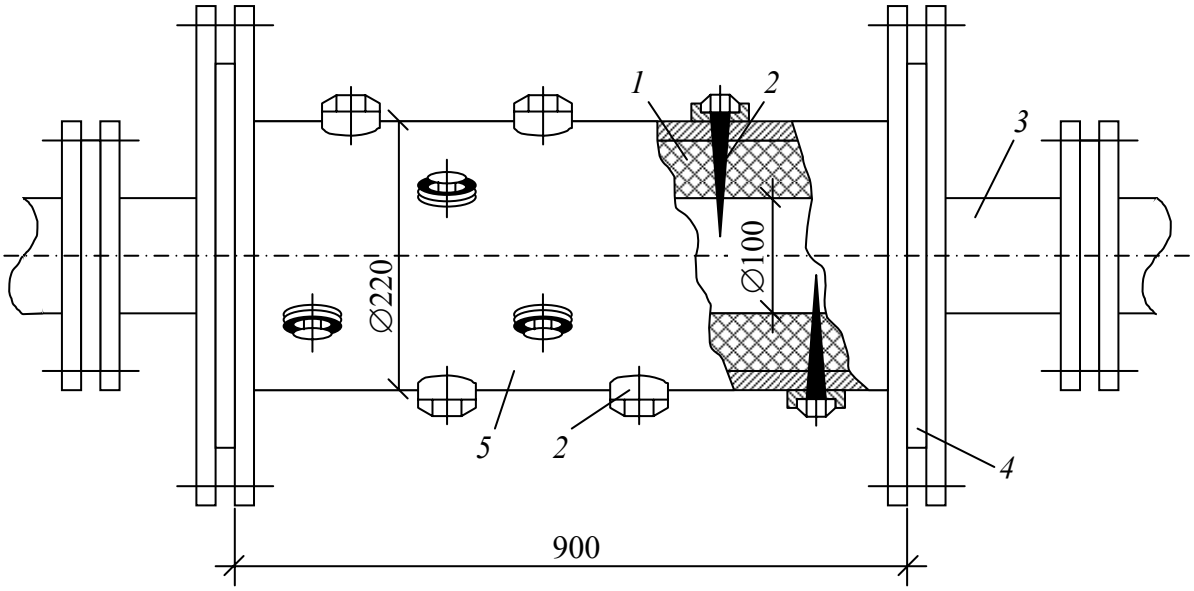


Рис. 9.8. Схема нейтрализатора с иглами:
1 – изоляционная труба; *2* – иглы (16-18 шт.); *3* – переходник; *4* – изоляционная прокладка; *5* – корпус нейтрализатора

В первом случае внутри релаксатора и вдоль его оси натягиваются заземленные струны, что более чем на 50 % уменьшает ток электризации. Тот же эффект используют в релаксаторе (см. рис. 9.8), когда в поток жидкости вводят заземленные острия для того, чтобы из него отвести заряды.

Релаксатор состоит из толстостенной изоляционной трубы (полиэтилен, фторопласт) с установленными на ней заземленными игольчатыми электродами. Внутренние диаметры трубы и основного трубопровода одинаковы. Электрическое поле, созданное зарядами жидкости, концентрируется у острия иглы. У электродов поле значительно увеличивается (в результате адсорбции ионов на диэлектрических стенках релаксатора), и напряженность его у острия может значительно превысить 30 000 кВ/м, что приведет к резкому возрастанию удельной электропроводности.

Максимально допустимые и безопасные (в отношении возможности воспламенения паров жидкости в промышленном резервуаре) режимы транспортировки нефтепродуктов по длинным трубам диаметром 100-250 мм могут быть оценены по соотношению

$$v_{\text{т}}^2 D_{\text{т}} \le 0{,}64\,, \qquad (9.10)$$

где $v_{\text{т}}$ – линейная скорость жидкости в трубе, м/с; $D_{\text{т}}$ – диаметр трубы, м.

При наличии в магистрали трубопровода, фильтров, сепараторов и другого технологического оборудования, расположенного на небольшом расстоянии от приемного резервуара, режим транспортировки нефтепродуктов выбирается из условия, чтобы плотность заряда в резервуаре не превышала 30 мкКл/м^3 при электропроводности жидкости 0,5 пкСм.

За последние годы были проведены серьезные теоретические и экспериментальные исследования по оценке электростатической безопасности при технологических операциях заполнения резервуаров нефтепродуктами [32].

Исследования позволили дать практические рекомендации [33] по режимам налива светлыми нефтепродуктами стационарных резервуаров и железнодорожных цистерн. Рекомендации позволяют предотвращать аварийные ситуации от разрядов статического электричества в ходе наливных операций путем ограничения скорости заполнения резервуаров до величины, при которой образующийся в нефтепродукте заряд статического электричества создает в резервуаре или железнодорожной цистерне электрическое поле, недостаточное для возникновения опасного искрообразования (по технологической схеме, не содержащей фильтров тонкой очистки, нефтепродукт не должен содержать эмульсионную воду и мелкодисперсные частицы).

Ниже приводятся примеры технологических схем заполнения железнодорожных цистерн (рис. 9.9) и резервуаров (рис. 9.10) светлыми нефтепродуктами. Примеры допустимых режимов заполнения железнодорожных цистерн и резервуаров светлыми нефтепродуктами приводятся в приложениях 3 и 4 [3].

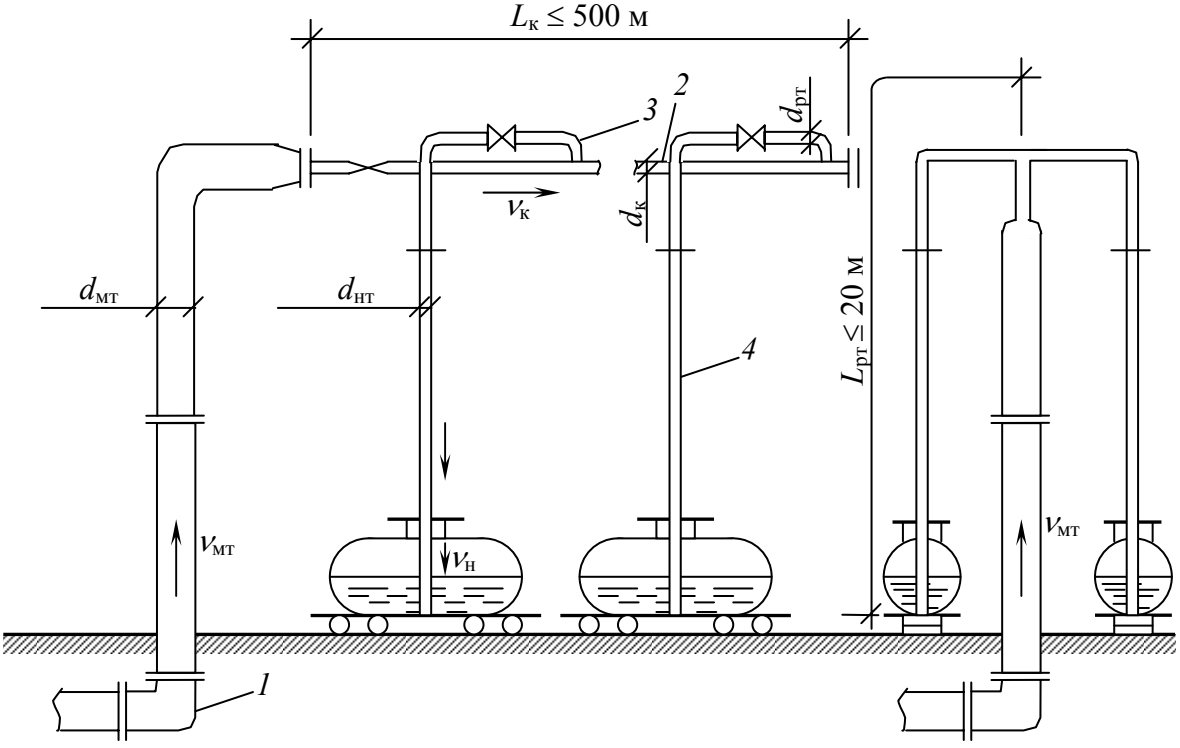


Рис. 9.9. Технологическая схема заполнения железнодорожных цистерн светлыми нефтепродуктами на наливной эстакаде:

1 – магистральный трубопровод, $d_{мт}$ = 400...700 мм; *2* – коллектор, $d_к$ = 200-600 мм; *3* – раздаточный трубопровод, $d_{рт}$ = 100 мм; *4* – наливная труба, $d_{нт}$ = 100 мм; $L_к$ – длина коллектора; $L_{рт}$ – суммарная длина раздаточного трубопровода и наливной трубы; $v_{мт}$ – скорость продукта в магистральном трубопроводе; $v_к$ – скорость продукта в коллекторе; $v_н$ – скорость продукта в наливной трубе

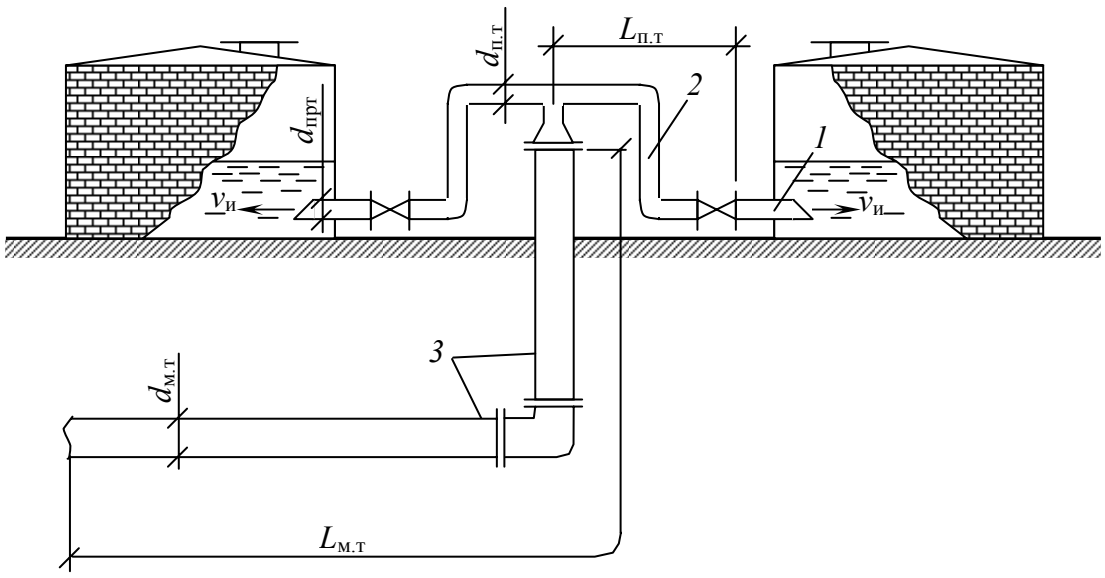


Рис. 9.10. Технологическая схема заполнения стационарных резервуаров светлыми нефтепродуктами на нефтеперерабатывающих заводах:
1 – приемно-раздаточный патрубок; *2* – подводящий патрубок; *3* – магистральный трубопровод; $d_{м.т}$ – диаметр магистрального трубопровода; $d_{прт}$ – диаметр приемно-раздаточного трубопровода; $d_{п.т}$ – диаметр проводящего трубопровода; $v_и$ – скорость истечения нефтепродукта в резервуар; $L_{м.т}$ – длина магистрального трубопровода; $L_{п.т}$ – длина проводящего трубопровода

Допустимые режимы заполнения вертикальных цилиндрических резервуаров с понтоном или плавающей крышей ограничиваются не только электризацией нефтепродукта, но и допустимой скоростью движения понтона или плавающей крыши, равной скорости поднятия уровня нефтепродукта в резервуаре. Если допустимая скорость поднятия уровня в резервуаре по условиям электростатической безопасности превышает 0,6 м/ч в основной стадии и 2,5 м/ч в начальной, то производительность закачки нефтепродукта в резервуар следует ограничить до величин, соответствующих допустимым скоростям движения понтона или плавающей крыши.

Для определения *допустимых режимов заполнения железнодорожных цистерн* на наливных эстакадах по технологической схеме (см. рис. 9.9) выбирают диаметр магистрального трубопровода $d_{м.т}$, диаметр коллектора $d_к$ и диаметр наливной трубы $d_{н.т}$. Для выбранных значений диаметров по прил. 3 [3] выбирают допустимые режимы налива железнодорожных цистерн.

Для определения допустимой производительности P, м^3/ч, заполнения конкретного резервуара по технологической схеме (см. рис. 9.10) выбирают минимальный диаметр трубы $d_{м.т.min}$, входящей в состав магистрального трубопровода и диаметр подводящего трубопровода $d_{п.т}$. По прил. 4 [3]. Для выбранных значений диаметров определяются допустимые режимы заполнения стационарных резервуаров. Допустимые режимы заполнения для

вертикальных резервуаров вместимостью 100-10 000 м^3 и горизонтальных вместимостью 3-200 м^3 приводятся в рекомендациях [32, 33].

В ряде случаев подбор материала контактирующих поверхностей уменьшает интенсивность генерации зарядов статического электричества. При этом можно рекомендовать, например, изготовление взаимодействующих поверхностей из однородного материала.

Следует исключить возможность загрязнения диэлектрических жидкостей коллоидными частицами. При сливе жидкости нельзя перемешивать, распылять или разбрызгивать; при наливе жидкости в резервуары, цистерны и тару сливная труба должна опускаться почти до дна приемного сосуда; свободно падающая струя вообще не допускается. Жидкости должны поступать в резервуар ниже уровня имеющегося в нем остатка жидкости.

При операциях с сыпучими и мелкодисперсными материалами снижения опасности от статической электризации можно достичь следующими мерами: при их пневмотранспортировке рекомендуются трубы из полиэтилена или трубы из того же материала (или близкого по составу транспортируемому веществу); относительная влажность воздуха на выходе из пневмотранспорта должна быть не менее 65 % (если это неприемлемо, рекомендуется ионизировать воздух или применять инертный газ). Следует избегать возникновения пылевоздушных горючих смесей, не допускать падения или сброса пыли, ее всклубливания или завихрения. Необходимо очищать оборудование и конструкции здания от осевшей пыли.

При операциях с горючими газами необходимо следить за их чистотой, отсутствием на пути их движения незаземленных частей оборудования или приборов.

Замена горючих средств на негорючие. Хороший эффект по условиям пожаро- и взрывобезопасности не только от искр статического электричества, но и от всех других источников зажигания достигается путем замены органических растворителей и ЛВЖ на негорючие. Тем более, если замена горючих сред на негорючие не нарушает нормального хода технологического процесса и экономически целесообразна.

Из органических растворителей для промывки и обезжиривания деталей чаще всего применяют бензин и керосин, которые наряду с хорошей растворяющей способностью обладают большой пожароопасностью, низкими температурами вспышки и воспламенения, широким диапазоном пределов воспламенения, склонностью к электризации. Опасность усугубляется еще и тем, что при процессах обезжиривания и промывки в открытых аппаратах над поверхностью этих жидкостей образуется взрывоопасная смесь даже при нормальной температуре.

Для химического обезжиривания рекомендуются негорючие составы [3], представленные в табл. 9.6.

Таблица 9.6

Компоненты	Содержание компонентов (г/л воды) в составах						
	Для черных металлов			Для меди и ее сплавов		Для алюминия и его сплавов	
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
NaOH и KOH	80-100	100-150	20-30	-	-	-	3-5
Фосфорнокислый натрий трехзамещенный	30-40	-	70-80	30-35	80-100	20-25	2-4
Натрий углекислый	-	30-50	-	20-25	-	20-25	40-50
Жидкое стекло	-	3-5	5-8	5-10	10-15	-	20-30
Эмульгаторы ОП-7 или ОП-10	-	5-7	5-7	3-5	-	5-7	-

Примечание. Обезжиривание проводят при 70-80 ^{o}C в течение 10-15 мин, раствор перемешивается сжатым воздухом.

Разработан ряд составов, предназначенных для замены ЛВЖ и ГЖ на операциях: очистки деталей от паст, суспензий, веретенного масла, нагара, коррозии; расконсервации, мойки деталей и агрегатов машин; отмывания поверхностей от нефтепродуктов, очистки резервуаров под смену грузов и производства в них ремонтных работ с применением открытого огня и т.п.

Характеристика составов, области применения и режимы обезжиривания описаны в работе [34].

9.5. ЭКСПЛУАТАЦИЯ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ ОТ РАЗРЯДОВ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Нормальная эксплуатация и поддержание всех устройств защиты от разрядов статического электричества в исправном состоянии являются важным звеном в обеспечении пожаро- и взрывобезопасности на химических, нефтехимических и других производствах.

Согласно действующим правилам [4], ответственность за исправность устройств защиты от статического электричества в цехе возлагается на начальника цеха, а по заводу – на главного энергетика. Осмотр и текущий ремонт защитных устройств необходимо производить одновременно с осмотром и текущим ремонтом всего технологического и электротехнического оборудования.

Заземляющие устройства нужно контролировать при помощи приборов не реже одного раза в год. Результаты ревизии и ремонта защитных устройств заносятся в специальный журнал.

Для каждого цеха (с учетом специфических особенностей) в технологические инструкции или инструкции по технике безопасности должны быть включены разделы «Защита от статического электричества» и «Эксплуатация устройств защиты от статического электричества».

Электрические нейтрализаторы должны эксплуатироваться в соответствии с прилагаемыми к ним Правилами технической эксплуатации или Инструкциями по эксплуатации и правилами [28].

Установка и эксплуатация радиоактивных нейтрализаторов должна производиться в соответствии с инструкциями на них. Радиоактивные нейтрализаторы других конструкций допускаются к применению, если отвечают требованиям Санитарных правил по устройству и эксплуатации радиоизотопных нейтрализаторов статического электричества с эмалевыми источниками α- и β-излучения № 879-71, Основных санитарных правил работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений, № ОСП-72, Норм радиационной безопасности НРБ-69.

Профилактические осмотры и ремонты радиоизотопных нейтрализаторов целесообразно выполнять, прибегая к услугам специализированных организаций, например специализированного управления по монтажу и наладке радиоактивной техники.

При расширении и реконструкции производства следует проверить наличие, достаточность и эффективность действующих устройств защиты от статического электричества и при необходимости внести соответствующие изменения.

Устройства защиты от статического электричества (нейтрализаторы, заземления и др.) принимаются в эксплуатацию одновременно с приемкой технологического и энергетического оборудования.

При приемке средств защиты в эксплуатацию должны быть представлены проекты, акты на скрытые работы, исполнительные схемы, протоколы замеров сопротивлений заземляющих устройств и инструкция по эксплуатации.

Глава 10

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕШЕНИЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК, МОЛНИЕЗАЩИТЫ И ЗАЩИТЫ ОТ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Обобщенным показателем эффективности противопожарной защиты электроустановок молниезащиты и защиты от статического электричества является

$$C_{\text{макс}} = (C_{\text{пр}}/C_{\text{з}})\eta, \qquad (10.1)$$

где $C_{\text{макс}}$ - обобщенный показатель эффективности применения защиты; $C_{\text{пр}}$ - результат применения защиты; $C_{\text{з}}$ - суммарные затраты на защиту; η - показатель, учитывающий социальные аспекты защиты, $\eta > 1$.

Защиту можно считать целесообразной при $C > 1$. Результат применения защиты характеризуется математическим ожиданием предотвращенного ущерба:

$$C_{\text{пр}} = C_{\text{о}} P_{\text{экстр}} P_{\text{ппз}} \alpha, \qquad (10.2)$$

где $C_{\text{о}}$ - общая стоимость защищаемых материальных ценностей; $P_{\text{экстр}}$ - вероятность возникновения экстремальной пожаровзрывоопасной ситуации; $P_{\text{ппз}}$ - вероятность того, что применяемая защита предотвратит пожар или взрыв; α - коэффициент, характеризующий степень убытка от общей стоимости $C_{\text{о}}$ в случае пожара или взрыва.

Стоимость защищаемых материальных ценностей, как правило, известна.

Вероятность возникновения пожаровзрывоопасной ситуации может быть определена на основании статистических данных. Коэффициент $\alpha = 1$ в том случае, когда возникший пожар или взрыв уничтожает все защищаемые материальные ценности; $\alpha < 1$ в случаях, когда материальные ценности уничтожаются частично. Он определяется или устанавливается для каждого объекта или группы характерных объектов.

Вероятность того, что применяемая защита предотвратит пожар или взрыв, зависит от характеристик технических решений защиты и степени ее соответствия для заданного объекта:

$$P_{\text{ппз}} = K_{\text{г}} K_{\text{с}}, \qquad (10.3)$$

где $K_{\text{г}}$ - коэффициент готовности защиты; $K_{\text{с}}$ - коэффициент соответствия выбранной защиты заданному объекту по требованиям, обеспечивающим предотвращение пожара или взрыва.

В свою очередь,

$$K_г = T_{н.о}/ (T_{н.о} + T_в), \quad (10.4)$$

где $T_{н.о}$ - время наработки на отказ защиты; $T_в$ - время восстановления отказа защиты.

Более высокий коэффициент готовности защиты дает возможность с большей вероятностью предотвратить пожар или взрыв, следовательно, и ущерб.

$$C_у = C_{у.с} (n_1 T_{в1} - n_2 T_{в2}), \quad (10.5)$$

где $C_у$ - стоимость ущерба от простоя защиты; $C_{у.с}$ - стоимость убытков, приходящихся на единицу времени неработоспособного состояния защиты; n_1, n_2 - число отказов для первого и второго коэффициентов готовности ($K_{г1}$, $K_{г2}$); $T_{в1}$, $T_{в2}$ - время восстановления защиты для $K_{г1}$ и $K_{г2}$ соответственно.

На практике редко удается подобрать такие технические средства защиты, при которых предотвращение пожара или взрыва зависит только от коэффициента их готовности. Поэтому коэффициент соответствия чаще всего меньше единицы.

Характерным примером, подтверждающим на практике, что $K_с < 1$, может быть применение для защиты электроустановок различных аппаратов защиты, которые, как известно, имеют дискретный ряд нормированных порогов с определенным шагом.

По-видимому, лишь для молниезащиты возможно достичь $K_с = 1$ за счет введения избыточности защиты. Однако такой подход едва ли можно распространить на все объекты. Для электроустановок избыточность защиты во многих случаях применить вообще невозможно, так как это может привести к экономически неоправданным остановкам электрооборудования.

Учитывая, что в настоящее время отсутствует научно обоснованный подход к выбору $K_с$, для расчетов следует пользоваться ориентировочными значениями, исходя из опыта эксплуатации тех или иных объектов.

Суммарные затраты на защиту составят

$$C_з = C_{тсз} + C_м + C_э, \quad (10.6)$$

где $C_{тсз}$ - затраты на приобретение технических средств защиты; $C_м$ - стоимость монтажных работ; $C_э$ - стоимость эксплуатации защиты в течение заданного времени.

Значение $C_{тсз}$ и $C_м$ определяются на основании соответствующих прейскурантов и каталогов цен покупных изделий и монтажных работ.

Эксплуатационные расходы равны

$$C_э = C_п + C_р n, \quad (10.7)$$

где $C_п$ - стоимость профилактических работ, предупреждающих отказы; $C_р$ - стоимость восстановления одного отказа защиты; n - число отказов.

Повышение $K_г$ приводит к снижению стоимости текущего ремонта при эксплуатации за счет снижения числа отказов $(n_1 - n_2) < n$.

Следовательно,

$$C_э = C_п + C_р (n_1 - n_2) \qquad (10.8)$$

при

$$n_1 = 1/T_1 = \lambda_1 \tau; \; n_2 = 1/T_2 = \lambda_2 \tau,$$

где λ_1, λ_2 - соответственно интенсивности отказов, соответствующие $K_{г1}$ и $K_{г2}$; τ - рассматриваемый промежуток времени.

Важным для оценки эффективности защиты электроустановок, молниезащиты и защиты от статического электричества является показатель, учитывающий социальные аспекты защиты: опасность пожаров и взрывов для жизни людей и влияние их на моральное состояние людей, как правило, снижающее их общественную активность и производительность труда.

Приложения

Приложение 1

Таблица 1

Технические данные предохранителей

Тип	Номинальный ток, А		Предельный ток отключения $I_{пр.пр}$, А, при напряжении, В		
	предохранителя $I_{н.пр}$	плавкой вставки $I_{н.вст}$	220	380	500
ПР-2	15 60 100 200 350 600	6, 10 и 15 15, 20, 25, 35, 45, 60 60, 80 и 100 100, 125, 160 и 200 200, 225, 260, 300, 350 350, 430, 500, 600	1200 5500 11000 11000 11000 15000	800 4500 11000 11000 13000 23000	700 3500 10000 10000 11000 20000
НПН-15 НПН-60М НПН2-60	15 60 63	6, 10 и 15 20, 25, 35, 45 и 60 6; 10; 16; 20; 25; 31,5; 40 и 63	- - -	10000 10000 10000	- - -
ПН-2	100 250 400 630	31,5; 40; 50; 63; 80; 100 80, 100, 125, 160, 200 и 250 200, 250, 315, 335 и 400 315, 400, 500 и 630	- - - -	100000 100000 40000 25000	50000 40000 25000 10000
ПНБ-2	40 60 100 150 200 300 400 600	40 60 100 150 200 250, 300 400 600	- - - - - - - -	- - - - - - - -	100000
Ц-27	25	6, 10, 15, 20 и 25	-	600	-
Ц-33	60	15, 20, 25, 35, 60	-	1000	-
ПП-24 ПП-17	25 1000	2; 4; 6,3; 10; 16; 20; 25 500, 630, 800, 1000	- -	100000 120000	- -
ПТ23 ПТ26	16 31,5	6, 10, 16 20; 25; 31,5	10000 10000	- -	- -
ПР23 ПР26	16 31,5	6,3; 10; 15 20; 25; 31,5	10000 10000	- -	- -

Таблица 2

Технические данные автоматов серии А3100

Автомат		Число полюсов	$I_{н.а}$	Расцепитель			$I_{пр.а}$, А, при напряжении, В		
				$I_{н.тепл}$, А	$I_{н.эл.м}$, А	$I_{ср.эл.м}$, А	220	350	500
А3161		1		15	-	-	2500	2000	-
				20	-	-	3000	2500	-
А3162		2	50	25	-	-	3500	3000	-
				30	-	-	4000	3500	-
А3163		3		40	-	-	4500	4000	-
				50	-	-	5000 (для А3163)	4500 (для А3163)	-
	А3113/1	2		15	15	150	4000	3200	2500
				20	20	200	5000	4000	3200
А3114			200	25	25	250	6500	5000	4000
				30	30	300	9000	7000	6000
	А4114/1	3		40	40	400	10000	8500	7000
				50	50	500	12000	10000	8000
				60	60	600	13000	11000	9000
				80	80	800	14000	11500	9500
				100	100	1000	15000	12000	10000
А3120	А3123	2		15	15	430	7000	5500	4000
				20	20	430	7500	6000	5000
				25	25	600	11000	9000	7000
			100	30	30	600	12000	10000	8000
				40	40	800	15000	13000	10000
	А3124	3		50	50	800	22000	19000	14000
				60	60	800	23000	20000	15000
				80	80	800	26000	22000	16000
				100	100	800	30000	23000	18000
	А3133	2		120	120	840	20000	19000	14000
А3130			200	150	150	1050	30000	23000	18000
	А3334	3		200	200	1400	35000	30000	25000
	А3143	2		250	250	1750	35000	32000	32000
				300	300	2100	40000	35000	35000
А3140			600	400	400	2800	40000	35000	35000
	А3144	3		500	500	3500	50000	50000	40000
				600	600	4200	50000	50000	40000

Таблица 3

Технические характеристики автоматов А3713Б

Номинальный ток, А		Номинальное напряжение, В	Ток срабатывания теплового расцепителя, кратный $I_н$	Уставка по току мгновенного срабатывания, кратная $I_н$	Предельная коммутационная способность, кА
автомата, $I_{н.а}$	полупроводникового расцепителя, $I_{рас}$				
32	16, 20, 25, 32	~660	1,25	3, 5, 7, 10	14
40	20, 25, 32, 40				18
80	40, 50, 63, 80				35
160	80, 100, 125, 160				40
32	16, 20, 25, 32	~380	1,25	3, 5, 7, 10	14
40	20, 25, 32, 40				18
80	40, 50, 63, 80				35
160	80, 100, 125, 160				

Таблица 4

Технические данные автоматов типа АП-50 с комбинированным расцепителем на переменный ток

Номинальный ток расцепителя, А	Расцепитель			Допустимое значение тока КЗ при 380 В и cosφ = 0,5; $I_{пр.а}$, А	Полное время отключения, с
	тепловой, $I_{ср.тепл}$, А, для срабатывания при перегрузках		электромагнитный $I_{ср.эл.м}$, с током мгновенного срабатывания (отсечки), А		
	1,35	6			
1,6	Не более 30 мин	От 1 до 10	11	300	0,017
2,5			17,5	400	
4			28	600	
6,4			45	800	
10			70	2000	
16			110	2000	
25			175	2000	
40			280	2000	
50			350	2000	

Таблица 5

Технические характеристики автоматов серии ВА

Тип и номинальный ток, А	Номинальный ток расцепителей максимального тока, А	Номинальное напряжение, В	Число полюсов	Ток срабатывания теплового расцепителя, кратный $I_н$	Уставка по току мгновенного срабатывания, кратная $I_н$	Предельная коммутационная способность, кА, при напряжении, В	
						380	660
ВА 51-21 25	6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25	~380 ~660	2, 3	1,35	10,0	3,8	2,0
ВА-16 25	6,3; 10; 16; 20; 25	~380	1	1,35	14		
ВА14М 32	6, 8, 10, 16	~380 -110	1, 2, 3, 2	1,35	10 16		
ВА51Г-25 25	0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,25; 1,8; 2,0; 2,5; 3,15; 4,0; 5,0; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25	~380 ~660	2, 3	1,20	14,0	3,0	2,0
ВА51-31-1 100, 160	6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100	~380 -110	1	1,35	3, 7, 10 3, 7	8,0 8,0	-
ВА51-31 100, 160	6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100	~660 ~380 -220	2, 3	1,35	3, 7, 10 3, 7, 10 3, 7	5,0 10,0 20,0	-
ВА51Г-31 100, 160	16; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100	~660 ~380	3	1,2	14	4,0 7,0	-
ВА52-31 100, 160	16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100	~660 ~380	3	1,35	3, 7, 10	12,0 25,0	-
ВА52Г-31 100, 160	16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100	~660 ~380	3	1,2	14	10,0 25,0	-
ВА51-33 100, 160	80; 100; 125; 160	~660 ~380	2, 3	1,25	10	9,0 12,5	-
ВА51Г-33 100, 160	80; 100; 125; 160	~680 ~380	3	1,2	14	9,0 12,5	-
ВА52-33 100, 160	80; 100; 125; 160	~660 ~380	3	1,25	10	12,0 35,0	-
ВА52Г-33 100, 160	80; 100; 125; 160	~660 ~380	3	1,2	14	12,0 35,0	-

Таблица 6

Технические параметры однополюсных автоматов серии АЕ1000 и трехполюсных серии АЕ200

Серия	Тип (по исполнению)	Тип расцепителя	Номинальный ток автомата, $I_{н.а}$, А	Номинальные токи расцепителей $I_{н.тепл}$, $I_{н.эл.м}$, А	Ток срабатывания расцепителя, А		Предельная отключающая способность автомата $I_{пр.а}$, А
					теплового, $I_{ср.тепл}$	электромагнитного, $I_{ср.эл.м}$	
АЕ1000	АЕ1031-11 АЕ1031-21 АЕ1031-31 АЕ1031-41 АЕ1031-51	Комбинированный	25	6, 10, 16, 25	1,5 $I_{н.расц}$	(12-18) $I_{н.расц}$	2000
	АЕ1031-12 АЕ1031-22 АЕ1031-32 АЕ1031-42 АЕ1031-52	Тепловой	25	6, 10, 16, 25	1,5 $I_{н.расц}$	-	1000
	АЕ1031-13 АЕ1031-23 АЕ1031-33 АЕ1031-43 АЕ1031-53	Электромагнитный	25	6, 10, 16, 25	-	(12-18) $I_{н.расц}$	1000
АЕ2000	АЕ2033	Электромагнитный	25	0,6; 0,8; 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25	-	3 $I_{н.расц}$ или 12 $I_{н.расц}$	3000
	АЕ2036	Комбинированный	25	0,6; 0,8; 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25	1,25 $I_{н.расц}$	3 $I_{н.расц}$ или 12 $I_{н.расц}$	3000
	АЕ2053	Электромагнитный	100	16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100	-	3 $I_{н.расц}$ или 12 $I_{н.расц}$	6000
	АЕ2056	Комбинированный	100	16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100	1,25 $I_{н.расц}$	3 $I_{н.расц}$ или 12 $I_{н.расц}$	6000

Таблица 7

Технические данные магнитных пускателей серии ПМЕ и ПА

Пускатель			Наибольшая мощность управляемого электродвигателя, кВт, при напряжении, В			Ток уставки тепловых реле, А		
Тип	Величина	Номинальный ток, А	220	380	500	Номинальный ток, А	Нулевая уставка (номинальный ток нагревательного элемента)	Диапазон уставок
ПМЕ-222	2	25	5,5	10	10	6,25 7,87 10,0 12,5 15,6 20,0 25,0	5 6,3 8 10 12,5 16 20	3,75-6,25 4,72-7,87 6-10 7,5-12,5 9,38-15,6 12-20 15-25
ПА-322 ПА-422 ПА-522 ПА-622	3 4 5 6	40 56 115 140	7 13 28 40	13 20 55 75	17 28 55 75	40 56 115 140	32 44 104 126	24-40 33-56 78-115 94-140

Примечания: 1. Нулевая уставка – уставка в нулевом положении указателя шкалы теплового реле.

2. Регулировка тока уставки реле плавная и производится регулятором уставки. Шкала регулятора тока уставки имеет по пять делений влево (минус) и вправо (плюс) от нулевой риски шкалы. Каждое деление шкалы соответствует примерно 5 % номинального тока нагревательных элементов (тока нулевой уставки) для пускателей открытого исполнения и 5,5 % - для защищенного исполнения.

3. Для магнитных пускателей серии ПА 4, 5 и 6-й величин (с тепловым реле без термокомпенсации) при температуре охлаждающей среды ниже +30 °С вносится поправка в пределах шкалы реле.

4. Деление шкалы тока уставок без температурной поправки определяется из выражения

$$\pm N_1 = (I_н - I_о) / cI_о,$$

где $I_н$ – номинальный ток электродвигателя, А; $I_о$ – ток нулевой уставки, А; c – коэффициент цены деления шкалы (0,05 – для открытых пускателей, 0,055 – для защищенных).

Поправка на температуру в пределах делений шкалы

$$- N_2 = (t^{o}_{окр} - 30) / 10\ ^{o},$$

где знак минус означает, что поправка вводится только при понижении температуры от номинальной (+40 °С) больше чем на 10 °С.

Результирующее расчетное деление равно

$$\pm N = (\pm N_1) + (- N_2).$$

Если число N дробное, производится округление до целого в большую или меньшую сторону, в зависимости от характера нагрузки.

Пример. Ток электродвигателя $I_н$ = 54 А; защищенный пускатель ПА – 422 с током нулевой уставки равным 44 А; температура окружающей среды 15 °С.

Определяем деление шкалы уставок реле:

уставка реле без поправки на температуру

$$\pm N = (55 - 44) / 0{,}055 \text{ x } 44 = + 4{,}91;$$

поправка на температуру

$$- N_2 = (15 - 30) / 10 = -1{,}5;$$

результирующее расчетное деление шкалы уставок

$$\pm N = (+4{,}91) + (-1{,}5) = + 3{,}41;$$

округление до +4 деления, если электродвигатель не подвержен частым перегрузкам или имеет запас мощности; до +3 деления, если электродвигатель находится на пределе по нагреву при номинальной нагрузке или в результате частых перегрузок.

5. Технические данные тепловых реле, встраиваемых в пускатели ПМЕ и ПА.

Величина пускателя	Тип реле	Номинальный ток реле, А	Номинальный ток теплового реле, А, при +25 °С (положение регулятора уставки на нуле)	Предел регулирования номинального тока уставки
I	ТРН-8 или ТРН-10	10	0,5; 0,63; 0,8; 1; 1,25; 1,6; 2; 2,25; 3,2; 4; 5; 6,8; 8; 10	От 0,75 $I_н$ до 1,3 $I_н$
II	ТРН-20 или ТРН-25	25	5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25	От 0,74 $I_н$ до 1,3 $I_н$
III	ТРН-32 или ТРН-40	40	16; 20; 25; 32; 40	От 0,75 $I_н$ до 1,3 $I_н$
IV	ТРП-60	60	25; 30; 40; 50; 60	От 0,75 $I_н$ до 1,25 $I_н$
V	ТРП-150	150	50; 60; 80; 100	От 0,75 $I_н$ до 1,25 $I_н$
VI	ТРП-150	150	100; 120; 150	От 0,75 $I_н$ до 1,25 $I_н$

Приложение 2

Таблица 1

Допустимая потеря напряжения в осветительных и силовых сетях

Мощность трансформатора, кВА	Коэффициент загрузки трансформатора	Коэффициент мощности суммарной нагрузки				
		1,0	0,9	0,8	0,7	0,6
		Допустимая потеря напряжения, %				
160-250	1,0 0,9 0,8 0,7	8,2 8,4 8,6 8,8	6,6 6,9 7,2 7,5	6,1 6,5 6,9 7,3	5,9 6,3 6,7 7,1	5,6 6,0 6,4 6,8
400	1,0 0,9 0,8 0,7	8,6 8,7 8,8 8,9	6,8 7,1 7,4 7,7	6,3 6,7 7,1 7,5	6,0 6,4 6,8 7,2	5,7 6,1 6,5 6,9
630-1000	1,0 0,9 0,8 0,7	8,7 8,8 8,9 9,0	6,5 6,8 7,1 7,4	5,8 7,2 6,6 7,0	5,5 5,9 6,3 6,7	5,0 5,5 6,0 6,5
1600	1,0 0,9 0,8 0,7	8,9 9,0 9,1 9,2	6,7 7,0 7,3 7,6	5,9 6,3 6,7 7,1	5,5 5,9 6,3 6,7	5,1 5,6 6,1 6,6

Таблица 2

Значение коэффициента *c* для определения (по упрощенной формуле) сечений проводников и потери напряжения в электропроводках

Напряжение приемника, В	Система сети и род тока	Коэффициент *c* для проводов	
		медных	алюминиевых
500	Трехфазная	132	80
660	Трехфазная	231	138
380/220	Трехфазная с нулевым проводом	77	46
380/220	Двухфазная с нулевым проводом	34	20
220	Двухпроводная переменного или постоянного тока	12,8	7,7
220/127	Трехфазная с нулевым проводом	25,6	15,6
220/127	Двухфазная с нулевым проводом	11,4	6,9
127	Двухпроводная переменного или постоянного тока	4,3	2,6
110	Двухпроводная переменного или постоянного тока	3,2	1,4

Приложение 3

Коэффициенты использования вертикальных заземлителей $\eta_в$ и горизонтальных соединительных полос $\eta_г$

Количество вертикальных заземлителей	Отношение расстояния между вертикальными заземлителями к их длине *a*/*l*					
	1		2		3	
	$\eta_в$	$\eta_г$	$\eta_в$	$\eta_г$	$\eta_в$	$\eta_г$
При расположении полос по периметру замкнутого круга						
4	0,69	0,45	0,78	0,55	0,85	0,70
6	0,62	0,40	0,73	0,48	0,80	0,64
8	0,58	0,36	0,71	0,43	0,78	0,60
10	0,55	0,34	0,69	0,40	0,76	0,56
20	0,47	0,27	0,64	0,32	0,71	0,45
30	0,43	0,24	0,60	0,30	0,68	0,41
50	0,40	0,21	0,56	0,28	0,66	0,37
70	0,38	0,20	0,54	0,26	0,64	0,35
100	0,35	0,19	0,52	0,24	0,62	0,39
При расположении полос в ряд						
3	0,78	0,80	0,86	0,92	0,91	0,95
4	0,74	0,77	0,83	0,89	0,88	0,92
5	0,70	0,74	08,1	0,86	0,87	0,90
6	0,63	0,71	0,77	0,83	0,83	0,88
10	0,59	0,62	0,45	0,75	0,81	0,82
15	0,54	0,50	0,70	0,64	0,78	0,74
20	0,49	0,42	0,68	0,56	0,77	0,68
30	0,43	0,31	0,65	0,46	0,75	0,58

Приложение 4

Перечень стандартов на взрывозащищенное электрооборудование

№ п/п	Обозначение ГОСТ Р	Наименование ГОСТ Р	Взамен ГОСТ
1	ГОСТ Р 51330.0-99 (МЭК 60079-0-98)	Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 0. Общие требования	22782.0-81 12.2.020-76
2	ГОСТ Р 51330.1-99 (МЭК 60079-1-98)	Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 1. Взрывозащита вида «Взрывонепроницаемая оболочка»	22782.6-81
3	ГОСТ Р 51330.2-99 (МЭК 60079-1А-75)	Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 1. Взрывозащита вида «Взрывонепроницаемая оболочка». Дополнение 1. Приложение D. Метод определения безопасного экспериментального максимального зазора	–
4	ГОСТ Р 51330.3-99	Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 2. Заполнение или продувка оболочки под избыточным давлением «р»	22782.4-78
5	ГОСТ Р 51330.4-99 (МЭК 60079-3-90)	Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 3. Искрообразующие механизмы для испытаний электрических цепей на искробезопасность	22782.5-78
6	ГОСТ Р 51330.5-99 (МЭК 60079-4-75)	Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 4. Метод определения температуры самовоспламенения	–
7	ГОСТ Р 51330.6-99 (МЭК 60079-5-97)	Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 5. Кварцевое заполнение оболочки «q»	22782.2-77
8	ГОСТ Р 51330.7-99 (МЭК 60079-6-95)	Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 6. Масляное заполнение оболочки «о»	22782.1-77
9	ГОСТ Р 51330.8-99	Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 7. Защита вида «е»	22782.7-81
10	ГОСТ Р 51330.9-99 (МЭК 60079-10-95)	Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 10. Классификация взрывоопасных зон	–
11	ГОСТ Р 51330.10-99 (МЭК 60079-11-98)	Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь «i»	22782.5-78
12	ГОСТ Р 51330.11-99 (МЭК 60079-12-78)	Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 12. Классификация смесей газов и паров с воздухом по безопасным экспериментальным минимальным зазорам и минимальным воспламеняющим токам	–
13	ГОСТ Р 51330.12-99 (МЭК 60079-13-82)	Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 13. Проектирование и эксплуатация помещений, защищенных избыточным давлением	–

Продолжение

№ п/п	Обозначение ГОСТ Р	Наименование ГОСТ Р	Взамен ГОСТ
14	ГОСТ Р 51330.13-99 (МЭК 60079-14-96)	Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 14. Электроустановки во взрывоопасных зонах (кроме подземных выработок)	–
15	ГОСТ Р 51330.14-99	Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 15. Защита вида «n»	–
16	ГОСТ Р 51330.15-99 (МЭК 60079-16-90)	Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 16. Принудительная вентиляция для защиты помещений, в которых устанавливают анализаторы	–
17	ГОСТ Р 51330.16-99 (МЭК 60079-17-96)	Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 17. Проверка и техническое обслуживание электроустановок во взрывоопасных зонах (кроме подземных выработок)	–
18	ГОСТ 51330.17-99 (МЭК 60079-18-92)	Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 18. Взрывозащита вида «Герметизация компаундом (m)»	–
19	ГОСТ Р 51330.18-99 (МЭК 60079-19-93)	Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 19. Ремонт и проверка электрооборудования, используемого во взрывоопасных газовых средах (кроме подземных выработок или применений, связанных с переработкой и производством взрывчатых веществ)	–
20	ГОСТ Р 51330.19-99 (МЭК 60079-20-96)	Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 20. Данные по горючим газам и парам, относящиеся к эксплуатации электрооборудования	–
21	ГОСТ Р 51330.20-99	Электрооборудование рудничное. Изоляция, пути утечки и электрические затворы. Технические требования и методы испытаний	24719-81
22	ГОСТ Р 51330.22-99 (МЭК 61241-3-99)	Электрооборудование, применяемое в зонах, опасных по воспламенению горючей пыли. Часть 3. Классификация зон	–
23	ГОСТ Р (МЭК 61241-2-1-99)	Электрооборудование, применяемое в зонах, опасных по воспламенению горючей пыли. Часть 2. Методы испытаний. Раздел 1. Методы определения температуры самовоспламенения горючей пыли	–
24	ГОСТ Р (МЭК 61241-2-2-99)	Электрооборудование, применяемое в зонах, опасных по воспламенению горючей пыли. Часть 2. Методы испытаний. Раздел 2. Метод определения удельного электрического сопротивления пыли в слоях	–

Окончание

№ п/п	Обозначение ГОСТ Р	Наименование ГОСТ Р	Взамен ГОСТ
25	ГОСТ Р (МЭК 61241-2-3-99)	Электрооборудование, применяемое в зонах, опасных по воспламенению горючей пыли. Часть 2. Методы испытаний. Раздел 3. Методы определения минимальной энергии зажигания пылевоздушных смесей	–
26	ГОСТ Р (МЭК 61241-1-1-99)	Электрооборудование, применяемое в зонах, опасных по воспламенению горючей пыли. Часть 1. Электрооборудование, защищенное оболочками и ограничением температуры поверхности. Раздел 1. Технические требования	–
27	ГОСТ Р (МЭК 61241-1-2-99)	Электрооборудование, применяемое в зонах, опасных по воспламенению горючей пыли. Часть 1. Электрооборудование, защищенное оболочками и ограничением температуры поверхности. Раздел 2. Выбор, установка и эксплуатация	–
28	ГОСТ Р (МЭК 61779-1-99)	Электрические приборы для обнаружения и измерения горючих газов. Часть 1. Общие требования и методы испытаний	–
29	ГОСТ Р (МЭК 61779-2-99)	Электрические приборы для обнаружения и измерения горючих газов. Часть 2. Требования к рабочим характеристикам приборов группы I, имеющих индикацию до 5 % объемной концентрации метана в воздухе	–
30	ГОСТ Р (МЭК 61779-3-99)	Электрические приборы для обнаружения и измерения горючих газов. Часть 3. Требования к рабочим характеристикам приборов группы I, имеющих индикацию до 100 % объемной концентрации метана в воздухе	–
31	ГОСТ Р (МЭК 61779-4-99)	Электрические приборы для обнаружения и измерения горючих газов. Часть 4. Требования к рабочим характеристикам приборов группы II, имеющих индикацию до 100 % объемной концентрации метана в воздухе	–
32	ГОСТ Р (МЭК 61779-5-99)	Электрические приборы для обнаружения и измерения горючих газов. Часть 5. Требования к рабочим характеристикам приборов группы II, при объемных концентрациях газа до 100 %	–

Черкасов Владимир Николаевич
Костарев Николай Павлович

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Учебник

Редактор *Е.В. Пашкина*
Редактор *Р.П. Горностаев*
Технический редактор *Н.М. Чикина*
Корректор *Н.В. Федькова*
Компьютерный набор *Р.П. Горностаев*
Компьютерная верстка *Р.П. Горностаев*

ЛР № 020611 от 30.12.97
Подписано в печать 28.11.02. Формат 60x84 1/16. Печ. л. 23,75. Уч.-изд. л. 19.
Бумага офсетная. Тираж 1000 экз. Заказ _____

Академия ГПС МЧС России
129366, Москва, ул. Б. Галушкина, 4

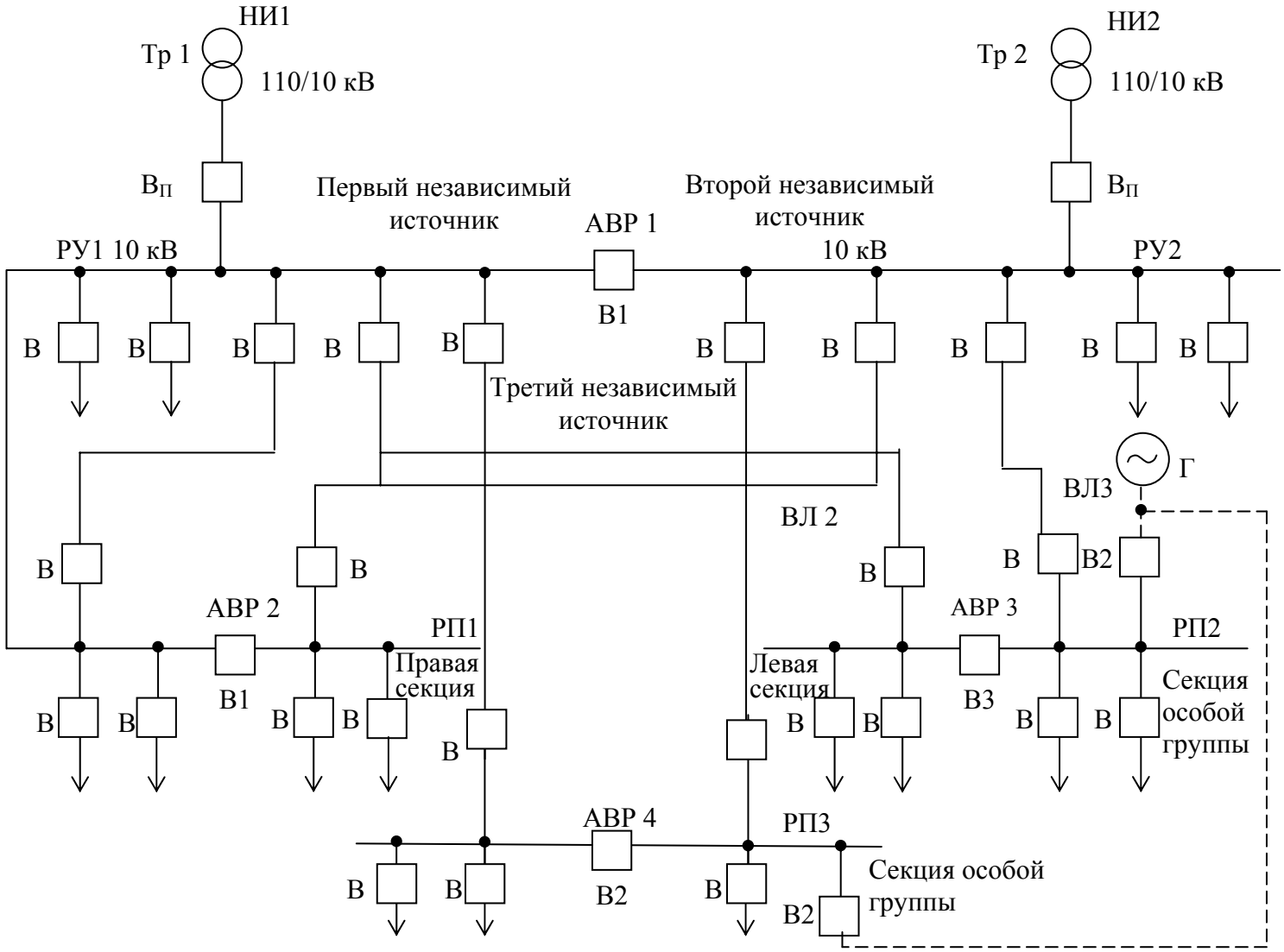


Рис. 1.1. Принципиальная схема электроснабжения объекта с потребителями особой группы I категории

Рис. 1.5. Блок–схема тестирования электротехнических изделий на пожарную опасность

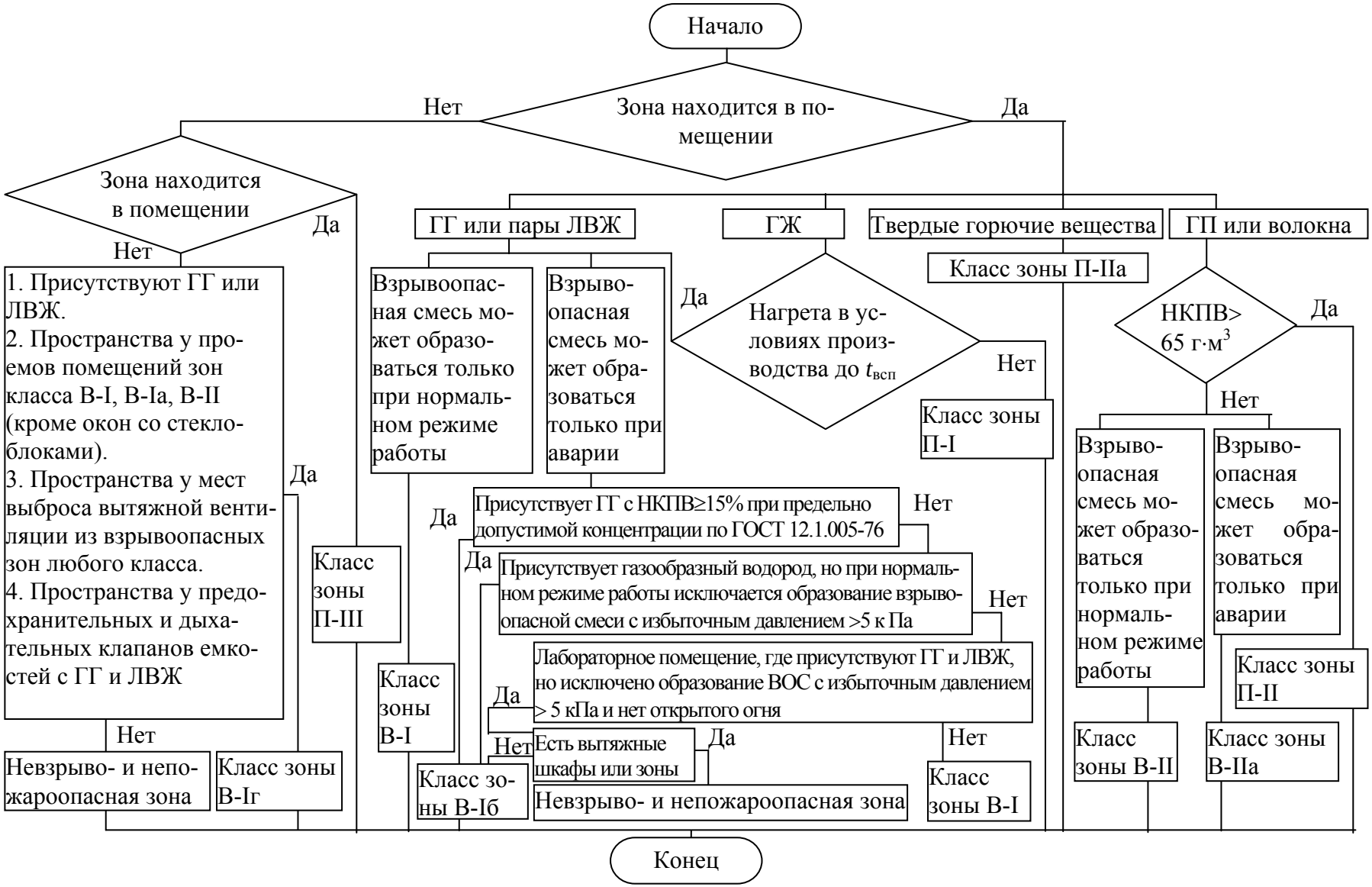


Рис. 2.1. Алгоритм методики определения классов взрыво- и пожароопасных зон

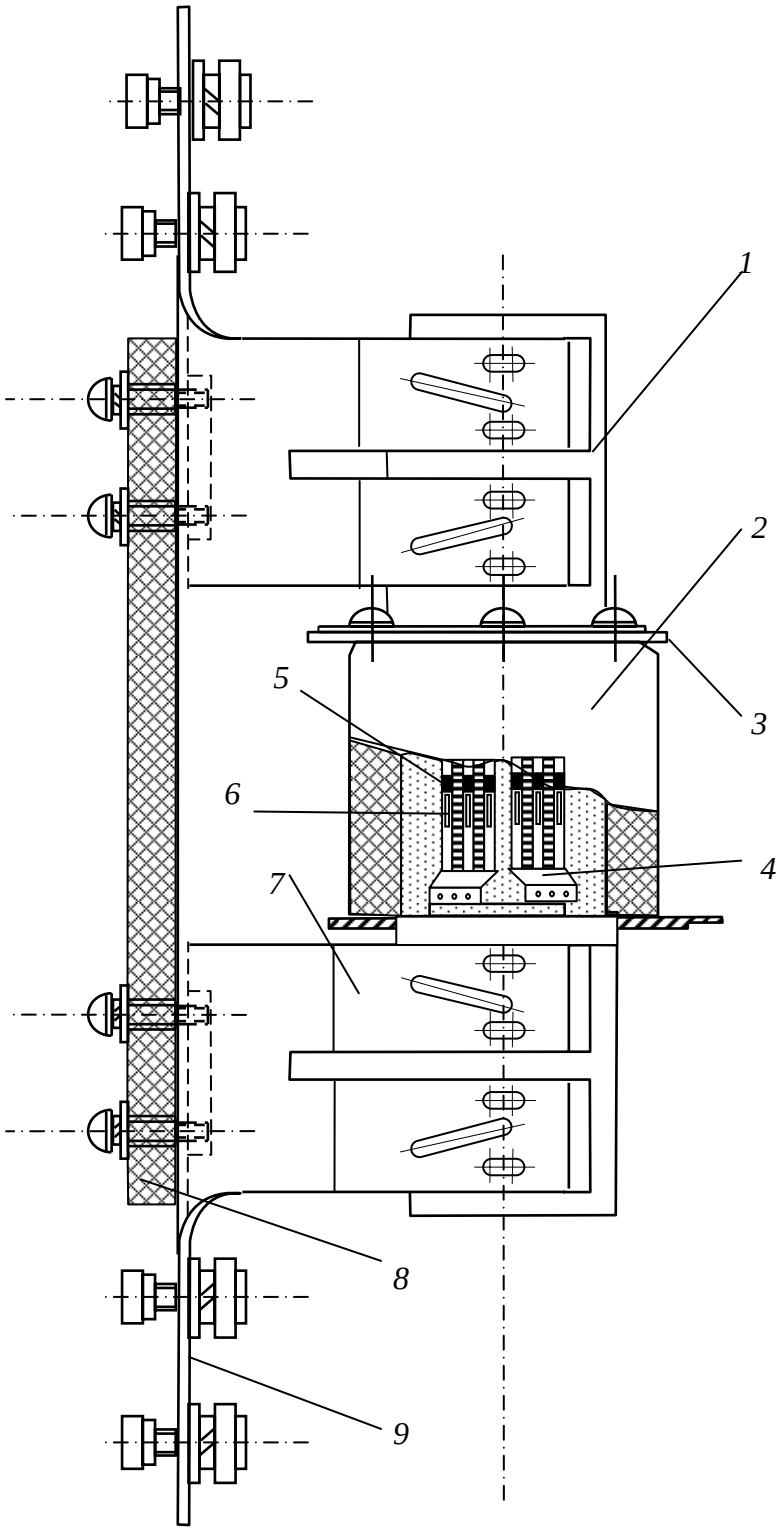


Рис. 3.6. Предохранитель типа ПН-2 – 400:
1 – контактные ножи; *2* – фарфоровая трубка (корпус); *3* – металлическая крышка; *4* – плавкая вставка (элемент); *5* – олово; *6* – места расплавления пластин плавкового элемента; *7* – медная стойка; *8* – изоляционная плита; *9* – зажим

Таблица 2.17

Взрывозащита электрооборудования				Категория и группа взрывоопасной смеси, для которых предназначено электрооборудование	Маркировка по		
Уровень	Вид	Группа или подгруппа	Температурный класс		ПУЭ–86 или ГОСТ 12.2.020–76	ПИВРЭ	ПИВЭ
Повышенная надежность против взрыва	"e"	II	Т6	Все категории и группы	2ExeIIT6	Н4Т5–Н	НОД
То же	"e" и взрывонепроницаемая оболочка	IIB	Т3	IIA–IIB (1–3) категории, группы Т1(А) – Т3(Г)	2ExedIIBT3	Н3Т3–НВ	НЗГ
>>	Искробезопасная электрическая цепь	IIC	Т6	Все категории и группы	2ExicIICT6	Н4Т5–И	2ИО сероуглерод
Взрывобезопасный	Взрывонепроницаемая оболочка	IIA	Т3	IIA (1 и 2) категории, группы Т1(А) – Т3(Г)	1ExedIIAT3	В2Т3–В	В2Г
То же	Искробезопасная электрическая цепь и взрывонепроницаемая оболочка	IIB	Т4	IIB (3) категории, группы Т1(А) – Т4(Г)	1ExidIIBT4	В3Т4–ИВ	ИЗГ эфир
Взрывобезопасный	Заполнение объема оболочки под избыточным давлением	IIC	Т6	Все категории и группы	1ExpIICT6	В4Т5–П	ПОД
То же	Масляное заполнение оболочки	II	Т5	То же Т1(А) – Т5(Д)	1ExoIIT5	В4Т5–М	МОД
Особовзрывобезопасный	Искробезопасная электрическая цепь	IIC	Т6	Все категории и группы	0Exi_aIICT6	О4Т5–И	ИО сероуглерод
То же	Специальный и искробезопасная электрическая цепь	IIC	Т6	То же	0Exsi_aIICT6	О4Т5–СИ	СОД И водород

Таблица 2.19

Электрооборудование	Допустимые уровни взрывозащиты или степень защиты электрооборудования для взрывоопасных зон класса *					
	В-I(1)	В - Iа (2)	В – Iб (3)	В - Iг (1,2)	В-II (10)	В - IIа (11)
Электрические машины (стационарные и передвижные)	1 В	2 Н	Невзрывозащищенные, оболочка *IP*44	2 Н	1 В	Невзрывозащищенные, оболочка *IP*54**
Электрические аппараты и приборы стационарные:						
искрящие или подверженные нагреву выше 80 °С	1 В	2 Н	Невзрывозащищенные, оболочка *IP*44***	2 Н	1 В	Невзрывозащищенные, оболочка *IP*54***
искрящие и не подверженные нагреву выше 80 °С	1 В	Невзрывозащищенные, оболочка IP54***	–	Невзрывозащищенные, оболочка *IP*54***	1 В	–
Электрические аппараты и приборы передвижные или являющиеся частью передвижных установок	1 В	2 Н	2 Н	2 Н	2 Н	Невзрывозащищенные, оболочка *IP*54
Аппараты и приборы ручные, переносные, электрические светильники стационарные	1 В	2 Н	Невзрывозащищенные, оболочка *IP*5X***	2 Н	2 Н	Невзрывозащищенные, оболочка *IP*54***
Электрические светильники переносные	1 В	1 В	2 Н	2 Н	1 В	2 Н

* В числителе указан уровень взрывозащиты по ГОСТ 12.2.020-76 [13], в знаменателе - по ПИВРЭ [7].

** До освоения электрических машин в оболочках *IP*54 [16] могут применяться оболочки со степенью защиты *IP*44.

*** Степень защиты оболочки от проникновения воды - вторая цифра обозначения. Должна устанавливаться (может уточняться) в зависимости от конкретных условий применения.

Таблица 6.1

Степень защиты светильника от пыли (первая цифра)		Степень защиты светильника от воды (вторая цифра)						
		Водонезащищенный (защита отсутствует)	Каплезащищенный (защита от попадания капель, падающих сверху под углом к вертикали, равным или меньшим 15°)	Дождезащищенный (защита от попадания капель или струй, падающих сверху под углом к вертикали, равным или меньшим 60°)	Брызгозащищенный (защита от попадания капель или брызг)	Струезащищенный (защита от попадания воды при обливании струей)	Водонепроницаемый (защита от попадания воды при погружении в воду)	Герметический (защита от попадания воды при неограниченно долгом погружении в воду)
		0	2	3	4	5	7	8
		Вид защиты						
Открытый пыленезащищенный (токоведущие части и колба лампы не защищены от попадания пыли)	2	*IP*20	*IP*22	*IP*23	-	-	-	-
Перекрытый пыленезащищенный (попадание пыли ограничивается неуплотненными светопропускающими оболочками)	2′	2′0	2′2	2′3	-	-	-	-
Частично пылезащищенный (токоведущие части защищены от попадания пыли в количествах, достаточных для повреждения или нарушения удовлетворительной работы светильника)	5′	6′0	5′2	5′3	5′4	5′5	-	-
Полностью пылезащищенный (токоведущие части и колба лампы защищены от попадания пыли в количествах, достаточных для повреждения или нарушения удовлетворительной работы светильника)	5	*IP*50	*IP*52	*IP*53	*IP*54	*IP*55	-	-
Частично пыленепроницаемый (токоведущие части полностью защищены от попадания пыли)	6′	6′ 0	6′ 2	6′ 3	6′ 4	6′ 5	6′ 7	6′ 8
Полностью пыленепроницаемы (токоведущие части и колба лампы полностью защищены от попадания пыли)	6	*IP60*	*IP62*	*IP63*	*IP64*	*IP65*	*IP67*	*IP68*

Литература

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ).-М.:Энергоатомоиздат, 1986.

2. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. РД 34.21.122-87-М.:Энергоатомоиздат, 1989.

3. *Черкасов В.Н.* Защита пожаро- и взрывоопасных зданий и сооружений от молнии и статического электричества.-М.:Стройиздат, 1993.

4. Правила защиты от статического электричества в производствах химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности.-М.:Химия, 1973.

5. НПБ 105-95. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности.-М.:ГУГПС МВД России.

6. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.

7. Правила изготовления взрывозащищенного и рудничного электрооборудования (ПИВРЭ).-М.:Энергия, 1969.

8. Правила изготовления взрывозащищенного электрооборудования (ПИВЭ).-М.-Л.:Энергия, 1963.

9. ГОСТ 12.1.011-78. Смеси взрывоопасные. Классификация и методы испытаний.

10. Правила эксплуатации электроустановок потребителей.-М.:Энергоатомоиздат, 1992.

11. ГОСТ 12.2.021-76. Электрооборудование взрывозащищенное. Порядок согласования технической документации, проведение испытаний, выдача заключений и свидетельств.

12. РД-03-67-94. Инструкция о порядке выдачи разрешений на выпуск и применение горно-шахтного оборудования, взрывозащищенных и в рудничном исполнении электротехнических изделий Федеральным горным и промышленным надзором России.

13. ОСТ 16 0.800.699-79-ОСТ 16 0.800.704-79.Оборудование электротехническое взрывозащищенное. Выбор и применение зарубежного электрооборудования для взрывоопасных установок.-М.:Минэлектропром СССР, 1981.

14. ГОСТ 12.2.020-76. Электрооборудование взрывозащищенное. Термины и определения. Классификация. Маркировка.

15. ГОСТ 22782.5-78. Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «Искробезопасная электрическая цепь».

16. ГОСТ 14254-96. Электрооборудование напряжением до 1000 В. Оболочки. Степени защиты.

17. ГОСТ 22782.2-77. Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «Кварцевое заполнение оболочки».

18. ГОСТ 22782.0-81. Электрооборудование взрывозащищенное. Общие технические требования и методы испытаний.

19. ГОСТ 22782.1-77. Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «Масляное заполнение оболочки».

20. ГОСТ 22782.3-77. Электрооборудование взрывозащищенное со специальным видом взрывозащиты.

21. ГОСТ 22782.4. Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «Заполнение или продувка оболочки под избыточным давлением».

22. ГОСТ 22782.6-81. Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «Взрывонепроницаемая оболочка».

23. ГОСТ 22782.7-81. Электрооборудование взрывозащищенное с защитой вида «е».

24. *Черкасов В.Н., Кузнецов В.А.* Методические указания к решению задач по выбору электрооборудования для пожаро- и взрывоопасных производств.-М.:ВИПТШ МВД СССР, 1988.

25. СНиП 3.05.06-85. Электротехнические устройства. ВНИИпроектэлектромонтаж.

26. Инструкция по монтажу электрооборудования, силовых и осветительных сетей взрвоопасных зон. ВСН 332-74/ММСС СССР.-М.:Энергия, 1976.

27. НПБ 05-93. Порядок участия органов государственного пожарного надзора Российской Федерации в работе комиссий по приемке в эксплуатацию законченных строительством объектов.-М.:ГУ ГПС МВД России.

28. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей.-М.:Госэнергоиздат, 1994.

29. РД 16.407-95. Электрооборудование взрывозащищенное. Ремонт.

30. Инструкция по монтажу электрооборудования пожароопасных установок напряжением до 1000 В. ВСН-294-72/ММСС СССР.-М.:Энергия, 1974.

31. *Базелян Э.М., Горин Б.Н., Литвинов В.И.* Физические и инженерные основы молниезащиты.-Л.:Гидрометеоиздат, 1978.

32. Электрическая безопасность при заполнении резервуаров нефтепродуктами /Максимов Б.К. и др.-М.:Энергоатомиздат, 1989.

33. Рекомендации по режимам налива светлыми нефтепродуктами стационарных резервуаров и железнодорожных цистерн на нефтеперерабатывающих заводах.-М.:ХОЗУ Миннефтехимпрома СССР, 1988.

34. *Максимов Б.К., Обух А.А.* Статическое электричество в промышленности и защита от него.-М.:Энергия, 1978.

35. НПБ 111-98*. Автозаправочные станции. Требования пожарной безопасности.-М.:ГУГПС МВД России, 1998.

36. Изменения и дополнения, внесенные в правила пожарной безопасности Российской Федерации (ППБ 01-93).-М.:ГУГПС, ВНИИПО МВД России, 1998.

37. ППБ 01-93. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.-М.:ГУГПС МВД России, 1993.

38. ГОСТ Р 50913-96. Автомобильные транспортные средства для транспортирования и заправки нефтепродуктов.

39. ГОСТ 12.01.18-86. Статическое электричество. Искробезопасность. Общие требования.

40. ГОСТ 12.1.019-79. Электробезопасность. Общие требования.

41. ГОСТ Р 50571.3-94. Электроустановки зданий. Часть 4. Требования по обеспечению безопасности. Защита от поражения электрическим током.

42. ГОСТ Р 50669-94. Электроснабжение и электробезопасность мобильных (инвентарных) зданий из металла или с металлическим каркасом для уличной торговли или бытового обслуживания. Технические условия.

43. Справочник по электрическим машинам. Т.1.-М.:Энергоиздат, 1998.

44. НПБ 243-97. Устройства защитного отключения. Требования пожарной безопасности. Методы испытаний.

45. *Смелков Г.И., Пехотиков В.А.* Пожарная безопасность светотехнических изделий.-М.:Энергоатомоиздат, 1991.

46. ГОСТ 15845-70. Кабели, провода и шнуры. Термины и определения.

47. ГОСТ 20.57.406-81. Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические методы испытаний.

48. *Фокин Ю.А., Туфанов В.А.* Оценка надежности систем электроснабжения.-М.:Энергоиздат, 1981.

49. ГОСТ Р 51330.9-99 (МЭК 60079-10-95). Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 10. Классификация взрывоопасных зон.