

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В.Г. Басманов

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Киров

2014

УДК 621.311.015

Б 274

Рекомендовано к изданию методическим советом
электротехнического факультета ФГБОУ ВПО
«ВятГУ»

Допущено редакционно-издательской комиссией методического совета
ФГБОУ ВПО «ВятГУ» в качестве учебного пособия для студентов
электроэнергетических специальностей всех форм обучения

Рецензенты:

Бакшаев В.А. , начальник службы подстанций ПО «Северные электрические сети»
филиала «Кировэнерго» ОАО «МРСК Центра и Приволжья»
кандидат технических наук, доцент кафедры электрические станции ФГБОУ ВПО
«ВятГУ» А.В. Бессолицын

Басманов, В.Г.

Техника высоких напряжений: учеб. пособие для вузов в двух частях. Часть 1 / В.Г.
Басманов – Киров: ПРИП ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2014. – 245 с.

В пособии рассматриваются вопросы связанные с изучением электрических характеристик внешней и внутренней изоляции электроустановок, эксплуатации изоляции при рабочем напряжении, грозовых и внутренних перенапряжений и способов их ограничения, методов испытаний изоляции, а также изоляционных конструкций линий электропередач и основных видов электрооборудования.

Учебное пособие предназначено для студентов направления 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» и для студентов специальностей 140211.65 «Электроснабжение», 140610.65 «Электрооборудование и электрохозяйства предприятий, организаций, учреждений», 140204.65 «Электрические станции», 140205.65 «Электроэнергетические системы и сети» всех форм обучения. Рекомендуется при изучении дисциплин: «Изоляция и перенапряжение», «Техника высоких напряжений (ТВН)», «Высоковольтная изоляция».

УДК 621.311.015

Б 274

© Басманов В.Г., 2014.

© ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2014.

Введение

Основной задачей техники высоких напряжений является обеспечение электрической изоляции проводов и элементов аппаратов, находящихся под напряжением. Изоляция является существенной составной частью конструкций устройств высокого напряжения и обычно помимо изоляционных задач выполняет еще и другие функции, в частности восприятие или передачу механических сил, отвод тепла или герметизацию от окружающей среды.

Изоляция электроустановок может быть разделена на внешнюю и внутреннюю изоляцию. К внешней изоляции относятся воздушные промежутки и части изоляционных конструкций, которые соприкасаются с воздухом. Внутренняя изоляция находится внутри корпуса трансформатора или аппарата, кабельной оболочки и т.д., она состоит из комбинации различных жидких, твердых и газообразных диэлектриков.

Под влиянием больших напряженностей электрического поля, которые могут возникать в процессе эксплуатации, возможна частичная или полная потеря изоляцией ее диэлектрических свойств – пробой изоляции. Характер повреждения и его последствия различны для внешней и внутренней изоляции.

Основной особенностью внешней (воздушной) изоляции является зависимость ее электрической прочности от атмосферных условий: давления, температуры и влажности воздуха. На электрическую прочность изоляторов наружной установки существенно влияют также загрязнения их поверхности и атмосферные осадки.

Электрическая прочность внутренней изоляции электрооборудования практически не подвержена влиянию атмосферных условий. Ее особенностью является старение, т. е. ухудшение электрических характеристик в процессе эксплуатации. Очень трудно избежать возникновения в изоляции частичных разрядов. Вследствие изменения температурного режима, вызванного колебаниями тока нагрузки, в бумажно-масляной изоляции кабеля образуются газовые пузырьки, в которых возникают частичные разряды. На острых кромках электродов, на крепежных деталях аппаратуры возникает коронный разряд. Под действием этих разрядов изоляция разрушается, загрязняется продуктами разложения.

Вследствие диэлектрических потерь изоляция нагревается. При затрудненном теплоотводе, что характерно для изоляции большой толщины, чрезмерный нагрев может привести к тепловому пробое изоляции.

Воздушная (внешняя) изоляция после пробоя полностью самовосстанавливается, если снимается напряжение или гаснет дуга в месте пробоя.

Пробой твердой и комбинированной изоляции - явление необратимое, приводящее к выходу из строя электрооборудования. Жидкая и внутренняя газовая изоляция самовосстанавливается, однако, пробои приводят к ухудшению их характеристик. Вследствие этого состояние внутренней изоляции контролируется во время эксплуатации, чтобы выявить развивающиеся в ней дефекты и предотвратить аварийный отказ электрооборудования.

Изоляция электрических установок постоянно находится под воздействием рабочего напряжения. В процессе эксплуатации возможны повышения напряжения сверх рабочего - внутренние перенапряжения. Источником их являются электродвижущие силы генераторов системы, а причиной - нормальные или аварийные коммутации, сопровождающиеся колебательными процессами или резонансными явлениями в системе. Помимо внутренних перенапряжений на изоляцию электроустановок могут воздействовать также грозовые перенапряжения, причиной возникновения которых являются удары молнии в электроустановки.

Воздушные сети вследствие большой протяженности достаточно часто поражаются молнией. При этом на изоляции линий возникают весьма высокие напряжения, которые изоляция выдержать не может. Происходит пробой воздуха вдоль гирлянды изоляторов, переходящий в поддерживаемый источником рабочего напряжения дуговой разряд. На линиях 3 - 35 кВ эффективным способом ликвидации замыканий фаз на землю является компенсация тока в месте замыкания с помощью дугогасящего реактора, включаемого между нейтральной точкой источника и землей. Вследствие компенсации тока и прекращения поступления энергии дуга в месте замыкания не может поддерживаться и быстро гаснет. В установках напряжением 110 кВ и выше экономически целесообразно применять глухое заземление нейтрали. В этом случае короткие замыкания на линии ликвидируются с помощью автоматического повторного включения (АПВ). Однако АПВ не всегда оказываются успешными, поэтому существенным мероприятием, значительно сокращающим число аварийных отключений линии, является применение грозозащитных тросов.

Совместное применение тросов и АПВ сводит к минимуму аварийные отключения воздушных линий при поражениях их молнией.

Помимо нарушения изоляции воздушных линий удары молнии приводят к появлению на проводах импульсов высокого напряжения, которые, распространяясь по проводам, достигают подстанций и воздействуют на установленное там электрооборудование.

Значения грозовых перенапряжений зависят от интенсивности ударов молнии и характеристик пораженных объектов и поэтому являются статистической величиной. Внутренние перенапряжения зависят от вида коммутации, режима и характеристик электрической сети и коммутационных аппаратов. Поэтому при многократном повторении одной и той же коммутации в системе каждый раз возникают различные перенапряжения. Таким образом, внутренние перенапряжения, как и грозовые, имеют статистический характер.

Ограничение перенапряжений в электрических установках до экономически приемлемых значений производится с помощью защитных аппаратов: трубчатых и вентильных разрядников, нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН).

Взаимное согласование значений воздействующих напряжений, характеристик защитной аппаратуры и электрических характеристик изоляции, обеспечивающее надежную работу и высокую экономичность электрической установки, представляет собой главную технико-экономическую задачу проектирования электроустановки и называется координацией изоляции.

В соответствии с изложенным выше, в пособии рассматриваются электрические характеристики внешней и внутренней изоляции электроустановок, эксплуатация изоляции при рабочем напряжении, грозовые и внутренние перенапряжения и их ограничение, координация и методы испытания изоляции, а также изоляционные конструкции линий электропередачи и основных видов электрооборудования.

Раздел 1. Разряд в газах и общие характеристики внешней изоляции

Глава 1. Напряжения, воздействующие на изоляцию, координация изоляции. Общая характеристика внешней изоляции электроустановок. Основные виды электрического разряда в газах

§1.1. Напряжения, воздействующие на изоляцию

Каждая электроустановка, предназначенная для выработки, передачи и распределения электроэнергии, имеет изоляцию, соответствующую ее номинальному напряжению.

Согласно ГОСТ 1516.3-96 для электрооборудования установлены:

- класс напряжения электрооборудования $U_{ном}$ — номинальное междуфазное напряжение электрической сети, для работы в которой предназначено оборудование;
- наибольшее рабочее напряжение электрооборудования $U_{раб. наиб.эл.об}$ — наибольшее напряжение частотой 50 Гц, неограниченно длительное приложение которого к зажимам разных фаз (полюсов) электрооборудования допустимо по условиям работы изоляции.

Кроме того, нормируется наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение в электрической сети $U_{раб. наиб.}$.

Классы напряжений, принятые в России для электроэнергетических систем, приведены в табл 1.1. Данные для классов напряжения 3-750 кВ приведены по ГОСТ 1516.3-96, для класса напряжения 1150 кВ — по техническим условиям.

Повышение напряжения сверх наибольшего рабочего напряжения называется перенапряжением. Перенапряжения подразделяются на внутренние и грозовые.

Таблица 1.1. Классы напряжения электрооборудования электроэнергетических систем

Класс напряжения (U _{ном}), кВ	3	6	10	15	20	35	110	150	220	330	500	750	1150
U _{раб. наиб.эл.об} , кВ	3,6	7,2	12,0	17,5	24,0	40,5	126,0	172,0	252,0	363,0	525,0	787,0	1207,5
U _{раб. наиб} , кВ	3,5	6,9	11,5	17,5	23,0	40,5	126,0	172,0	252,0	363,0	525,0	787,0	1207,5
U _{раб. наиб} / U _{ном}	1,15									1,10	1,05		
Режим заземления нейтрали	Изолированная						Заземленная						

Источником энергии внутренних перенапряжений является запасенная в реактивных элементах системы (индуктивных и емкостных) энергия, которая обуславливает появление перенапряжений в переходных режимах при нормальных и аварийных коммутациях. Значения внутренних перенапряжений зависят от параметров электрической системы и характеристик коммутирующих аппаратов и поэтому носят статистический характер.

Во внутренних перенапряжениях следует выделять резонансные и коммутационные перенапряжения. Резонансные перенапряжения возникают при определенном соотношении между индуктивностями и емкостями цепи. Они могут существовать сравнительно долго - до изменения схемы или режима. Они часто называются установившимися, или квазистационарными, перенапряжениями. Коммутационные перенапряжения возникают при различных коммутациях. Эти перенапряжения имеют длительность от единиц до десятков миллисекунд. Амплитуды коммутационных перенапряжений обычно превышают амплитуды резонансных перенапряжений.

К внутренним перенапряжениям также относятся кратковременные повышения напряжения промышленной частоты, которые обусловлены изменением режима работы электроустановки.

Повышения напряжений регламентированы допустимыми значениями в зависимости от вида электрооборудования при заданных их длительностях в пределах от нескольких часов до долей секунды. Для них установлено также допустимое число повышений напряжения данного значения за год.

Причиной грозových перенапряжений являются удары молнии в электроустановку или вблизи нее (индуктированные перенапряжения). Грозовые перенапряжения имеют длительность до сотни микросекунд. Поскольку значения токов молнии подвержены статистическим разбросам, то грозовые перенапряжения являются статистическими величинами.

Длительные рабочие напряжения, грозовые и внутренние перенапряжения воздействуют на изоляцию электроустановок. Необходимо обеспечить надежную работу изоляции при таких воздействиях в течение всего срока службы электроустановки.

§1.2. Координация изоляции

Надежная работа изоляции обеспечивается путем координации изоляции. Под координацией изоляции понимается установление и поддержание в период эксплуатации необходимого согласования между электрической прочностью изоляции и воздействующими на нее напряжениями. При этом может быть допущена некоторая достаточно малая экономически оправданная вероятность повреждения изоляции или перерыва в электроснабжении потребителей. При решении задач координации изоляции обязательно необходимо учитывать статистические закономерности характеристик, как изоляции, так и воздействующих на нее напряжений. Стилизованная диаграмма координации изоляции представлена на рис. 1.1. На изоляцию воздействуют длительное рабочее напряжение 1; кратковременные повышения напряжения 2; квазистационарные перенапряжения 3; коммутационные перенапряжения 4; грозовые перенапряжения 5. При этом с точки зрения технической и экономической целесообразности максимальные значения квазистационарных, коммутационных и грозовых перенапряжений, как правило, ограничены средствами защиты от перенапряжений.

Электрическая прочность изоляции характеризуется обобщенной вольт-секундной характеристикой 6. Нижняя граница зоны разбросов этой характеристики должна быть выше воздействующих напряжений. Однако практически координация изоляции заключается в согласовании значений перенапряжений со значениями испытательных напряжений изоляции по ГОСТ 1516.3-96: при грозовых импульсах 7; при коммутационных импульсах 5; при кратковременном (одноминутном или плавном подъеме без выдержки времени) приложении переменного напряжения частотой 50 Гц 9; при длительном приложении переменного напряжения 50 Гц с изменением характеристик изоляции 10.

Защита от перенапряжений выполняется в соответствии с требованиями ПУЭ и включает в себя:

- защиту от прямых ударов молнии воздушных линий электропередачи, станций и подстанций с помощью молниеотводов;
- защиту электрооборудования станций и подстанций от импульсных грозовых перенапряжений, набегающих с линий, с помощью защитных аппаратов: нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) и вентильных разрядников (РВ); в отдельных случаях для защиты электрооборудования и воздуш-

ных линий электропередачи применяются трубчатые разрядники (РТ), а также защитные промежутки (ПЗ) размеры которых рекомендованы в ПУЭ;

- защиту от внутренних перенапряжений с помощью защитных аппаратов, резисторов, встроенных в выключатели, шунтирующих реакторов, а также с помощью различных способов заземления нейтрали.

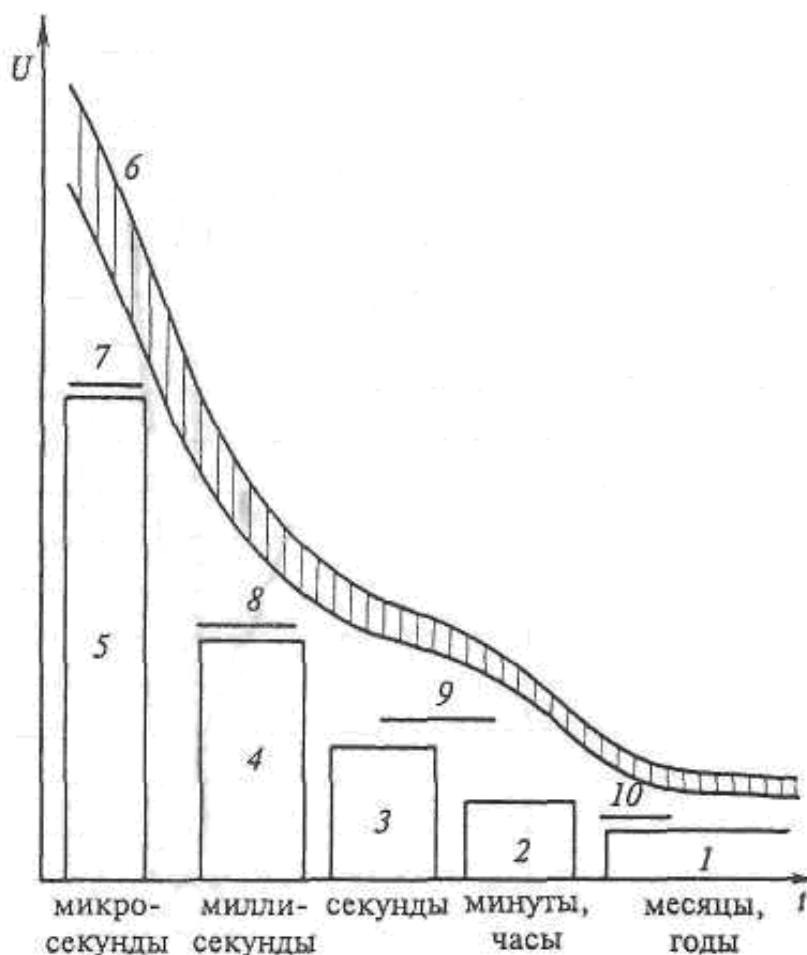


Рис. 1.1 Согласование электрической прочности изоляции электрооборудования и воздействующих на нее напряжений

Испытательные напряжения изоляции электрооборудования, по которым осуществляется координация изоляции, нормированы в ГОСТ 1516.3-96. Изоляция испытывается следующими напряжениями:

- полным и срезанным грозовым импульсом;
- коммутационным импульсом;
- кратковременным (одноминутным) напряжением частотой 50 Гц;
- переменным напряжением частотой 50 Гц при плавном подъеме;

- длительным переменным напряжением частотой 50 Гц с измерением характеристик изоляции, в частности, интенсивности частичных разрядов.

Необходимо отметить, что координация изоляции при длительном воздействии рабочего напряжения включает в себя систему мероприятий непрерывного и периодического контроля характеристик изоляции с целью исключения выхода значений этих характеристик за нормированные пределы.

§1.3. Общая характеристика внешней изоляции электроустановок.

Основные виды электрического разряда в газах

Изоляция электроустановок может быть разделена на внешнюю и внутреннюю изоляцию. К внешней изоляции относятся воздушные промежутки (например, между проводами ЛЭП, между проводами и опорой) и части изоляционных конструкций, которые соприкасаются с воздухом. Внутренняя изоляция находится внутри корпуса трансформатора или аппарата, кабельной оболочки и т.д., она состоит из комбинации различных жидких, твердых и газообразных диэлектриков.

Целесообразность использования диэлектрических свойств воздуха в энергетических установках разных классов напряжения объясняется меньшей стоимостью и сравнительной простотой создания изоляции. Для ее выполнения изолируемые электроды (провода, шины и др.) располагаются на определенных расстояниях друг от друга и от земли и закрепляются с помощью изоляционных конструкций из твердых диэлектриков – изоляторов. При этом чисто воздушные промежутки и промежутки в воздухе вдоль поверхностей изоляторов образуют внешнюю изоляцию установки.

Для внешней изоляции характерна зависимость электрической прочности от метеорологических условий, определяющих состояние основного диэлектрика – воздуха, а также состояние поверхностей изоляторов, т.е. количество и свойства загрязнений на них. На разрядные напряжения чисто воздушных промежутков и вдоль изоляторов внутренней установки оказывают влияние давление P , температура T и абсолютная влажность воздуха H , а на разрядные напряжения вдоль изоляторов наружной установки – кроме того, вид и интенсивность атмосферных осадков, количество и состав загрязнений в атмосфере и ветровые условия.

Показатели метеорологических условий непрерывно меняются во времени, поэтому воздушные изоляционные промежутки выбирают так, чтобы они имели требуемую электрическую прочность и при таких неблагоприятных условиях.

Внешняя изоляция обладает способностью быстро восстанавливать свою электрическую прочность до исходного уровня после пробоя и отключения от источника напряжения.

Основной диэлектрик внешней изоляции – атмосферный воздух не подвержен старению, т.е. независимо от воздействующих на изоляцию напряжений и режимов работы оборудования его средние характеристики остаются неизменными во времени.

Электрическая прочность воздуха при нормальных условиях составляет 25 - 30 кВ при расстояниях между электродами более 1 см. Поэтому изоляционные расстояния по воздуху в установках высокого и сверхвысокого напряжения достигают нескольких метров. Размеры же электродов (проводов, шин и др.), выбранных по плотности тока, механической прочности и другим условиям, оказываются сравнительно небольшими, и радиусы кривизны их поверхностей составляют не более единиц сантиметров. При таких соотношениях размеров электродов и межэлектродных расстояний электрические поля во внешней изоляции получаются резконеоднородными. Электрическая прочность воздуха в таких полях значительно ниже: при расстояниях около 1 м она составляет 5 - 6 кВ/см, а при расстояниях около 10 м снижается еще приблизительно в два раза и продолжает падать при дальнейшем увеличении межэлектродных расстояний. Поэтому с ростом номинального напряжения габаритные размеры и стоимость внешней изоляции значительно возрастает. Кроме того, при резконеоднородных полях во внешней изоляции возможен коронный разряд, который вызывает дополнительные потери энергии и интенсивные радиопомехи.

В связи с этим большое значение имеют меры по уменьшению степени неоднородности электрических полей, которые позволяют ограничить мощность потерь на корону до экономически оправданного уровня, снизить интенсивность радиопомех до допустимых значений, а также дают некоторое увеличение разрядных напряжений.

Основные виды электрического разряда в газах. Присутствие в воздухе заряженных частиц придает ему свойство электропроводности, чем обеспечивается прохождение некоторого тока через газ при приложении к электродам,

разделенным воздушным промежутком, электрического напряжения. Процессы, связанные с прохождением тока через газ, называются разрядом в газе.

Все процессы газового разряда принято разделять на два больших класса: несамостоятельный и самостоятельный разряды.

Несамостоятельный разряд - это процесс прохождения тока в газе, который обусловлен движением зарядов, созданных действием внешних ионизаторов, и зарядов, образовавшихся в результате начального развития ударной ионизации.

Когда в процессе развития ударной ионизации каждая последующая лавина зарядов содержит больше электронов, чем предыдущая, разряд переходит в самостоятельный. Основой развития самостоятельного разряда и его последней стадии - пробоя газа - является ударная ионизация.

Глава 2. Физические процессы при ионизации в газе

§2.1. Возбуждение и ионизация атомов и молекул. Лавина электронов. Несамостоятельный и самостоятельный разряды. Плазма

В нормальном неионизированном состоянии газы являются почти идеальными диэлектриками. Это состояние нарушается при напряженности поля, при которой в газе под действием сил поля возникает интенсивная ионизация – газовый разряд. При газовом разряде резко возрастает ток, стекающий с электродов. Этот ток является током конвекции, который обусловлен движением заряженных частиц между электродами. Чтобы описать газовый разряд, необходимо понять условия возникновения, движения и исчезновения заряженных частиц в электрическом поле.

Процесс отрыва электрона от нейтральной молекулы называется ионизацией. Для ионизации молекулы требуется затратить энергию. Процесс возбуждения – процесс перехода электрона на более удаленную неустойчивую орбиту, которая может также проходить в микропроцессах газового разряда; возбужденная молекула «живет» $\approx 10^{-10}$ с, потом происходит обратный переход электрона на устойчивую орбиту. Далее следует рассмотреть основные процессы, при которых молекуле в разрядном промежутке передается энергия достаточная для ее ионизации.

Ударная ионизация или ионизация столкновением. Так называется ионизация при столкновении молекулы с электроном, ускоренным в электрическом поле. В результате ионизации возрастает число свободных электронов – происходит размножение электронов. Схема ионизации молекулы при столкновении с электроном показана на рис. 1.1.

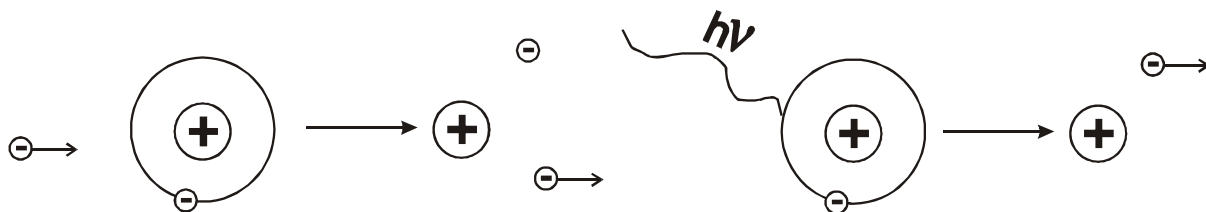


Рис. 1.1. Схема ударной ионизации электроном

Рис. 1.2. Схема ионизации фотоном

Ударная ионизация в газах возникает в достаточно сильных полях, но меньших, чем поля, в которых пробиваются многие жидкие и твердые диэлектрики.

Фотоионизация - это ионизация в результате поглощения молекулой квантов лучистой энергии, т.е. фотонов. Процесс фотоионизации схематически показан на рис. 1.2. Энергия фотона выражается формулой $w = h\nu$, где ν - частота излучения, с^{-1} ; h - постоянная Планка. Тогда условие ионизации выражается формулой

$$h\nu_{\text{и}} \geq U_{\text{и}}. \quad (1.1)$$

Из условия (1.1) следует, что повышение частоты увеличивает способность фотона к ионизации.

В газовом разряде источником фотонов, способных к ионизации, служат не только внешние излучатели, но и сами молекулы, участвующие в газовом разряде. В возбужденной молекуле электрон, смещенный на внешнюю неустойчивую орбиту, удерживается на ней в течение очень короткого промежутка времени $\approx 10^{-10}$ с. При возвращении электрона на устойчивую орбиту, молекула излучает фотон, который способен вызвать фотоионизацию нейтральных или уже возбужденных других молекул газа.

Процесс, включающий возбуждение молекулы газа в результате столкновения, излучение фотона при возврате электрона на устойчивую орбиту и ионизацию этим фотоном ранее возбужденной молекулы, показан на рис. 1.3.

Процесс ионизации вторичными фотонами играет решающую роль в формировании искрового разряда.

Электрон в результате соударения возбуждает молекулу, при возвращении электрона на устойчивую орбиту излучается фотон, ионизирующий другую возбужденную молекулу.

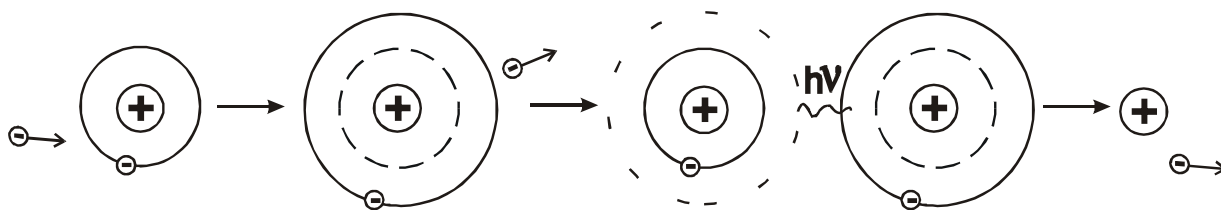


Рис. 1.3. Схема ионизации возбужденной молекулы

Термоионизация. Температура есть мера кинетической энергии хаотического (теплого) движения молекул и свободных электронов в газе. Величина этой кинетической энергии определяется для молекулы выражением

$$W=3/2kT, \quad (1.2)$$

где W – кинетическая энергия теплового движения для молекулы; k – постоянная Больцмана; T – температура.

При достаточно высокой температуре становится возможной ионизация в результате столкновения молекул с электронами.

Процесс термоионизации играет определяющую роль в столбе электрической дуги, температура которого составляет от 4000 до 15000° К.

Поверхностная ионизация. В ряде случаев в развитии электрического разряда в газовом промежутке существенную роль может играть поверхностная ионизация. Так называется эффект испускания из электродов заряженных частиц, в основном свободных электронов. Электроны, высвобождающиеся в результате поверхностной ионизации с катода, силами электрического поля уводятся от катода в область газового разряда. При поверхностной ионизации с анода электроны вновь притягиваются к аноду и поглощаются им. Поэтому для развития газового разряда основное значение имеет поверхностная ионизация с катода, которая имеет различные формы:

а) поверхностная ударная ионизация происходит под действием бомбардировки поверхности катода положительными ионами, ускоренными в электрическом поле (рис. 1.4). Для того чтобы освободить из катода один электрон,

т.е. для однократной поверхностной ионизации, положительный ион должен свободно пролететь в поле напряженности E расстояние $x_{п.и}=U_{п.и}/E$;

б) поверхностная фотоионизация (фотоэлектронная эмиссия) происходит при падении на поверхность катода фотонов достаточно высокой энергии;

в) термическая эмиссия электронов из катода – это эмиссия, при которой свободные электроны в металле за счет его нагрева приобретают энергию, достаточную для преодоления поверхностного потенциального барьера;

г) автоэлектронная эмиссия заключается в том, что электроны под действием сил электрического поля вырываются из катода. Автоэлектронная эмиссия происходит при напряженностях поля вблизи катода 10^6 В/см.

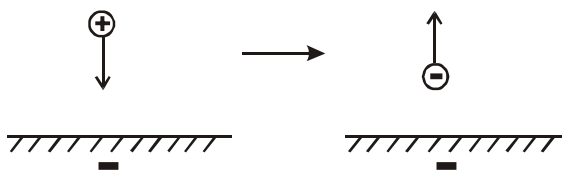


Рис. 1.4. Схема ударной поверхностной ионизации

Лавина электронов. Если напряженность электрического поля достигает значения, при котором возможна ударная ионизация, то в поле возникают лавинные процессы, в которых происходит размножение заряженных частиц – электронов и ионов.

Можно предположить, что в какой-либо точке поля с напряженностью E возник свободный электрон, обладающий энергией, достаточной для ионизации молекул газа. Этот начальный электрон может возникнуть, например, в результате фотоионизации молекул газа каким-либо внешним ионизатором. Этот электрон ионизирует молекулу, что приводит к образованию положительного иона и двух электронов. Разгоняясь в электрическом поле, каждый из этих электронов в свою очередь ионизирует по молекуле, что приводит к образованию трех положительных ионов и четырех электронов, и т.д. Этот лавинообразный процесс показан на рис. 1.5.

Электроны и ионы, образовавшиеся в лавине, перемещаются под действием электрического поля. Так как подвижность электронов много больше подвижности ионов, то в голове лавины образуется избыток электронов, а в ее хвосте преобладают положительно заряженные ионы.

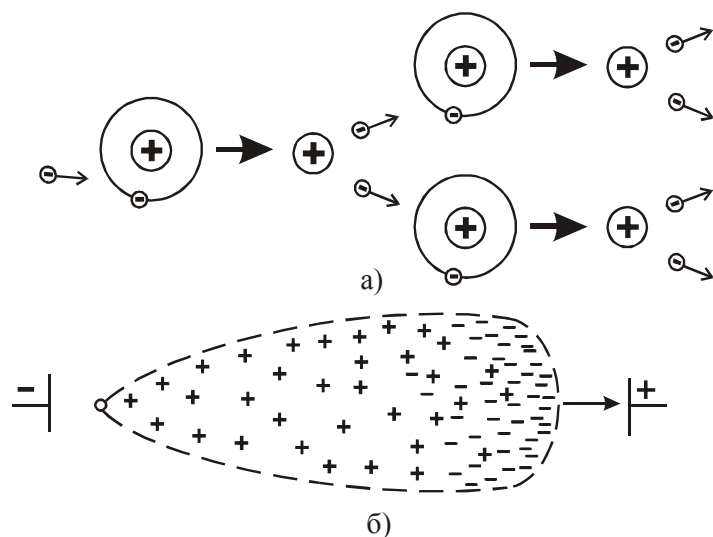


Рис. 1.5. Схема образования лавины электронов (а) и распределение в ней заряженных частиц (б)

Самостоятельный разряд. Для образования лавины необходим хотя бы один начальный электрон. В том случае, когда начальные электроны непрерывно воссоздаются, лавинный процесс не прекращается. Начальные электроны могут создаваться внешними ионизаторами, в этом случае разряд называется несамостоятельным. Воссоздание начальных электронов может происходить и за счет ионизационных процессов в самой лавине. В этом случае процесс носит самоподдерживающийся характер, и разряд называется самостоятельным. Ионизация в лавине сопровождается возбуждением части молекул и излучением фотонов. Излучаемые фотоны могут вызвать вторичную ионизацию в газе или на катоде.

Условием самостоятельного разряда является условие, при котором разряд будет поддерживаться, если даже действие внешнего ионизатора прекратится. Однако для начала развития разряда необходим исходный начальный электрон. Условие самостоятельного разряда:

$$\gamma(e^{\alpha S}-1) \geq 1. \quad (1.3)$$

Суммарный процесс образования вторичных электронов из катода характеризуется коэффициентом вторичной ионизации γ - второй коэффициент Таунсенда. Коэффициент γ зависит от материала катода, состава и давления газа и всегда $\gamma \ll 1$. Если $\gamma(e^{\alpha S}-1)$ будет даже незначительно превышать единицу, число развивающихся в промежутке лавин будет непрерывно возрастать. Последующие лавины будут возникать еще до того, как все положительные ионы

предыдущих лавин уйдут на катод. Следовательно, электроны будут двигаться в объеме, заполненном положительными ионами, и вдоль пути лавин газ в промежутке между электродами перейдет в состояние плазмы.

В случае однородного поля условие самостоятельности разряда является условием пробоя промежутка, поэтому оно может быть использовано для определения пробивного напряжения.

Пробивное напряжение газа в однородном поле при неизменной температуре является функцией произведения давления на расстояние между электродами.

Плазма представляет собой газ, в котором ионизирована значительная часть молекул. Отличительной особенностью плазмы как ионизированного газа является ее квазинейтральность, т.е. отсутствие избыточных зарядов какого-либо знака во всем объеме плазмы. Для поддержания плазменного состояния вещества необходима некоторая определенная достаточно высокая концентрация заряженных частиц, так как под действием хаотического теплового движения частиц легкие электроны стремятся уйти за пределы объема, занимаемого плазмой. Этому выходу противодействуют силы электрического поля, возникающие между вылетевшими электронами и оставшимися избыточными положительными ионами. Только при достаточно высокой концентрации частиц эти силы создают потенциальный барьер на границах плазмы, способный удержать электроны от вылета из плазмы и поддерживающий тем самым плазменное состояние вещества с ее свойством квазинейтральности.

Плазму рассматривают как четвертое состояние вещества, так как она обладает рядом специфических свойств. Имея схожесть с газом, плазма обладает также некоторыми свойствами металлов: плазма электропроводна, отражает электромагнитные волны. Плазма возникает в электрическом разряде при достаточно высокой степени ионизации в канале разряда (дуга, искровой разряд). Чем выше степень ионизации в разряде, тем выше и проводимость плазмы.

§2.2. Переход от лавинной формы самостоятельного разряда к искровому разряду в малых искровых промежутках с равномерным полем.

Образование стримеров

В разреженных газах каждая лавина ведет к нарастанию числа начальных электронов, инициирующих следующую лавину. В результате в каждой после-

дующей лавине возрастает число ионизаций. Этот процесс нарастает по экспоненциальному закону, пока промежуток между электродами не заполнится хорошо проводящей плазмой, состоящей из положительных ионов, оставшихся от предыдущих лавин, и электронов образованных последней лавиной. Таким образом, в разреженных газах разряд носит многолавиный характер. Из-за высокой разреженности газа основную роль во вторичной ионизации, создающей новые начальные электроны, играет фотоионизация с катода. Поэтому на разрядное напряжение промежутка заметно влияет материал катода, характеризующий потенциалом поверхностной ионизации.

При высокой плотности газа наблюдается иная картина развития самостоятельного разряда. Искажение поля положительными зарядами лавины оказывается в этом случае значительным, что приводит к выделению большого количества фотоионов и интенсивной фотоионизации в объеме газа вблизи головки лавины (рис. 1.6а). Образующиеся вторичные лавины направляются к головке первичной лавины, где напряженность поля особенно велика. Электроны вторичных лавин проникают внутрь первичной лавины, образуя с ее положительными ионами канал проводящей плазмы. Напряженность поля на конце канала (со стороны катода) повышается, что ведет к возникновению новых вторичных лавин и к дальнейшему прорастанию плазменного канала и т.д.

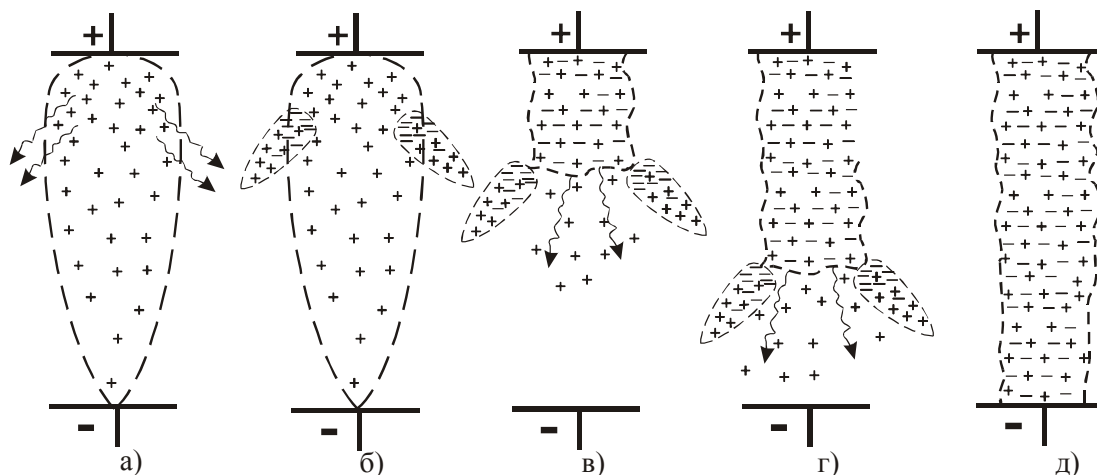


Рис. 1.6. Схема стримерной формы разряда в малом промежутке с равномерным полем:
а - начальная лавина пересекла промежуток; электроны лавины поглощены анодом; головка лавины интенсивно испускает фотоны; б - фотоионизация породила вторичные лавины; электроны вторичных лавин проникают внутрь первичной лавины; началось образование плазменного канала – стримера; в, г – на конце плазменного канала резко увеличивается напряженность поля, что приводит к интенсивной фотоионизации и возникновению новых лавин; плазменный канал быстро прорастает к катоду (положительный стример); д – стример достиг катода; разряд переходит в искровую стадию

Такой быстро удлиняющийся канал получил название стримера (англ. stream - поток). Когда стример достигает катода, плазменный канал замыкает электроды и разряд переходит в искровую стадию.

Таким образом, в малых промежутках и в плотных газах разряд протекает в однолавиной форме, переходящей в стримерную. Основную роль в образовании вторичных лавин играет фотоионизация в объеме газа, поэтому материал электрода не оказывает заметного влияния на напряжение искрового разряда.

Таким образом, в малых промежутках и в плотных газах разряд протекает в однолавиной форме, переходящей в стримерную. Основную роль в образовании вторичных лавин играет фотоионизация в объеме газа, поэтому материал электрода не оказывает заметного влияния на напряжение искрового разряда.

§2.3. Закон Пашена

Выполнение условия самостоятельности разряда в однородном поле означает пробой всего промежутка, приравняв (1.3) единице, получим:

$$\gamma(e^{\alpha S} - 1) = 1 \quad (1.4)$$

или

$$e^{\alpha S} = 1 + 1/\gamma. \quad (1.5)$$

Прологарифмируя (1.5) и преобразуя относительно α можно получить:

$$\alpha = \frac{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)}{S}. \quad (1.6)$$

После дальнейших преобразований можно получить следующее выражение для разрядного напряжения в однородном поле:

$$U_{пр} = \frac{B_0 \cdot P \cdot S}{A_0 \cdot P \cdot S \cdot \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)}, \quad (1.7)$$

где P — давление газа;

E — напряженность электрического поля;

$A_0 = \frac{\pi r^2}{kT}$ — коэффициент, зависящий от состава газа,

r - радиус молекул;

k - постоянная Больцмана;

T - температура в градусах Кельвина.

$B_0 = A_0 U_H$ - коэффициент, зависящий от энергии ионизации газа, U_H - потенциал ионизации газа.

Из (1.7) видно, что при неизменной температуре разрядное напряжение в однородном поле является функцией произведения давления P на расстояние между электродами S , т. е. $U_{пр} = f(P S)$.

Эту закономерность впервые экспериментально обнаружил Пашен. И выражение (1.7) называется законом Пашена. Графически эта закономерность представлена на рис. 1.7.

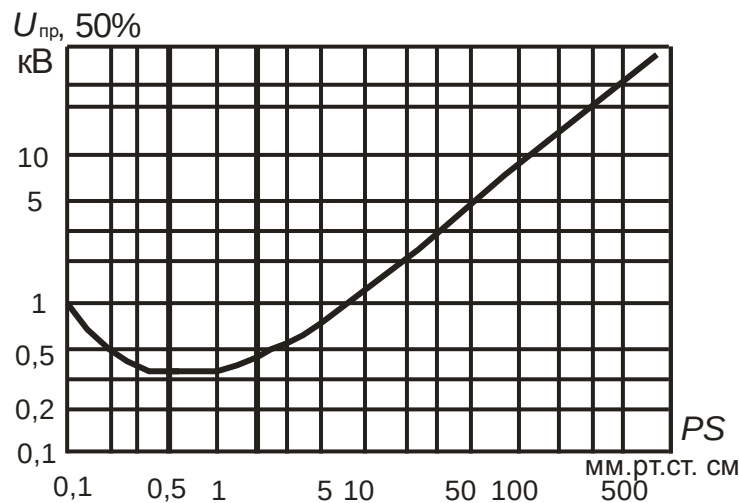


Рис. 1.7. Кривая Пашена $U_{пр} = f(P S)$ для воздушного промежутка с однородным электрическим полем

Вид этой зависимости можно объяснить, исходя из физических представлений. При $S = \text{const}$ увеличение давления больше значения, соответствующего минимуму, приводит к увеличению числа столкновений электронов с нейтральными атомами и молекулами и, как следствие, к уменьшению его энергии накапливаемой на длине свободного пробега. Следовательно, для возникновения ударной ионизации необходимо увеличение напряжения $U_{пр}$. С другой стороны, при давлениях меньших, чем соответствующее минимуму значения, увеличивается длина свободного пробега и накапливаемая электроном энергия, но уменьшается количество столкновений, что уменьшает вероятность ударной ионизации. Для ее увеличения необходимо, чтобы как можно большее число столкновений заканчивалось ионизацией. Для этого необходимо увеличивать энергию электрона на длине свободного пробега, т. е. увеличивать $U_{пр}$.

Закон Пашена в виде формулы (1.7) справедлив при нормальной температуре. Изменение температуры действует обратно изменению давления и должно учитываться при расчетах. В общем виде с учетом изменения температуры закон Пашена запишется:

$$U_{\text{пр}} = f\left(\frac{P \cdot S}{T}\right), \quad (1.8)$$

или

$$U_{\text{пр}} = f(\delta \cdot S), \quad (1.9)$$

где $\delta = \frac{T_0}{T} \cdot \frac{P}{P_0} = 0,386 \frac{P}{T}$

T — температура в градусах Кельвина.

Тогда $U_{\text{пр д}} = U_{\text{пр р}} \delta$,

где $U_{\text{пр д}}$ — пробивное напряжение, приведенное к действительным условиям измерения;

$U_{\text{пр р}}$ — пробивное напряжение, полученное при расчете по формуле Пашена.

Экспериментальная кривая Пашена отличается от расчетной как в области очень малых значений PS , так и в области очень больших. В области очень малых значений PS отличие объясняется приближением к вакуумному пробую, при котором основную роль играют процессы на поверхности электродов, а не в объеме газа. При больших значениях PS отличие объясняется увеличением напряженности электрического поля на микровыступах электродов и увеличением вероятности возникновения лавин, что снижает $U_{\text{пр}}$.

На основании закона Пашена могут быть предложены способы повышения пробивного напряжения газов:

- 1) увеличение давления больше атмосферного;
- 2) уменьшение давления до значений меньших, чем давление соответствующее минимуму, вплоть до вакуума.

§2.4. Самостоятельный разряд в неравномерном поле.

Лавинная корона

В неравномерном поле остаются в силе основные закономерности самостоятельного разряда, но вследствие изменения E вдоль пути лавины условие самостоятельного разряда приобретает вид:

$$\int_0^s \alpha dx = \ln\left(1 + \frac{1}{e}\right) = \text{const}, \quad (1.10)$$

где α - коэффициент ионизации.

Далее рассмотрена качественная характеристика самостоятельного разряда вблизи электрода с малым радиусом кривизны, например провода. Лавинный процесс возникает на некотором пути S вблизи электрода; за участком S напряженность поля уже недостаточна для ионизационных процессов. При условии соблюдения равенства (1.10) разряд на участке S имеет самостоятельный характер. Однако в данном случае лавинный процесс не приводит непосредственно к искровому разряду, так как ионизационные токи ограничены большим емкостным сопротивлением оставшейся части промежутка. Разряд в такой форме получил название коронного разряда (корона). Коронный разряд возникает при некоторой начальной напряженности поля E_H или начальном напряжении U_H . Характер коронного разряда существенно зависит от полярности электрода.

Пусть электрод имеет положительную полярность. Возникающие вблизи стержня лавины будут развиваться по направлению к стержню (рис. 1.8а). Под действием сил электрического поля легкие электроны лавины быстро перемещаются к стержню и поглощаются им, а тяжелые положительные ионы направляются к расположенному в отдалении катоду, но со скоростью, много меньшей, чем скорость движения электронов. Из-за этого различия в скоростях стержень оказывается окруженным облаком избыточных положительных ионов (рис. 1.8б). Создаваемое облаком ионов дополнительное поле с напряженностью E_q ослабляет основное поле E у стержня (анода) и усиливает основное поле вдали от стержня (рис. 1.8в). В результате область, охваченная короной, расширяется.

В случае лавинной короны вблизи отрицательного стержня лавины возникают у стержня (катода) и развиваются вглубь промежутка (рис. 1.9а). Электроны выносятся силами электрического поля из области ионизации и попадают в область слабого электрического поля, где они захватываются нейтральными молекулами и образуют отрицательные ионы. В результате вблизи катода образуется облако положительных ионов; отрицательные ионы рассеяны за концентрированным облаком положительных ионов (рис. 1.9б). Вблизи катода поле усиливается, а в неионизированном пространстве поле ослабляется. В результате происходит стягивание лавинной короны к отрицательному электро-

ду. С каждой новой лавиной происходит усиление поля вблизи катода и ослабление поля за центром скопления положительных ионов. Поэтому лавины начинают пробегать все меньшее расстояние. В итоге у поверхности катода образуется узкий слой высокой напряженности поля, где существует лавинный процесс и где рождаются электроны, выносимые во внешнее пространство.

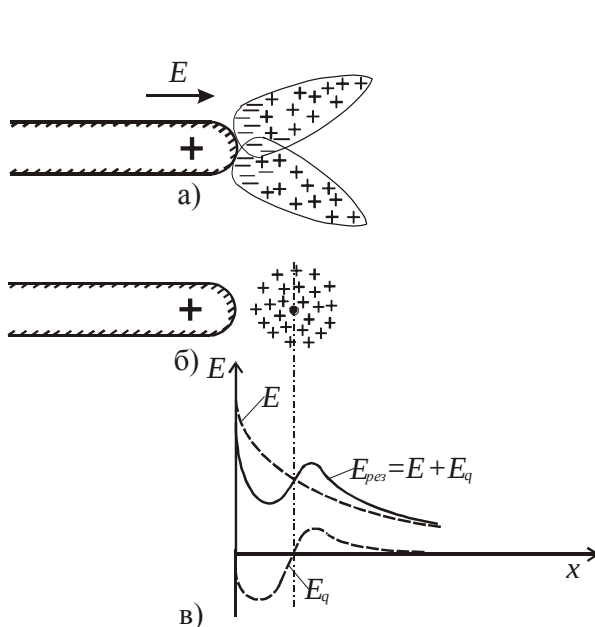


Рис. 1.8. Возникновение короны у положительно заряженного стержня:

а – развитие лавин; б – образование облачка избыточных положительных ионов; в – искажение исходного поля в промежутке объемным зарядом

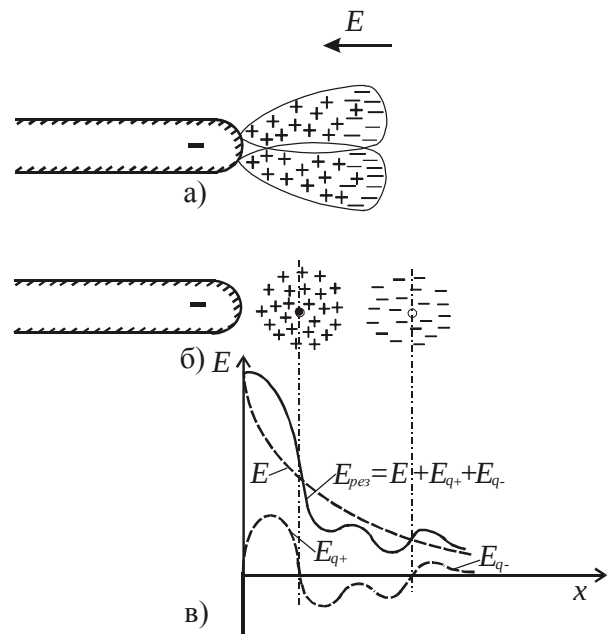


Рис. 1.9. Возникновение короны у отрицательно заряженного стержня:

а – развитие лавин; б – образование облачков положительных и отрицательных ионов; в – искажение исходного поля в промежутке объемными зарядами

В слабонеравномерных полях, например в малых промежутках, возникновение лавинной короны при небольшом повышении напряжения приводит к полному пробое промежутка. Так как напряжение возникновения короны у положительного электрода выше, чем у отрицательного, то и пробивное напряжение малых промежутков выше при положительной полярности электрода с большей напряженностью поля.

§2.5. Стримерная корона

Повторные лавины в коронном разряде приводят к высокой концентрации положительных ионов у коронирующего острия. При незначительном повышении напряжения на промежутке сверх начального коронного поле E_q , создаваемое этими зарядами, становится сравнительным (в данной области) с основным полем E . При этом условии в коронном разряде возникают стримеры.

Образование положительного (анодного) стримера в лавинном коронном разряде показано на рис. 1.10.

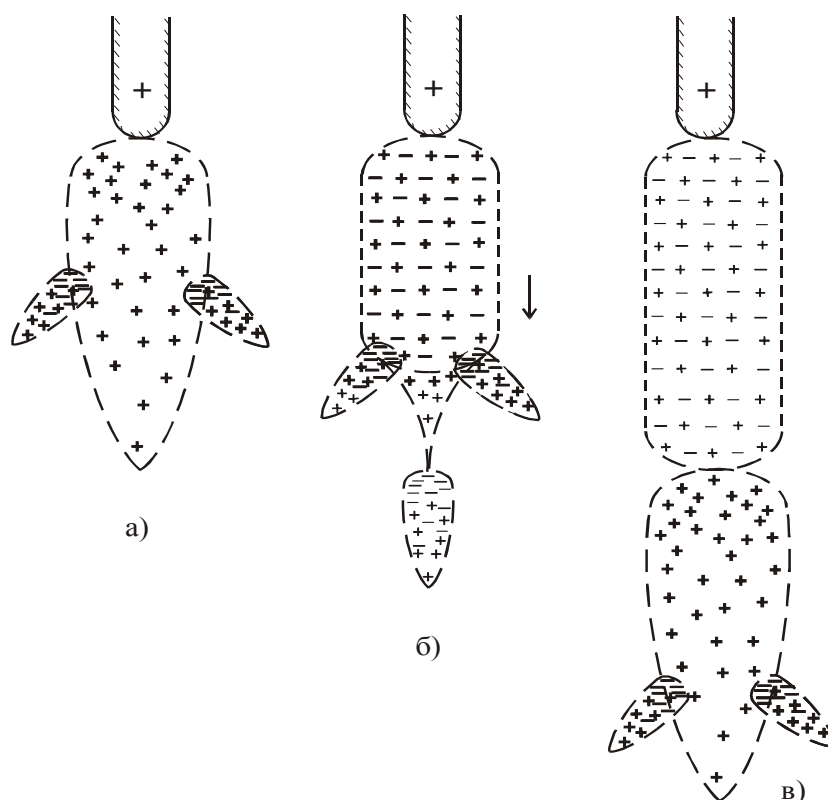


Рис. 1.10. Развитие положительного стримера в неравномерном поле:

а – закончилось развитие начальной лавины; возникают вторичные лавины, направляющиеся к головке начальной лавины; б – по каналу начальной лавины развивается стример, в глубине промежутка возникает вторичная лавина; в – стример заполнил канал в начальной лавине; завершилось развитие вторичной лавины в глубине промежутка

Фотоны, возникающие в головке лавины, приводят к образованию вторичных лавин впереди и с боков головки первичной лавины. Вторичные лавины втягиваются в первичную лавину, образуя плазменный канал, по которому электроны устремляются к аноду. Так как развитие лавин и плазменного канала

приводит к усилению поля в глубине промежутка, одновременно с развитием плазменного канала впереди него происходит возникновение и развитие новых лавин. Эта одновременность обеспечивает высокую среднюю скорость продвижения фронта положительного стримера.

Отрицательный стример также возникает при достаточной концентрации положительных зарядов в головке лавины и развивается в результате слияния ряда лавин в виде быстро удлиняющегося канала. Однако возникновение отрицательного стримера затрудняется низкой напряженностью электрического поля вне узкой зоны ионизации у стержня. Продвижение катодного стримера в глубь промежутка сдерживается влиянием положительного объемного заряда лавин, усиливающего поле в той части промежутка, которая уже пересечена лавинами, и резко ослабляющего поле в остальной части промежутка. Поэтому возникновение вторичных лавин впереди стримерного канала становится возможным только после того, как стримерный канал разовьется по всей длине первичной лавины. Таким образом, средняя скорость продвижения катодного стримера оказывается меньше, чем анодного.

§2.6. Переход стримера в искровой разряд в промежутках с неравномерным полем

При подъеме напряжения на промежутке с неравномерным полем, длина стримеров возрастает, пока один из стримеров не пересечет весь промежуток и не произойдет искровой разряд между электродами. В промежутках с симметричными электродами обычно образуются встречные стримеры положительной и отрицательной полярности. Искровой разряд в воздухе, в промежутках с межэлектродными расстояниями в десятки сантиметров, происходит при средних напряженностях поля около 10 кВ/см, что значительно меньше критической напряженности самостоятельного разряда в равномерном поле. Объясняется это характером стримерного разряда: стример приводит к искажению поля в непробитой части промежутка и к повышению напряженности поля вблизи головки стримера.

Когда стример замыкает промежуток, по каналу стримера начинает проходить ток разряда между электродами. При этом повышается температура канала и возникает интенсивная термическая ионизация, приводящая к повыше-

нию проводимости плазменного канала, повышению тока разряда между электродами и т. д. В результате за очень малый промежуток времени, около 10^{-8} с, формируется ярко светящийся искровой канал высокой проводимости, замыкающий электроды промежутка.

По пути искрового разряда начинает проходить ток короткого замыкания между электродами. Искра при этом может перейти в стадию дугового разряда, для которой характерны очень малые напряженности в разрядном канале.

§2.7. Переход стримера в искровой разряд в длинных воздушных промежутках. Лидерная стадия разряда

В воздушных промежутках длиной в несколько метров или десятков метров разряд приобретает новые качественные особенности. Проводимость стримеров уже недостаточна для создания хорошо проводящего канала между электродами, и по следу одного из стримеров возникает разряд в новой, так называемой лидерной форме.

Разрядные напряжения промежутков меньше при положительной полярности электрода, с которого начинается разряд. При достаточной концентрации электронов, движущихся под действием напряженности поля в канале, т.е. при достаточно большом токе, возникает интенсивная термоионизация, приводящая к повышению концентрации заряженных частиц в канале стримера, что ведет к росту проводимости плазменного канала и дальнейшему росту тока. Этот процесс начинается у электрода, так как через сечение канала стримера у электрода проходит весь поток электронов. В результате происходит переработка канала стримера в хорошо проводящий плазменный канал – лидер. Лидер представляет собой хорошо проводящий плазменный канал.

Когда лидерный канал достигает конца стримера, наступает пауза. Лидер вследствие его высокой проводимости можно уподобить металлическому стержню, выходящему из электрода. Высокие напряженности на конце такого стержня приводят к образованию нового стримера, продолжающего разрядный канал, новому продвижению лидера и т.д. Такой механизм развития разряда позволяет лидеру перекрывать большие расстояния при относительно малых средних напряженностях поля.

Особенностью разряда в длинных воздушных промежутках является внедрение в промежуток положительного объемного заряда, создаваемого положительным стримером. Этот объемный заряд выравнивает электрическое поле в непробитой части промежутка и тем самым несколько повышает разрядное напряжение.

В случае образования отрицательного лидера поток электронов направлен от электрода. Канал лидера исходит из катода, где в области прикатодного падения напряжения поддерживается ударная ионизация, и возникающие электроны поступают в канал лидера. Вследствие тормозящего действия отрицательных зарядов, выносимых лидером в неионизированную область, продвижение отрицательного лидера затрудняется и требуются более высокие напряжения для полного пробоя промежутка.

§2.8. Главный разряд в длинных промежутках

В момент, когда лидер достигает противоположного электрода, начинается стадия главного разряда. Главный разряд рассматривается на примере промежутка стержень – заземленная плоскость. Аналогичный характер имеет разряд молнии.

Впереди головки лидерного канала прорастают стримеры, прокладывающие путь лидеру. Потенциал лидера так высок, что вокруг лидерного канала образуется коронный чехол, в котором сосредоточивается значительная часть заряда лидера. В момент, когда лидер достигает заземленной плоскости, по лидерному каналу от плоскости начинает распространяться разрядная волна, снижающая потенциал лидера до нуля. Волна распространяется в ионизированной среде коронного чехла, вследствие чего скорость движения разрядной волны составляет примерно 10^8 - 10^9 см/с. С разрядной волной связано стекание заряда лидера в землю. Прежде всего, стекают заряды, сосредоточенные в самом лидерном канале. Когда лидерный канал приобретает нулевой потенциал, возникает явление «обратной короны», т.е. коронного разряда из области коронного чехла по направлению к лидерному каналу. В результате заряд коронного чехла также стекает по лидерному каналу в землю.

Процесс распространения по лидерному каналу разрядной волны называется главным разрядом, а канал, охваченный разрядной волной, главным каналом.

Когда главный разряд достигает противоположного электрода (стержня), процесс переходит в новую стадию, характеризующуюся замыканием электродов через плазменный канал высокой проводимости. Эта стадия называется искрой.

§2.9. Искра

Искра в электрических сетях возникает в результате пробоя воздушной изоляции под действием импульса коммутационного или атмосферного перенапряжения. На фронте импульса по мере роста тока плазменный канал сильно разогревается и расширяется. Расширение происходит в форме цилиндрической ударной волны. Плотность газа от центра канала к его периферии нарастает очень круто. На периферии канала создается оболочка высокой плотности, охватывающая центральную часть канала, где газ сильно разрежен и сильно ионизирован. По мере расширения канала плотность оболочки снижается.

В начальной фазе расширение канала носит характер взрыва. Ударная акустическая волна создает характерный треск искрового разряда.

§2.10. Длинная дуга в воздухе

Дуговой разряд в установках высокого напряжения возникает между электродами под действием рабочего напряжения вслед за искровым разрядом при $E_{\text{раб}} > E_{\text{кр}}$, при замыкании электродов металлическими быстро перегорающими проволочками, при перекрытии загрязненной изоляции. Во всех случаях стремятся к скорейшему погасанию дуги.

Почти всю длину дуги занимает плазменный столб. Электрическое поле в столбе дуги E_d сообщает энергию электронам и ионам, причем основную долю энергии воспринимают электроны, обладающие большей подвижностью. При столкновениях электроны отдают энергию молекулам, увеличивая их кинетическую энергию, т.е. повышая температуру газа. При высоких давлениях тем-

пература дуги лежит в пределах 4000 – 15000 °К, что обеспечивает интенсивную термическую ионизацию.

Электроны поступают в дуговой столб за счет термоэлектронной эмиссии из катода, разогретого дугой. Переход электронов из электрода в газ обеспечивается прикатодным падением напряжения, величина которого составляет всего несколько десятков вольт. Если падение напряжения в приэлектродных областях пренебрежимо мало в сравнении с падением напряжения на плазменном столбе, дугу называют длинной. Энергия, подводимая из внешней электрической цепи к длинной дуге, выделяется в основном в плазменном столбе, так что характеристики длинной дуги и ее устойчивость полностью определяется процессами в столбе дуги. В установках высокого напряжения дуга в воздухе практически всегда является длинной.

В устойчивой дуге сохраняется баланс между подводимой мощностью $P = E_d I$ и потерей мощности в окружающее пространство в результате тепловой конвекции и теплопроводности.

Дуга в воздухе растягивается, увлекаемая конвекционными потоками разогретого газа. Действительная длина дуги, возникшей между горизонтальными электродами, вследствие изгиба и закручивания ствола дуги еще более возрастает и может быть ориентировочно принята равной $4l$.

При увеличении длины дуги l сверх некоторой критической $l_{кр}$ напряжение на дуге $U_d = E_d l$ окажется выше приложенного к электродам; баланс мощности нарушится, и произойдет самопогасание дуги.

§2.11. Последовательность стадий газового разряда

Последовательность различных стадий газового разряда в неравномерном и равномерном полях приведена на рис. 1.11.

В длинных промежутках разряд проходит все стадии, начиная от лавинной короны до главного, искрового и дугового разряда. В относительно коротких промежутках лидерная стадия и стадия главного разряда практически отсутствуют.

В равномерном поле отсутствуют лавинная и стримерная формы короны и самостоятельный разряд непосредственно переходит в искровой. Однако этот переход также осуществляется путем развития стримеров, но в отличие от не-

равномерного поля в равномерном поле возникновение стримеров равновероятно по всей длине промежутка.

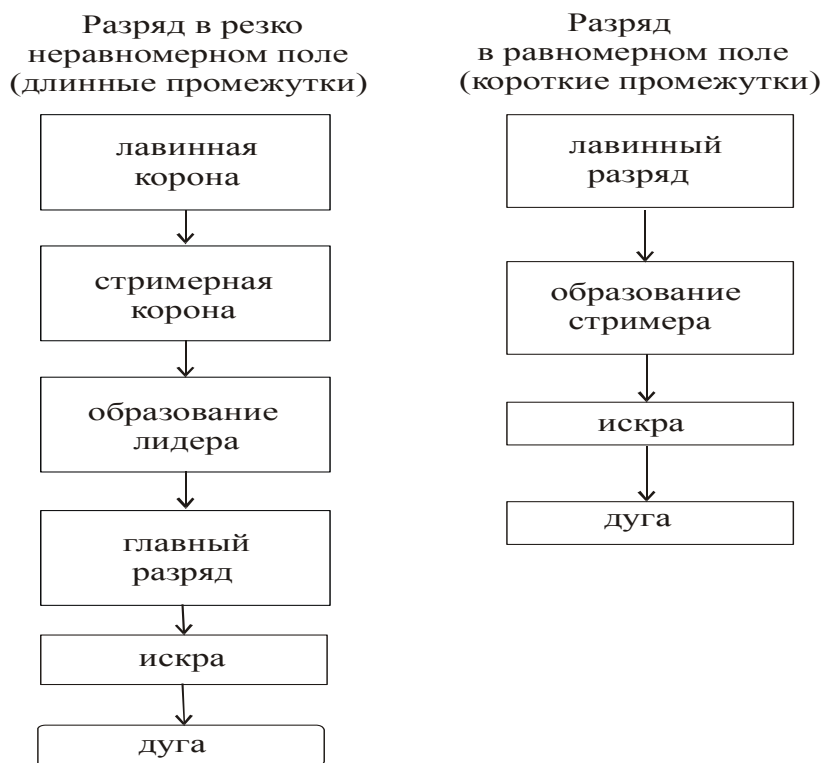


Рис. 1.11. Последовательность стадий газового разряда

§2.12. Барьерный эффект

Существенное влияние объемного заряда на развитие разряда в промежутке с резконеравномерным полем используется на практике для увеличения разрядных напряжений изоляционных промежутков. Это увеличение достигается помещением в промежуток барьеров из твердого диэлектрика (электрокартон, гетинакс и др.). При положительном острие положительные ионы оседают на барьер и растекаются по его поверхности тем равномернее, чем дальше от острия расположен барьер. Это приводит к более равномерному распределению напряженности в промежутке между барьером и плоскостью (рис. 1.12, а) и, следовательно, к значительному увеличению разрядного напряжения. При отрицательной полярности стержня электроны, двигаясь от острия, попадают на барьер, теряют скорость и большинство из них вместе с атомами кислорода становятся отрицательными ионами. На барьере в этом случае появляется кон-

центрированный отрицательный заряд, увеличивающий напряженность поля не только между положительным объемным зарядом у острия и барьером, но и во внешнем пространстве (рис. 1.12, б). Поэтому при отрицательной полярности острия увеличение разрядного напряжения в промежутке при наличии барьера будет незначительным. При расположении барьера в средней части промежутка, разрядные напряжения при отрицательной и положительной полярностях близки. При расположении барьера в непосредственной близости от положительного острия роль его уменьшается вследствие резкой неравномерности распределения зарядов на барьере. Напряженность поля оказывается достаточной для того, чтобы ионизационные процессы проходили, но другую сторону барьера. Барьер, расположенный в непосредственной близости от отрицательного острия, не способен задерживать быстрые электроны с острия, которые проходят сквозь барьер к плоскости.

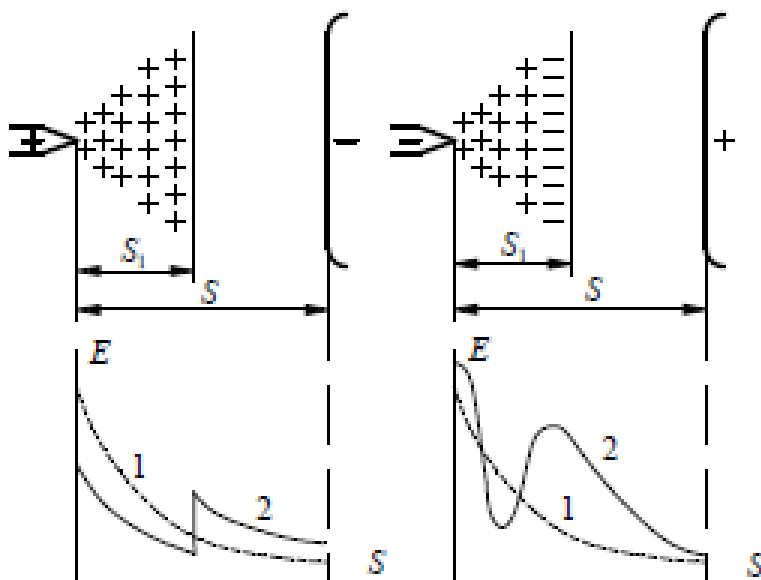


Рис. 1.12. Распределение напряженности поля в межэлектродном промежутке при наличии барьера:

а) положительная полярность стержня; б) отрицательная полярность стержня;

1 - распределение напряженности поля без барьера; 2 - распределение напряженности поля с барьером

Таким образом, барьеры в промежутке устанавливаются на таком оптимальном расстоянии от острия, при котором разрядные напряжения максимальны (25-30 % от длины промежутка между электродами), причем при положительной полярности острия разрядное напряжение может увеличиться в 2 раза по сравнению с промежутком без барьера (рис. 1.13).

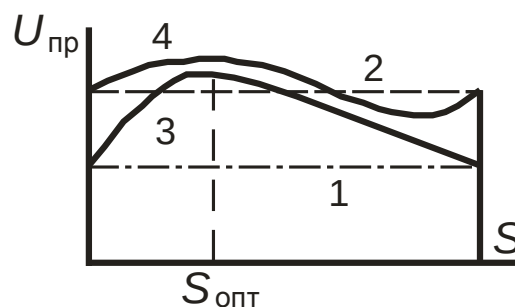


Рис. 1.13. Влияние барьера на пробивное напряжение газового промежутка при положительной (1, 3) и отрицательной (2, 4) полярностях напряжения: 1, 2 — пробивное напряжение промежутка без барьера; 3, 4 — пробивное напряжение промежутка с барьером

Барьеры широко используются в высоковольтных конструкциях, работающих как в воздухе, так и в масле (высоковольтные вводы, трансформаторы и др.). На переменном напряжении электрическая прочность на положительной полярности увеличивается и приближается к электрической прочности на отрицательной полярности.

§2.13. Влияние времени приложения напряжения на электрическую прочность газовой изоляции (вольт-секундная характеристика - ВСХ)

При кратковременных импульсах значение разрядного напряжения воздушных промежутков зависит от продолжительности воздействия. Если к промежутку приложено напряжение достаточное для пробоя, то для развития и завершения разряда в промежутке необходимо определенное время t_p называемое временем разряда (см. рис. 1.14).

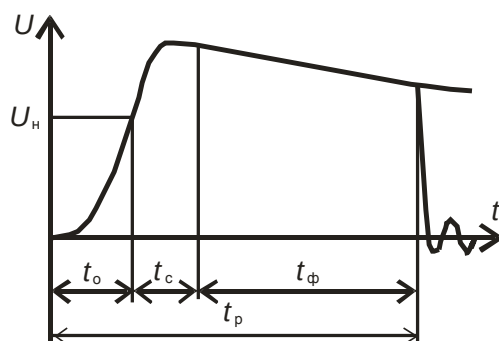


Рис. 1.14. Временная структура развития разряда на импульсном напряжении

Развитие самостоятельного разряда начинается с появления в промежутке эффективного начального электрона, что является случайным событием. Время ожидания эффективного электрона t_c подвержено разбросу и называется поэтому статистическим временем запаздывания разряда. Это первая составляющая времени разряда. Другой составляющей, имеющей также статистический характер является время формирования разряда t_ϕ , т.е. время от момента появления начального электрона до завершения пробоя промежутка. Время $t_c + t_\phi = t_z$ называют временем запаздывания развития разряда. При достаточно большой длительности фронта импульса имеет значение также время t_0 , представляющее собой время подъема напряжения до значения U_H . Таким образом, в общем случае время разряда определяется как:

$$t_p = t_0 + t_c + t_\phi. \quad (1.11)$$

Составляющие времени разряда t_c и t_ϕ зависят от значения напряжения на промежутке. При увеличении напряжения повышается вероятность того, что появляющиеся в промежутке электроны станут эффективными, и t_c уменьшается. Сокращается также и t_ϕ , поскольку при большем напряжении возрастает интенсивность разрядных процессов и скорость продвижения канала разряда в промежутке. Поэтому чем выше разрядное напряжение, тем меньше время разряда.

Зависимость максимального напряжения разряда от времени действия импульса называется вольт-секундной характеристикой изоляции. Поскольку начало и скорость развития ионизационных процессов зависят от значения напряжения, вольт-секундные характеристики зависят от формы импульса. С целью унификации испытаний и возможности сопоставления изоляционных конструкций установлен стандартный грозовой импульс с длительностью фронта (возрастания напряжения) $\tau_\phi = 1,2 \pm 0,4$ мкс и длительно-

стью импульса $\tau_u = 50 \pm 10$ мкс и обозначается 1,2/50 мкс (рис. 1.15).

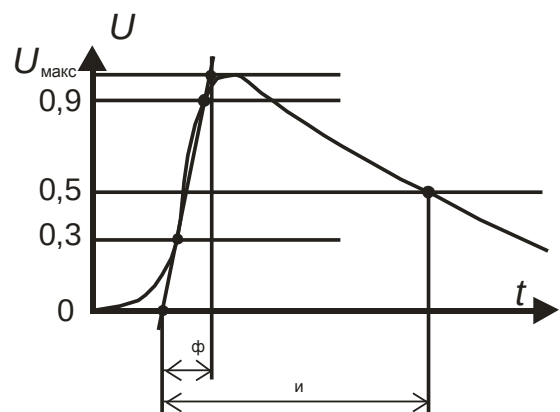


Рис. 1.15. Определение параметров импульса напряжения

Для экспериментального определения вольт-секундной характеристики к исследуемому промежутку прикладываются импульсы стандартной формы. При каждом значении максимального напряжения импульса производится серия опытов. В силу статистического разброса времени разряда вольт-секундная характеристика получается в виде области точек (рис. 1.16), для которой указываются средняя кривая и границы разброса времени разряда.

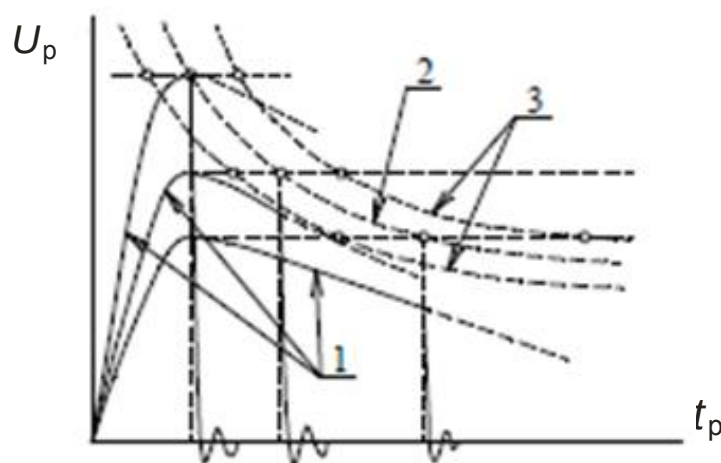


Рис. 1.16. Построение вольт-секундной характеристики изоляции по опытным данным (грозовые импульсы): 1 - импульс напряжения; 2 - кривая средних значений пробивного напряжения; 3 - границы разброса пробивных напряжений

Вид вольт-секундной характеристики зависит от степени неоднородности электрического поля в промежутке. Для промежутков с однородным или слабонеоднородным полем, вольт-секундная характеристика слабо зависит от t_p (рис. 1.17, кривая 1), и только при временах разряда порядка 1 мкс и меньше разрядное напряжение увеличивается. Связано это с тем, что разряд в таких промежутках формируется за весьма малое время при напряжении равном начальному значению и отсутствует корона. Отмеченные свойства вольт-секундной характеристики позволяют использовать промежуток между шаровыми электродами, создающими практически однородное поле, если расстояние между электродами меньше их радиуса, в качестве универсального прибора для измерения максимальных значений напряжения.

Вольт-секундные характеристики промежутков с резконеоднородным полем (рис. 1.17, кривая 2) имеют достаточно большую крутизну, поскольку в таких промежутках время формирования разряда сильно зависит от значения приложенного напряжения. Для таких промежутков при грозовых импульсах

характерны большие разрядные напряжения U_p , чем при переменном напряжении промышленной частоты 50 Гц. Отношение

$$K_{имп} = \frac{U_p}{U_{\sim}}, \quad (1.12)$$

называется коэффициентом импульса.

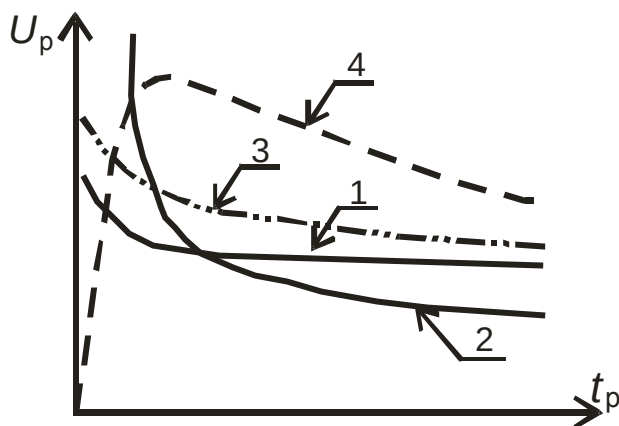


Рис. 1.17. ВСХ защитных разрядников и изоляции:

- 1 - ВСХ вентильного разрядника (однородное поле); 2 - ВСХ трубчатого разрядника (резко-неоднородное поле); 3 - ВСХ защищаемого объекта; 4 - импульс напряжения

Промежутки с однородным и слабонеоднородным полями имеют коэффициент импульса $K_{имп}=1$ практически во всем диапазоне времен разряда.

Вольт-секундные характеристики широко используются для координации изоляции высоковольтного оборудования, т. е. для защиты от воздействия грозовых и коммутационных перенапряжений. С этой целью параллельно защищаемому объекту включается воздушный разрядник (например, вентильный разрядник) с пологой ВСХ. Надежная защита будет обеспечиваться, если ВСХ разрядника (рис. 1.17, кривая 1) лежит ниже ВСХ защищаемого оборудования (кривая 3) во всем диапазоне времен воздействующего напряжения.

Глава 3. Коронный разряд на линиях электропередач. Корона на проводах при постоянном напряжении. Корона на проводах при переменном напряжении. Потери на корону. Методы уменьшения потерь на корону

§3.1. Коронный разряд на линиях электропередач

Корона является одним из видов самостоятельного разряда и возникает в резконеоднородных полях, к которым, в частности, относится и электрическое поле в окрестности проводов линий электропередачи.

Напряженность электрического поля в воздухе на поверхности гладкого полированного цилиндра, при которой возникает коронный разряд, т. е. начальная напряженность, определяется по формуле, кВ/см:

$$E_0 = 24,5 \left[1 + \frac{0,65}{r_0^{0,38}} \right], \quad (1.13)$$

которая справедлива при отрицательной полярности, но может быть использована и при положительной полярности, так как эффект полярности невелик.

Провода линий электропередачи свиты из большого числа отдельных проволок и поэтому имеют негладкую поверхность (рис. 1.18), вследствие чего напряженность поля в различных точках поверхности неодинакова. Для витых проводов обычно определяют среднюю напряженность поля на поверхности провода $E_{пр} = Q/2\pi\epsilon\epsilon_0 r$, где Q - заряд на проводе; r - радиус описанной окружности. Так как коронный разряд прежде всего возникает на выступающих частях провода (в точках a), где напряженность превышает среднюю, то начальная напряженность поля для витого провода меньше, чем для гладкого провода того же радиуса: $mE_0 < E_0$. Коэффициент $m < 1$ называется *коэффициентом гладкости* провода. Различные заусеницы и шероховатости, которые всегда имеются на поверхности проводов, еще больше снижают начальную напряженность поля, а следовательно, и коэффициент m , который для проводов линий электропередачи обычно лежит в пределах 0,82 - 0,90.

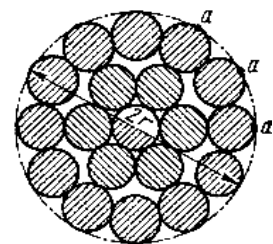


Рис. 1.18.
Многопроволочный
провод воздушной
линии

Ионизационные процессы в коронном разряде происходят лишь вблизи электрода с малым радиусом кривизны, в рассматриваемом случае вблизи провода, в узкой зоне, которая обычно называется *чехлом* короны. Чехол коронно-

го разряда на проводах далеко не всегда бывает однородным, особенно при достаточно больших напряжениях. При отрицательной короне ионизация происходит вблизи большого числа точек на поверхности провода, поэтому чехол короны состоит из многочисленных проводящих нитей. При положительной полярности, помимо сплошного чехла, на проводе образуются стримеры, длина которых может быть достаточно большой, но гораздо меньше расстояния между электродами.

При больших диаметрах проводов напряженность электрического поля в окрестности провода уменьшается значительно медленнее, чем вблизи проводов малого диаметра. Поэтому зона ионизации – «чехол» короны - имеет большие размеры, и даже при начальном напряжении лавины могут достигать критической длины. Корона в этом случае возникает сразу в стримерной форме.

На проводах малых диаметров (до 1 см) корона возникает в лавинной форме. При увеличении напряжения сверх начального размеры зоны ионизации возрастают, и корона из лавинной переходит в стримерную.

Ток стримерной короны состоит из отдельных импульсов с очень крутым фронтом. Эта высокочастотная составляющая тока короны является источником интенсивного электромагнитного излучения с широким спектром частот, которое создает помехи радио- и телевизионному приему. При коронировании проводов линий сверхвысокого напряжения может также возникать звуковой эффект, особенно сильный при дожде.

За счет процессов ударной ионизации в чехле короны непрерывно создаются заряженные частицы обоих знаков. Частицы того же знака, что и коронирующий электрод, под действием электрического поля выходят из чехла короны во внешнюю область и постепенно перемещаются к противоположному электроду.

Если к промежутку приложено постоянное напряжение, то в стационарном режиме вся внешняя область короны, т. е. область, в которой ионизация отсутствует, оказывается заполненной объемным зарядом того же знака, что и коронирующий провод. При этом заряд, уходящий в единицу времени на противоположный электрод, в точности равен заряду, выделяющемуся за это же время во внешнюю область из чехла короны, так что суммарный объемный заряд остается неизменным.

Значение и характер пространственного распределения объемного заряда внешней области короны (объемный заряд зоны ионизации не учитывается)

должны быть такими, чтобы напряженность поля на поверхности коронирующего провода оставалась бы равной начальной, т. е. приблизительно равной mE_0 , независимо от значения приложенного напряжения. Действительно, при наличии объемного заряда напряжение между электродами определяется суммой

$$u = (q_{\text{пр}}/C) + \Delta u_{\text{об}}, \quad (1.14)$$

где $q_{\text{пр}}$ - заряд на проводе; C - емкость между проводом и противоположным электродом; $\Delta u_{\text{об}}$ - напряжение, создаваемое объемным зарядом. Наличие напряжения $\Delta u_{\text{об}}$ уменьшает заряд на проводе, а следовательно, и напряженность электрического поля на его поверхности $e_{\text{пр}} = q_{\text{пр}} / 2\pi\epsilon\epsilon_0 r$. Если напряженность поля на поверхности провода делается меньше mE_0 , ионизация в чехле прекратится, взамен уходящему на противоположный электрод заряду из чехла короны не будет выделяться новый заряд, суммарный заряд в объеме и $\Delta u_{\text{об}}$ уменьшатся. В результате увеличится заряд на проводе и напряженность поля на его поверхности возрастет до mE_0 , после чего заряд в объеме приобретет свое прежнее значение. Если напряженность поля на поверхности провода превысит mE_0 , интенсивность ионизации в чехле короны возрастет, из чехла короны будет выделяться больший заряд, чем заряд, уходящий к противоположному электроду, суммарный заряд во внешней зоне возрастет, благодаря чему напряженность поля на поверхности провода снизится до mE_0 .

Это свойство коронного разряда является весьма важным, так как оно регулирует величину объемного заряда во внешней зоне. Движение этого объемного заряда под действием электрического поля создает ток короны, который на много порядков превышает нормальный ток утечки в линиях электропередачи. Связанные с прохождением этого тока потери энергии могут иметь очень большую величину, соизмеримую с потерями в активных сопротивлениях проводов под действием рабочего тока.

Итак, потери на корону связаны с относительно медленным (со скоростью ионов) движением объемного заряда внешней зоны. Процессы, происходящие в чехле короны, существенного влияния на потери энергии не оказывают, однако они важны с другой точки зрения.

Для чехла короны характерны быстрые процессы, происходящие со скоростью электронов или стримеров. Поэтому ток короны, помимо медленно меняющейся составляющей, определяемой перемещением объемного заряда, содер-

жит большое количество кратковременных пиков, соответствующих развитию стримеров или групп лавин. Эта высокочастотная составляющая тока короны является источником интенсивного электромагнитного излучения с широким спектром частот, который соответствует радиотехническому диапазону. Излучаемые коронирующей линией радиоволны создают помехи радиоприему (особенно сильные вблизи линии), которые могут достигнуть недопустимого уровня.

Таким образом, появление коронного разряда на проводах линий электропередачи сопровождается потерями энергии и радиопомехами. Необходимость ограничения до приемлемых значений уровня потерь энергии и радиопомех приводит к тому, что рациональная конструкция проводов и арматуры линий электропередачи в значительной мере определяется коронным разрядом, особенно при наивысших номинальных напряжениях.

§3.2. Корона на проводах при постоянном напряжении

При постоянном напряжении различают два различных вида коронного разряда - *униполярный* и *биполярный*.

Униполярная корона возникает в том случае, когда коронирующие провода в промежутке имеют одинаковую полярность (например, промежуток провод - плоскость на рис. 1.19а). При униполярной короне вся внешняя зона заполнена зарядами того же знака, что и коронирующий провод (или провода).

Биполярная корона возникает в том случае, когда коронирующие провода имеют противоположную полярность (например, промежуток провод - провод на рис. 1.19б). Во внешней зоне биполярной короны ионы разных знаков движутся навстречу друг другу. Если бы на границе нулевого потенциала I-I происходила полная рекомбинация ионов, биполярная корона состояла бы из двух не зависящих друг от друга униполярных коронных разрядов. В действительности на границе раздела происходит лишь частичная рекомбинация ионов, и значительная их часть проникает во внешнюю зону провода противоположной полярности, уменьшая суммарный объемный заряд этой зоны, а следовательно, и Δu_{06} . Для того чтобы восстановить нормальное значение Δu_{06} , обеспечивающее сохранение начальной напряженности поля на поверхности провода, ионизация в чехле короны должна возрасти и из чехла короны должен выделяться больший заряд, часть

которого тратится на нейтрализацию заряда противоположного знака. Благодаря этому ток короны, следовательно, и потери энергии в биполярной короне значительно больше, чем в униполярной. Увеличение потерь в биполярном режиме по сравнению с униполярным связано также с распадом (явлением, обратным прилипанию) отрицательных ионов в зоне ионизации провода, имеющего положительную полярность. Отрицательные ионы приходят к положительному проводу от отрицательного коронирующего провода и в результате распада создают в зоне ионизации дополнительные свободные электроны. Появление таких электронов в зоне ионизации приводит к увеличению тока короны, а следовательно, и потерь на корону. Кроме того, появление в зоне ионизации дополнительных свободных электронов равнозначно увеличению коэффициента вторичной ионизации γ . Увеличение же γ , согласно уравнению самостоятельности разряда в неоднородном поле, обеспечивает поддержание самостоятельного разряда при меньших напряженностях. Напряженность на поверхности провода в условиях развитой короны называется критической (E_k).

Для определения потерь энергии на корону при постоянном напряжении необходимо проанализировать движение объемного заряда во внешней зоне. Эта весьма сложная задача наиболее успешно решена в работах академика В.И.Попкова, который получил интегродифференциальное уравнение, численное решение которого позволяет получить вольт-амперную характеристику короны, т. е. зависимость среднего тока I_{cp} от приложенного напряжения. Грубо приближенно эта характеристика может быть выражена уравнением

$$I_{cp} = GU(U - U_k), \quad (1.15)$$

причем коэффициент G определяется геометрическими размерами линии, коэффициентами подвижности и рекомбинации ионов.

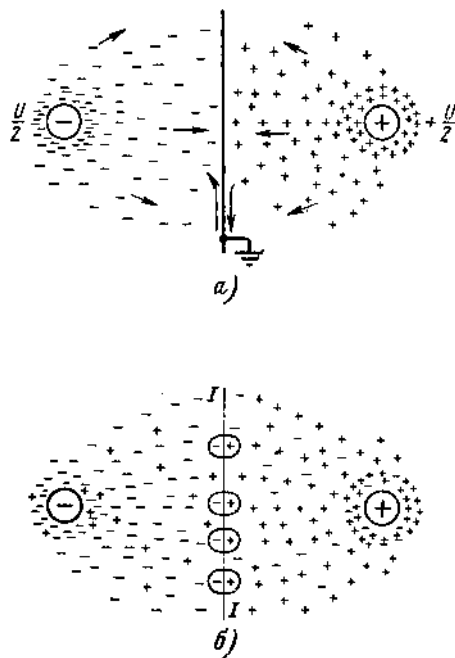


Рис. 1.19. Распределение объемного заряда униполярной (а) и биполярной (б) короны

При напряжениях, близких к начальному, которые определяются по выражению (1.13) или (1.14), экспериментальные данные хорошо согласуются с выражением (1.15), а при меньших напряжениях существенно от нее отличаются. Это связано с тем, что по выражению (1.15) определяют напряжение появления так называемой *общей короны*, которая в основном охватывает весь провод. При меньших напряжениях корона возникает только на отдельных наиболее крупных неровностях поверхности провода. Такая корона называется местной и начинается при напряжении $U_{ом} < U_0$. По мере увеличения напряжения количество очагов ионизации возрастает, и местная корона постепенно переходит в общую. Выражение (1.15) справедливо только для общей короны.

Потери энергии при общей короне равны

$$P = I_{ср}U = GU^2(U - U_k) \quad (1.16)$$

и очень быстро растут при увеличении напряжения.

§3.3. Корона на проводах при переменном напряжении

Анализ движения объемного заряда в пространстве между проводами при переменном напряжении показывает, что основная масса нерекombинировавшего заряда совершает возвратно-поступательное движение в окрестности каждого провода, не удаляясь от него на расстояние, большее нескольких десятков сантиметров. Только очень небольшая доля объемного заряда проникает к соседним проводам. Это обстоятельство позволяет рассматривать процессы, происходящие вблизи проводов различных фаз, независимо друг от друга. Вследствие возвратно-поступательного характера движения зарядов отрицательные ионы, возникшие в отрицательный полупериод изменения напряжения, возвращаются в зону ионизации в положительный полупериод и, распадаясь, приводят к снижению напряженности поля у провода до критической.

Далее рассматривается изменение объемного заряда в окрестности одного из проводов и напряженности электрического поля на поверхности этого провода при синусоидальном напряжении источника. Допустим, что линия подключена к источнику в момент нуля напряжения. Показанная на рис. 1.20 синусоида в различных масштабах дает фазовое напряжение источника и напря-

женность поля на поверхности провода, которые связаны друг с другом зависимостью, справедливой при отсутствии короны:

$$E_{\text{пр}} = \frac{u_{\phi} C}{2\pi p e_0 r}, \quad (1.17)$$

где C — рабочая емкость линии.

Корона на проводе зажигается в момент времени t_1 , когда напряженность поля на поверхности провода станет равной mE_0 . Напряжение при этом равно $u_{\phi} = U_k$. После зажигания короны в пространстве вокруг провода накапливается объемный заряд того же знака, что и заряд на проводе. Объемный заряд уменьшает напряженность поля на поверхности провода, причем, как и для короны при постоянном напряжении, в процессе горения короны напряженность поля на поверхности провода остается неизменной и равной E_k .

Таким образом, после зажигания короны кривые напряжения и напряженности поля расходятся. Напряжение продолжает изменяться по синусоиде, а напряженность поля остается неизменной. В связи с этим остается неизменным и заряд на проводе $q_{\text{пр}} = 2\pi\epsilon\epsilon_0 r E_k$, а следовательно, и создаваемое этим зарядом напряжение $u_{\text{пр}} = q_{\text{пр}}/C$. Разница напряжений $\Delta u_{\text{об}} = u_{\phi} - u_{\text{пр}}$ (на рис. 1.20 заштрихована) поддерживается объемным зарядом, который в процессе роста напряжения постепенно увеличивается и достигает $\Delta U_{\text{макс}}$.

Так как объемный заряд распределен в пространстве, суммарный заряд $q_{\Sigma} = q_{\text{пр}} + q_{\text{об}}$ оказывается существенно больше заряда $q = u_{\phi} C$, который был бы на проводе при том же напряжении, если бы корона отсутствовала. Таким образом, возникновение короны сопровождается увеличением суммарного заряда и возрастанием емкости линии от обычной величины C (она часто называется «геометрической» емкостью) до эквивалентной емкости $C_{\Sigma} = q_{\Sigma}/u_{\phi}$, которая с ростом напряжения возрастает в связи с постепенным удалением объемного заряда от коронирующего провода.

После того, как напряжение источника достигло максимума, общий заряд q_{Σ} должен начать уменьшаться. Так как заряд в объеме является малоподвижным,

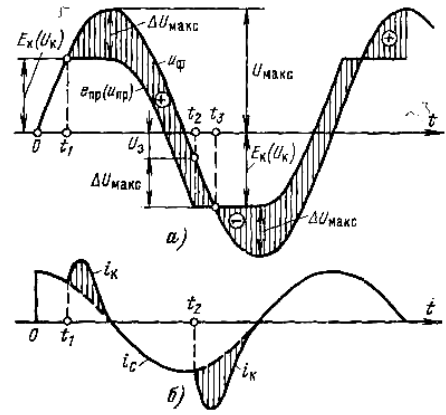


Рис. 1.20. Корона при переменном напряжении:

а - изменение во времени приложенного напряжения (u) и напряженности поля на поверхности провода (E_k); б - емкостной ток i_c и ток короны i_k

в первую очередь будет уменьшаться заряд на проводе. Это немедленно приведет к уменьшению напряженности поля и погасанию короны. Что касается объемного заряда, то первое время после максимума напряжения он будет продолжать удаляться от провода, затем начнет двигаться в обратном направлении, но это перемещение будет происходить настолько медленно, что в первом приближении и объемный заряд и создаваемое им напряжение могут считаться неизменными.

В следующий полупериод корона загорится тогда, когда абсолютная величина напряженности поля на поверхности провода снова станет равной E_k . Так как в этот момент в промежутке еще сохранился оставшийся от предыдущего полупериода объемный заряд противоположного знака, мгновенное значение напряжения (U_3) будет значительно меньше начального.

Из графика, приведенного на рис. 1.20, следует, что $U_k = U_3 + \Delta U_{\max}$, но так как $\Delta U_{\max} = U_{\max} - U_k$, то

$$U_3 = 2U_k - U_{\max}. \quad (1.18)$$

Следовательно, если амплитуда напряжения источника $U_{\max}$ более, чем в два раза превышает напряжение зажигания короны, отрицательная корона может возникнуть еще в положительный полупериод ($U_3 > 0$).

После зажигания короны в отрицательный полупериод вокруг провода образуется отрицательный объемный заряд, который постепенно компенсирует положительный заряд, оставшийся от предыдущего полупериода. К моменту t_3 положительный объемный заряд оказывается полностью скомпенсированным, а после достижения напряжением амплитудного значения избыточный отрицательный заряд становится численно равным максимальному заряду в предыдущий полупериод.

Далее процесс повторяется, и во все полупериоды, кроме первого, источник отдает линии двойной заряд $2q_{об}$, половина которого тратится на компенсацию заряда противоположной полярности.

Кривая изменения тока между проводами коронирующей линии приведена на рис. 1.20 б. Во время горения короны ток значительно превышает емкостный ток $i_c = C \frac{du}{dt}$, определяемый геометрической емкостью линии и напряжением источника. Ток короны i_k показан в виде гладкой кривой, однако в действительности, так же, как и при постоянном напряжении, на эту гладкую кривую

накладываются многочисленные кратковременные импульсы, особенно мощные в положительный полупериод, которые являются источником радиопомех.

Для теоретического определения потерь на корону при переменном напряжении необходимо исследовать движение ионов в пространстве между проводами и изменение суммарного заряда.

Эксперименты позволили установить, что потери на корону и радиопомехи в первую очередь зависят от максимальной напряженности поля на поверхности провода, которая при заданном напряжении определяется главным образом радиусом провода. Поэтому основным методом ограничения потерь на корону и радиопомех является увеличение радиуса провода. При очень высоких номинальных напряжениях пришлось бы применять провода чрезмерно большого сечения, в ряде случаев превышающего сечение провода, выбранное из условия передачи по линии заданной мощности.

Экономическое решение можно получить посредством применения так называемых *расширенных проводов*. Это провода достаточно большого диаметра, обеспечивающего необходимое снижение напряженности электрического поля на их поверхность. Для сохранения заданного сечения токоведущей части расширенные провода делаются полыми или заполняются непроводящей массой, например бумагой.

Корона не возникает, если минимальный диаметр провода соответствует условию

$$d_{\min} \geq 1,5 U_{\text{ном}} \cdot 10^{-2}, \quad (1.19)$$

где $d_{\min}$ = [см]; $U_{\text{ном}}$ = [кВ].

Другое решение, широко используемое в РФ, состоит в применении *расщепленных проводов*. Для уменьшения потерь на корону вместо одного провода в фазе можно применить пучок проводников, находящихся друг от друга на расстоянии нескольких десятков сантиметров. Такой пучок параллельно соединенных проводников называется расщепленным проводом. На высоковольтных ЛЭП провод в фазе расщепляется на 2 – 8 проводов с изолирующими растяжками 40 – 60 см. В этом случае расчет проводится по условному эквивалентному диаметру $D_{\text{экв}}$.

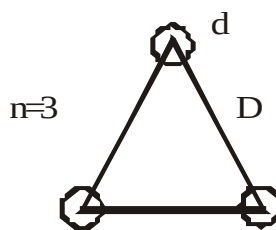


Рис.1.21.
Расщепленный
провод

Раздел 2. Разряды в жидких и твердых диэлектриках. Электрические характеристики внутренней изоляции электроустановок

Глава 1. Основные особенности изоляционных жидкостей. Механизм пробоя жидких диэлектриков

§1.1. Основные особенности минерального масла как диэлектрика

Изоляционные минеральные масла представляют собой смесь различных очищенных углеводородов, получаемых из нефти путем ее перегонки. Состав минерального масла следующий: 40 - 60% парафинов, 30 - 50% нафтенов, 5 - 20% ароматических углеводородов, 1% олефинов.

Исходным продуктом служит натуральная нафтенная нефть, чаще всего венесуэльская. Она не содержит воскообразных компонентов, которые повышают вязкость при низких температурах. В последнее время для получения изоляционных масел начинают использовать, прежде всего за границей, парафиновую нефть. Недостатком такого масла является то, что температура, при которой оно перестает течь, примерно на 10 градусов выше, чем температура масла на основе нафтенной нефти, которая равна минус 50 °С. Существуют способы снижения этой температуры, основанные на введении добавок, препятствующих объединению при низких температурах очень мелких кристаллов парафина в более крупные, что сохраняет текучесть масла.

Основные свойства минерального масла низкой вязкости при температуре 20 °С и содержания воды менее 10^{-5} следующие:

- 1) разрядная напряженность поля E_{deff} , кВ/см = 200 – 350;
- 2) диэлектрическая проницаемость ϵ_r при 50 Гц = 2,2;
- 3) плотность γ , г/см³ = 0,9;
- 4) $\text{tg } \delta$ при 50 Гц = 10^{-3} .

Электрические свойства минерального масла ухудшаются при его увлажнении. Если $\text{tg } \delta$ при 40 °С практически остается постоянным при концентрациях воды до $4 \cdot 10^{-5}$, то при таких же концентрациях наблюдается заметное снижение электрической прочности по сравнению с прочностью при незначительном увлажнении. Если влажность превышает указанное значение, $\text{tg } \delta$ рез-

ко возрастает, что сопровождается дальнейшим падением электрической прочности.

Старение. Во время эксплуатации устройств с масляной изоляцией масло стареет в результате поглощения кислорода и влаги из окружающей среды, действия повышенной температуры и катализаторов (например, меди, свинца и других металлов, имеющих в устройстве). Кислород вступает в реакцию с углеводородами, образуя сначала перекись, а затем продукты окисления (спирты, кетоны, кислоты и щелочи) и, наконец, высокомолекулярные соединения, которые в начальной стадии еще растворимы в масле. В результате электрическая прочность масла падает, а $\tan \delta$ увеличивается.

В сильно состаренном масле, когда имеет место увеличение молекул, образуется шлам, затрудняющий циркуляцию масла в охлаждающих каналах, что может привести к перегреву обмотки и возникновению опасности теплового пробоя. Поэтому в некоторых случаях в трансформаторах с большой тепловой нагрузкой необходимо после нескольких лет эксплуатации фильтровать масло, пропуская его через отбеливающую глину, чтобы удалить продукты старения. Однако при этом удаляются и естественные консерванты, и поэтому после фильтрования рекомендуется добавлять ингибиторы, задерживающие окисление масла.

В новых сортах масла можно также замедлить процесс старения добавкой ингибиторов. Для этого служит 2,6-дитрибутил-паракрезол (сокращенно ДВРС), содержание которого в масле составляет обычно 0,3 % по массе.

Поведение газа в масле. Изоляционные масла различаются также поведением газа в них при воздействии электрического поля. Под этим понимают изменение свойств изоляционного масла на границе раздела масло-газ, возникающее в результате скользящих разрядов, а также способность поглощать газ (преимущественно H_2) и химически его связывать (газостойкие или газоневосприимчивые масла) или выделять (газовыделяющие и негазовыделяющие масла). На обезгаживание масла влияют определенные ароматические вещества, химически связывающие водород, при этом поведение масла в отношении газов в электрическом поле зависит не только от структуры масла, но и от энергии разрядов. Если энергия разрядов превышает пороговое значение, то теряют свои свойства даже газостойкие масла, происходит дальнейшее повышение энергии разрядов. Таким образом, все масла при большой энергии разрядов выделяют газ.

Газовый анализ. Наряду с контролем процесса старения минерального масла в трансформаторах путем регулярного взятия проб и исследования электрических и физико-химических свойств в настоящее время ценным вспомогательным средством раннего распознавания дефектов в трансформаторах, получения первых сведений о возникшей неисправности является анализ растворенных в масле газов. При дефектах в трансформаторах, которые обычно связаны с повреждениями изоляции, выделяются газы, которые полностью или частично растворяются в масле.

Обнаруженные в пробах растворенные газы, а также увеличение их количества во времени служат мерой интенсивности разрядов и указывают вид разрушения, если состав газа, обычно не зависящий от сорта масла, позволяет это сделать.

По роду и количеству газа можно установить, имеются в трансформаторе частичные или искровые разряды с малой энергией, дуга или сильноточные разряды (пробои), а также местные перегревы.

Частичные и слабые искровые разряды приводят обычно к выделению H_2 и CH_4 , сильные разряды образуют в основном C_2H_2 и H_2 . Так называемые горячие точки, в которых имеет место локальный нагрев масла, обуславливают повышенное содержание H_2 , CH_4 , C_2H_4 и C_3H_6 . При термическом разложении изоляции на основе целлюлозы выделяются CO и CO_2 . Установленное соотношение компонентов газа оказывается типичным для каждого вида дефекта. Благодаря этому можно проследить долю того или иного газа и изменение во времени соотношения концентраций газов, а также оценить характер состояния трансформатора. Эти критерии облегчают распознавание дефектов задолго до выхода трансформатора из строя.

§1.2. Синтетические изоляционные жидкости. Чистые углеводороды

Полиизобутен является химически стойким продуктом полимеризации масла из ряда полиолефинов. Этот более или менее вязкий пропиточный материал для конденсаторов применяется также для пропитки кабельной изоляции.

Додексилбензол - газостойкая изоляционная жидкость с малой вязкостью из ряда алкоильбензолов. Она иногда применяется для пропитки кабелей низкого давления с масляной изоляцией, а также конденсаторов.

Аскарели - это полихлорированные дифенилы (PCB), смешанные с три- и тетрахлорбензолом. Они применяются при изготовлении трансформаторов и конденсаторов. Их марки различаются степенью хлорирования использованного PCB и содержанием три- и тетрахлорбензола. Аскарели - термически и химически стойкие соединения, являющиеся высококачественными пропиточными материалами с высокой диэлектрической проницаемостью. Они используются в электротехнике начиная с 40-х годов в качестве огнебезопасной изолирующей и охлаждающей жидкости. В то время как в конденсаторах применяются только трихлордифенил и смеси трихлордифенила с дихлордифенилом, в трансформаторах используются клофены из три-, тетра-, пекта- и гексахлордифенила, разбавленные для достижения более низкой вязкости три- и (или) тетрахлорбензолом. Они обладают высокой температурой вспышки в отличие от минерального масла, негорючи вплоть до температуры кипения, химически настолько стабильны, что их старение в процессе эксплуатации практически исключено.

Основные электрические характеристики хлорированных дифенилов при 20 °C приведены ниже.

Свойства хлорированных дифенилов при температуре 20 °C и содержании воды менее 10^{-5} :

Разрядная напряженность E_d , кВ/см 200 - 300

Диэлектрическая проницаемость ϵ_r при 50 Гц 4 - 6

Плотность γ , г/см³ 1,35 – 1,55

$\text{tg } \delta$ при 50 Гц $< 10^{-3}$

Хлорированные дифенилы имеют такие же зависимости разрядного напряжения от содержания воды, как и минеральное масло.

Проблема применения высокохлорированных дифенилов заключается в том, что они легко аккумулируются в живых организмах и трудно выводятся из них, а поэтому опасны экологически. Кроме того, из аскарелей, особенно на базе высокохлорированных дифенилов, при окислении и высокой температуре в небольших количествах образуются полихлордибензолфуран (PCDF) и полихлордибензодиоксин (PCDD), а также высокотоксичный 2,3,7,8-тетрахлордибензол-Р-диоксин (2,3,7,8-TCDD). С этим необходимо считаться, если, например, трансформатор с аскарелем находится в зоне пожара и его бак повреждается. Поэтому изготовление PCB в некоторых странах запрещено, а их использование в других странах строго регламентировано. Однако не ис-

ключена возможность возникновения пожаров, во время которых при 1200 °С могут образовываться токсичные вещества.

Заменители аскареля для конденсаторов. Для замены хлорированных дифенилов в последние годы разработаны новые синтетические не содержащие хлора биологически безопасные углеводороды, обладающие хорошей термической стойкостью и способностью абсорбировать водород. Вследствие экологической безопасности и хороших диэлектрических характеристик перспективны для пропитки изоляции косинусных конденсаторов такие жидкости, как BNC, PXE, MIPB и баулектроль 4900 (изготовитель - фирма Bayer), дитолиловый эфир (DTE).

Заменители аскареля для трансформаторов. Для трансформаторов в настоящее время разрабатываются как содержащие, так и не содержащие хлор жидкости; некоторые из них находятся в опытной эксплуатации.

Заменители, не содержащие хлор, имеют высокие температуры вспышки (от 210 до 305°), воспламенения (от 310 до 360°) и самовоспламенения (400°С). Для окружающей среды эти заменители опасны в такой же степени, как и обычное углеводородное масло. Их недостатком чаще всего является меньшая, чем у аскареля, теплопроводность. Дуга в них образует частично горючие и взрывоопасные газы. К таким заменителям относятся высокотемпературные углеводородные масла (НТК), силиконовые жидкости и сложные эфиры на базе карбоксилат-эфира.

Примером хлорсодержащего заменителя может служить тетрахлорэтан или смесь дихлорбензолдихлортолуола с трихлорбензолом, находящаяся в пробной эксплуатации. Такая смесь вообще негорюча, дуга в ней не образует горючих или взрывоопасных газов, однако она обладает экологически опасными свойствами, хотя и не такими, как аскарель.

Что касается широкого использования заменителей аскареля в силовых конденсаторах и прежде всего в трансформаторах, то пока накоплен небольшой опыт и не выработаны необходимые критерии, а поэтому требуется проведение специальных исследований в этом направлении.

Силиконовые жидкости (иногда их еще некорректно называют силиконовым маслом) представляют собой чистые линейные полидиметилсилоксаны, основа молекулы которых состоит из связи кремния и водорода с двумя остатками метила. Эти жидкости наряду с рассмотренными синтетическими не содержащими хлор углеводородами предназначаются для замены аскарей в

конденсаторах и силовых трансформаторах, когда к последним предъявляются повышенные требования в отношении пожарной безопасности. Силиконовые жидкости отличаются от аскарелей токсикологической, физиологической и экологической безопасностью. Термически (до 300 °С) и химически (не окисляются в воздухе при температуре до 180 °С) они очень устойчивы, поэтому в условиях эксплуатации не стареют и обладают хорошими диэлектрическими свойствами. Разрядная напряженность $E_d \approx 300 - 400$ кВ/см; $\epsilon_r \approx 2,6$; $\operatorname{tg} \delta < 10^{-4}$.

Температурная зависимость вязкости силиконовых жидкостей слабо выражена. Температура, при которой исчезает текучесть, низка. По сравнению с минеральными маслами эти жидкости имеют более высокие температуры вспышки и воспламенения. Однако следует подчеркнуть, что они гораздо дороже, чем минеральные масла. Что касается использования жидкостей в конденсаторах, то они имеют более низкую диэлектрическую проницаемость, чем аскарели. Кроме того, необходимо учитывать, что силиконовые жидкости хуже передают тепло, чем минеральное масло, имеют заметно больший коэффициент теплового расширения и меньшую электрическую прочность при больших расстояниях между электродами. Их $\operatorname{tg} \delta$ примерно такой же, как и у минерального масла.

Концентрация насыщения воды при 25 °С равна 0,2 %. Следует заметить, что определение малых содержаний воды по методу Карла-Фишера для силиконовых жидкостей дает ненадежные результаты. Причиной этого является то, что полидиметил-силоксаны не только физически растворяют воду, но и химически ее абсорбируют. Оксид силоксана способен захватывать воду и создавать проводящие мостики. Поэтому необходимо модифицировать объемно-метрическую методику Карла-Фишера в отношении реагентов и растворителей. Лучше использовать калориметрический способ определения содержания воды в силиконовых жидкостях с соответствующими реагентами. Методика определения содержания воды в силиконовых жидкостях с указанием соответствующих титрирующих растворов в виде рекомендации МЭК находится на стадии подготовки.

§1.3. Подготовка изоляционных жидкостей

Сушка и обезгаживание. Чтобы получить высокие диэлектрические характеристики изоляционной жидкости, необходимо перед использованием ее

тщательно высушить и обезгазить. Это осуществляется в специальных установках в виде насадочных колонн.

Изоляционная жидкость, обычно подогретая, поступает через фильтр в установку. Необходимая температура определяется вязкостью жидкости, которая должна поддерживаться на низком уровне, чтобы при прохождении по насадочной колонне жидкость на заполнителе образовывала тонкую пленку, постоянно обновляющуюся при протекании через заполнитель. Этим достигается большая поверхность границы жидкость-вакуум в отдельных ступенях колонны. Однако температура не должна быть слишком большой, чтобы не испарялись летучие составляющие жидкости при требуемом вакууме в рабочем объеме.

Данным способом из изоляционной жидкости удаляется только содержащаяся в ней вода, а не мелкие механические включения и растворенные продукты старения, которые образуются в жидкости под действием кислорода, повышенной температуры и каталитического действия металлов. Эти продукты сильно повышают ионную проводимость и приводят к увеличению $\text{tg } \delta$. Их можно удалить из жидкости полностью или частично фильтрованием через отбеливающую глину.

Фильтрование. Отбеливающая глина (силикат алюминия) добывается открытым способом, затем высушивается и размалывается до требуемой тонкости помола. Ее требуемая кислотность устанавливается оптимальным содержанием влаги. Глина способна абсорбировать продукты старения и, в частности, продукты с полярными молекулами, содержащиеся в жидкости.

Фильтрование минеральных масел в большинстве случаев является заключительной стадией их кондиционирования после изготовления. На этой стадии удаляются остатки полярных компонентов, что приводит к замедлению процесса старения и уменьшению $\text{tg } \delta$.

Однако при использовании синтетических жидкостей непосредственно перед пропиткой они должны быть профильтрованы для получения оптимальных диэлектрических свойств.

§1.4. Механизм пробоя в жидких диэлектриках

Электрический пробой в жидких диэлектриках имеет много общих свойств с пробоем газов. Под действием приложенного напряжения возникает

эмиссия электронов из катода и “размножение” их в результате ударной ионизации нейтральных молекул жидкости. Искажение поля способствует появлению вторичных электронов и поддержанию самостоятельного разряда в виде стримеров. В технических жидких диэлектриках всегда содержится растворенный газ, который под действием приложенного напряжения имеет тенденцию собираться в маленькие пузырьки. Кроме того, выделяющаяся при развитии разряда теплота ведет к образованию новых пузырьков за счет испарения жидкого диэлектрика. Поэтому путь разряда в жидкости включает не только жидкую, но и газообразную фазу, что способствует развитию разряда.

Коронный разряд (КР) в изолирующих жидкостях протекает в форме стримеров, неустойчивых в пространстве и времени. В трансформаторном масле коронный разряд заметным образом не влияет на качество масла, однако в присутствии твердой органической изоляции коронный разряд может привести к резкому уменьшению электрической прочности изоляционной конструкции.

Когда стример пересечет весь разрядный промежуток, возникает искровой разряд. Температура разрядного канала резко повышается, и в результате испарения весь канал оказывается заполненным сильно ионизированным газом (плазмой). Окружающая жидкая среда оказывает на разрядный канал сильное деионизирующее действие. Если пробой промежутка происходит под действием короткого импульса перенапряжения, то вероятность перехода импульсного разряда в устойчивую дугу мала и промежуток частично восстанавливает свою первоначальную электрическую прочность. Образовавшиеся в результате разложения масла искровым разрядом частички угля и пузырьки газа постепенно рассеиваются в объеме масла, не сказываясь сколько-нибудь существенно на его дальнейшей электрической прочности. Подобная способность к “самозалечиванию” является характерной особенностью жидких диэлектриков с малой вязкостью.

Жидкости при давлениях до нескольких десятков атмосфер практически несжимаемы. Поэтому давления не может оказать влияния на разрядное напряжение идеально обезгаженной жидкости. В технических жидких диэлектриках содержится растворенный газ и давление передается через жидкость этому газу. С увеличением давления повышается прочность газовых пузырьков и соответственно общая электрическая прочность жидкости.

Электрическая прочность $E_{пр}$ жидких диэлектриков, и в частности изолирующих масел, резко уменьшается при различного рода загрязнениях и осо-

бенно при увлажнении. Под действием электрического поля частицы загрязнения или капельки влаги, обычно обладающие большей относительной диэлектрической проницаемостью, чем жидкий диэлектрик, втягиваются в зону повышенных градиентов, образуя цепочки, направленные вдоль силовых линий. При перекрытии вдоль такой цепочки разрядное напряжение резко уменьшается.

В минеральных маслах вода может находиться в трех состояниях: а) в молекулярно-растворенном; б) в форме эмульсии, т.е. капелек диаметром около 10 мкм; в) в виде отстоя на дне резервуара с маслом. В растворенном состоянии вода не оказывает существенного влияния на $E_{пр}$. Резкое спада $E_{пр}$ наблюдается в масле с водной эмульсией. Водный отстой сам по себе не влияет на $E_{пр}$ масла, но при увеличении температуры возможен его переход в эмульсионное состояние. Водный отстой является, таким образом, показателем резкого уменьшения изоляционных характеристик масла.

Особенно значительно влияние влаги в присутствии частиц высокой гигроскопичности, например волокон твердой органической изоляции. В этом случае влага может пропитывать волокна, повышая их эквивалентное значение ϵ' и способствуя образованию из них цепочек, резко уменьшающих пробивное напряжение. При нагреве влага из волокон переходит в изолирующую жидкость, что сопровождается повышением электрической прочности.

В жидких диэлектриках наблюдается существенная зависимость разрядного напряжения от времени приложения напряжения. Подъем разрядного напряжения при временах, меньших 10 мкс, объясняется запаздыванием развития стримерного разряда аналогично запаздыванию разряда в газах. Снижение разрядного напряжения при временах, больших 10^{-4} мкс (0,01 с), связано с влиянием примесей; образование цепочек частиц; снижающих электрическую прочность масла, происходит относительно медленно. По этой причине примеси, в том числе увлажнение, практически не влияют на электрическую прочность масла при газовых импульсах. С изменением формы и размера разрядного промежутка, ход вольт-секундной характеристики может несколько изменяться.

В жидких диэлектриках при плохом теплоотводе возможна и тепловая форма пробоя, аналогичная пробоем твердых диэлектриков. Такая форма, естественно, исключена в тех конструкциях (например, трансформаторы), в которых обеспечена циркуляция жидкости.

Глава 2. Маслобарьерная изоляция. Примеры применения маслобарьерной изоляции: силовые трансформаторы, вводы

Во многих изоляционных конструкциях (трансформаторы, вводы) используется изоляция, в которой промежутки с изоляционной жидкостью, обычно с трансформаторным маслом, перегорожены барьерами из твердой изоляции.

Кратковременная электрическая прочность масляных промежутков сравнительно невелика, особенно в случае неоднородных полей. Средние разрядные напряженности в масле при частоте 50 Гц для промежутков с резконеоднородными полями составляют всего лишь 5 - 7,5 кВ/см. Поэтому чисто масляная изоляция в высоковольтных конструкциях оказывается экономически невыгодной. Для повышения электрической прочности масляных промежутков используют покрытие и изолирование электродов твердой изоляцией, чаще всего слоями кабельной бумаги, а также барьеры из твердых диэлектриков.

Действие барьера различно в однородных и неоднородных полях. В равномерном или слабонеравномерном поле барьер препятствует возникновению проводящих цепочек в изолирующей жидкости между электродами. Барьер, установленный вблизи электрода с большей напряженностью поля, повышает разрядное напряжение при длительном приложении напряжения промышленной частоты на 30 – 35 %. Аналогичное действие оказывает поверхностное покрытие твердым диэлектриком электрода, обладающего большей кривизной.

При импульсах проводящие цепочки не успевают образоваться, поэтому барьеры в слабонеравномерных полях не повышают импульсного напряжения. Это заключение, однако, относится к чистым промежуткам в масле. В реальных конструкциях с маслобарьерной изоляцией (МБИ), барьеры оказываются всегда эффективными.

В резко неравномерном поле действие барьера в жидком диэлектрике аналогично действию барьера в газовом промежутке: разряды, возникающие в стадии короны, растекаясь по барьеру, выравнивают поле между барьером и плоскостью. Установка барьера повышает $U_{пр}$ промежутка с неравномерным полем в 2 – 2,5 раза. Наивысшие разрядные напряжения достигаются при установке барьера вблизи стержня на расстоянии $0,1 - 0,25d$.

Коронный разряд в масле, возникающий в резконеоднородном поле при напряжении много меньше пробивного, может охватить весь промежуток меж-

ду электродом и барьером. При грозовых и коммутационных импульсах коронный разряд не приводит к порче барьера, но при длительном приложении напряжения корона постепенно разрушает барьер, что приводит к уменьшению $U_{пр}$ всего промежутка. Поэтому возникновение коронного разряда при рабочем напряжении недопустимо. Так как наличие барьера не влияет на коронное напряжение, то в неравномерном поле барьеры не влияют на допустимую величину длительно приложенного напряжения.

Типовая конструкция изоляции обмотки 110 кВ силового трансформатора. Главная изоляция состоит из масляных каналов и барьеров в виде изолирующих цилиндров. Барьеры затрудняют образование проводящих мостиков в масле и тем самым резко повышают электрическую прочность изоляционной конструкции. На конце обмотки электрическое поле неоднородно, что создает опасность поверхностного разряда по барьерам. С целью повышения разрядного пути изолирующие цилиндры выпускают за край обмоток. Для класса изоляции 110 кВ и выше необходимым дополнением к изолирующим цилиндрам должны быть угловые шайбы, удлиняющие путь поверхностного разряда на концах обмоток. Продольная изоляция обмоток 110 кВ и выше состоит из изоляции, покрывающей провода и катушки, и масляных каналов между катушками. Обмотка снабжена компенсирующим экраном.

В конструкции изоляции для трансформаторов более высокого напряжения (например, 500 кВ) обмотка имеет петлевую конструкцию, так что в установке компенсирующих экранов нет необходимости. Угловые шайбы установлены не только между обмотками, но и на внешней стороне обмотки 500 кВ.

Уровень изоляции обмоток трансформатора определяется не только конструкцией изоляции напряжения изоляционными расстояниями, но и качеством изоляционных материалов. Для покрытия проводов и катушек применяется кабельная бумага; изолирующие цилиндры и угловые шайбы выполняются из прессшпана. В лучших образцах изолирующие цилиндры выполняются из электрокартона, а угловые шайбы штампуются из бумажно-целлюлозной массы. Все элементы волокнистой изоляции пропитываются маслом. Большое значение имеет технологическая обработка изоляции трансформатора, в частности сушка изоляции.

На конструкцию изоляции трансформаторов сильное влияние оказывает то обстоятельство, что в активных частях трансформатора, т.е. в меди обмоток и в магнитопроводе, при работе выделяется большое количество тепла. Это за-

ставляет выполнять изоляцию так, чтобы можно было непрерывно охлаждать активные части.

МБИ обладает достаточно высокой кратковременной электрической прочностью и позволяет интенсивно охлаждать конструкцию за счет циркуляции масла. Для того чтобы барьеры были эффективными, они должны располагаться перпендикулярно силовым линиям электрического поля. В проходных изоляторах, где электрическое поле в основном радикальное, это без труда достигается путем применения цилиндрических барьеров. В трансформаторах электрическое поле имеет сложную конфигурацию, поэтому приходится применять комбинацию барьеров разной формы.

В трансформаторах в основном применяют три типа барьеров, показанных на рис. 2.1: цилиндрический барьер 1, плоскую шайбу 2 и угловую шайбу 3. Количество барьеров зависит от номинального напряжения.

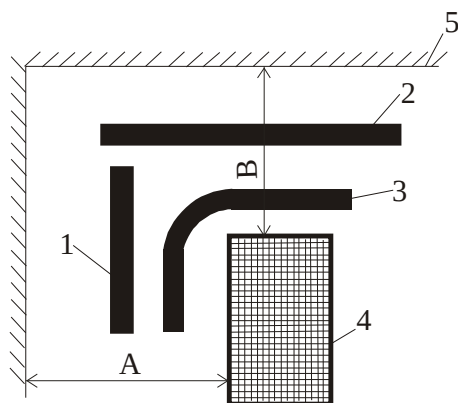


Рис. 2.1. Схема главной изоляции обмотки силового трансформатора:

1 – цилиндрический барьер; 2 – плоская шайба; 3 – угловая шайба; 4 – обмотка ВН;
5 – ярмо магнитопровода; A и B – главные изоляционные расстояния

Обычно расстояние от обмотки ВН до ярма приблизительно в два раза больше, чем расстояние до сердечника трансформатора, несмотря на то, что к этим промежуткам приложены одинаковые напряжения. Это связано с неблагоприятной формой электрического поля на концах обмотки, где напряженность имеет наибольшее значение. Поэтому при высоких номинальных напряжениях стремятся по возможности уменьшить напряжение на концах обмотки. Это удастся осуществить путем ввода напряжения в середину обмотки и разделения ее на две параллельные ветви. В этом случае концы обмотки соответствуют нейтрали трансформатора, напряжение на которой в системах с заземлен-

ной нейтралью всегда меньше фазного. Это обстоятельство позволяет изоляцию нейтрали рассчитывать на меньшее напряжение, что значительно облегчает ее конструирование и уменьшает общие габаритные размеры трансформатора.

Вводы. Проходные изоляторы (вводы) используются в местах, где токоведущие части проходят через стены или перекрытия зданий, через ограждения электроустановок или вводятся внутрь металлических корпусов оборудования. Проходными изоляторами обычно называются фарфоровые изоляторы на напряжения до 35 кВ с относительно простой внутренней изоляцией. Вводами называются проходные изоляторы на напряжения 35 кВ и выше с более сложной внутренней изоляцией. Вводы применяются в качестве проходных изоляторов трансформаторов, выключателей и других аппаратов.

Устройство ввода показано на рис. 2.2. Оно состоит из токоведущего стержня 1, фланца 2 и изоляционного тела 3. Его основными характеристиками являются: номинальное напряжение, рабочий ток и механическая нагрузка на токоведущий стержень.

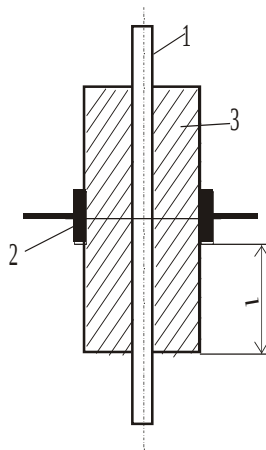


Рис. 2.2. Устройство простейшего проходного изолятора (ввода)

Ввод представляет собой конструкцию с внешней и внутренней изоляцией. К внешней изоляции относятся промежутки в атмосферном воздухе вдоль поверхности изоляционного тела, к внутренней – участки в самом изоляционном теле, а также промежутки вдоль поверхности изоляционного тела, находящиеся внутри корпуса, если последний заполнен газообразным или жидким диэлектриком.

Изоляционное тело служит одновременно и креплением токоведущего стержня. Оно воспринимает все механические усилия, которые действуют на стержень. С увеличением номинального напряжения и размеров изоляционного

тела резко возрастают механические нагрузки от собственной массы изолятора. Наиболее опасными для вводов являются механические нагрузки, изгибающие его изоляционное тело. Поэтому для крупных изоляторов, имеющих большую массу, ограничивают угол отклонения от вертикали в рабочем положении.

Нагрев ввода обуславливает потери в токоведущем стержне от рабочих токов, а также диэлектрические потери в изоляционном теле. Кроме того, нагрев может происходить и за счет тепловыделений, имеющих место внутри корпуса оборудования. Например, в трансформаторах, реакторах и силовых конденсаторах вводы соприкасаются с нагретым маслом, заполняющим внутренний объем баков. С увеличением рабочего напряжения и радиальных размеров изолятора отвод тепла от токоведущего стержня и из толщи изоляции значительно затрудняется. Поэтому становятся более жесткими и требования в отношении диэлектрических потерь во внутренней изоляции.

Вводы на напряжение 110 кВ и выше выполняются только заполненными маслом.

Основой внутренней маслобарьерной изоляции является масляный промежуток с цилиндрическими барьерами из картона. Для регулирования электрического поля на барьерах расположены дополнительные электроды из фольги.

Разрядные напряжения на поверхности маслобарьерного изолятора определяется главным образом размерами фарфоровых покрышек: их длиной, числом и размерами ребер. Кроме того, на разрядные напряжения по сухой поверхности сильное влияние оказывают размеры дополнительного электрода, ближайшего к фланцу и соединенного с ним. Выступая за края фланца, этот электрод экранирует их, т.е. уменьшает напряженность на поверхности фарфоровой покрышки около фланца.

Глава 3. Твердая изоляция. Тепловой, электрический и ионизационный пробой твердой изоляции

§3.1. Твердая изоляция

Любое вещество, как известно, может находиться в газообразном, жидком или твердом состоянии. В твердом диэлектрике, как и вообще в твердом

веществе, атомы и молекулы сильно сближены и плотно упакованы, что обеспечивает сохранность формы образца. Тепловое движение атомов проявляется в их колебаниях около положения равновесия. Твердые вещества, в частности диэлектрики, подразделяются на кристаллические и аморфные. Первые отличаются упорядоченным расположением атомов, образующих кристаллическую решетку. В аморфных телах атомы расположены хаотично.

Границы между рассматриваемыми состояниями вещества задаются критическими температурами плавления и газообразования, которые зависят от давления. Аморфные вещества не имеют резко выраженной температуры плавления. По мере повышения температуры аморфное твердое тело постоянно размягчается; обратный переход происходит также постепенно путем загустения жидкости.

Аморфное твердое тело с его неупорядоченной атомной структурой можно формально представить как переохлажденную жидкость. Существуют вещества типа смол и компаундов, которые занимают промежуточное положение между жидкостью и твердым телом: они сохраняют свою форму в течение некоторого промежутка времени, но растекаются в течение длительного времени под действием собственного веса.

Важнейшими характеристиками диэлектриков являются:

1. электрическая прочность при минутном испытании $E_{пр}$ (кВ/см);
2. относительная диэлектрическая проницаемость ϵ' ;
3. тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$;
4. удельное сопротивление ρ , $МОм \cdot см$, или удельная проводимость γ , $1/(МОм \cdot см)$;
5. класс нагревостойкости, характеризующий максимальную длительную температуру допустимую для изоляции в эксплуатации.

Классы нагревостойкости приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Класс нагревостойкости	Y	A	E	B	F	H	C
Максимальная рабочая температура, °C	90	105	120	130	155	180	Выше 180

§3.2. Виды твердых изоляционных материалов

Как и к жидким изоляционным материалам, к твердым диэлектрикам, применяемым в технике высоких напряжений, предъявляется ряд требований. Они должны выполнять функции механического крепления токоведущих частей, например в трансформаторах, для чего применяются рейки, трубы, пластины. В некоторых конструкциях твердая изоляция выполняет роль бака. Это, например, фарфоровые рубашки или бакелитовые цилиндры. Твердая изоляция с высокой диэлектрической проницаемостью применяется в конденсаторах. Твердые диэлектрики используются в качестве барьеров в жидкой и газовой изоляции. Внутри твердой изоляции могут быть размещены электроды или обмотки.

3.2.1. Керамические изоляционные материалы

Эти материалы получают из глинистых продуктов путем спекания при высокой температуре. Они представляют собой кристаллическую фазу и нерастворимы в воде. Формируются керамические изделия из пластичной массы при комнатной температуре. Дальнейший обжиг, сопровождающийся объемной усадкой, приводит к тому, что утрачиваются пластичные свойства исходного сырья, изделие становится твердым и стабильным по форме.

Фарфор и стеатит. Фарфор представляет собой силикат алюминия, в его состав входят 40 - 50 % каолина и глины (пластификатора), 20 - 30% оксида алюминия и 30% полевого шпата. Эта смесь дает высокопрочный фарфор (глинистый или глиноземистый фарфор) с лучшими механическими свойствами, чем применявшийся ранее кварцевый фарфор.

Стеатит представляет собой силикат магния. Затруднительная обработка, вызванная отсутствием связующего материала, является причиной того, что изделия из стеатита имеют малые размеры, и поэтому для изготовления больших изоляторов на высокие напряжения предпочитают использовать фарфор. Стеатит по сравнению с фарфором обладает лучшими механическими характеристиками и меньшими диэлектрическими потерями.

Фарфор в электроэнергетике используется в качестве изоляции воздушных линий электропередачи, газовых выключателей. Из фарфора изготавливаются опорные изоляторы разъединителей и сборных шин, вводы силовых

трансформаторов, изоляционные конструкции измерительных трансформаторов напряжения и тока, изоляционные корпуса оборудования и т.д.

3.2.2. Стекла

Они получают путем спекания различных оксидов. Наибольшее значение при изготовлении стекол имеют диоксид кремния SiO_2 в виде кварцевого песка, триоксид бора B_2O_3 и оксиды металлов PbO , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , BaO и др. При изготовлении стекол широко применяются более 500 видов разнообразных добавок. С их помощью получают и бесщелочное электротехническое стекло (содержание щелочи менее 0,8%), обладающее малой электропроводностью.

Е-стекло имеет преимущества при использовании в электротехнике по сравнению со щелочными стеклами. Стекла применяются в концевых разделках кабелей, при изготовлении вводов, конденсаторов, тарельчатых изоляторов воздушных линий электропередачи.

Е-стекло используется прежде всего в виде волокна для изготовления стеклопластиков. Волокна в электротехнических материалах содержат в зависимости от способа их вытягивания защитную оболочку с хорошим сцеплением эпоксидного основания и заполнителя.

Так как модуль упругости и прочность на разрыв стеклянных нитей гораздо выше, чем у эпоксидных смол, то материалы на основе стекловолокна обладают хорошими механическими свойствами. Стекловолоконными нитями бандажируются, например, обмотки электрических машин и укрепляются пакеты стали в трансформаторах. Стеклоткань используется для механического упрочнения изоляционных плат и труб для камер выключателей; стекловолоконный стержень является несущей частью стеклоэпоксидных подвесных изоляторов.

3.2.3. Слюда

Это природный минерал, образованный различными химическими соединениями. Важнейшими видами слюды, применяемыми в электротехнике, являются мусковит (калиевая слюда, расщепляемая на тонкие слои) и флогопит (магниева слюда). Кристаллы слюды обладают способностью под действием механической нагрузки расщепляться по определенным кристаллографическим

плоскостям. Это объясняется тем, что их кристаллическая структура представляет собой решетку с очень прочными связями в одной плоскости и со слабыми связями в плоскости, перпендикулярной первой.

В технике высоких напряжений преимущественно используется только такая слюда, которая при расщеплении дает крупные пластинки овальной или многоугольной формы толщиной от 0,02 до 0,10 мм. Для изготовления конденсаторов применяется так называемая блочная слюда с пластинами толщиной от 0,18 до 0,76 мм.

Слюда обладает термостойкостью вплоть до 600°C, ее температура плавления составляет 1200 - 1300°C. Слюда стойка к воздействию дуги, масла, облучения, противостоит тлеющим разрядам.

Применяемые в технике высоких напряжений пластинки слюды скрепляются, например, силиконовой или эпоксидной смолой, в результате чего образуются пластины или трубы стабильной формы (миканит), или наклеиваются на подложку из бумаги или стеклошелка - образуются гибкие полоски (микафолий).

Миканит применяется для изоляции коллекторных пластин электрических машин, цоколей ламп, элементов крепления электродов в электронных лампах, каркасов и т. д.

Микафолий представляет собой гибкую подложку - полосу бумаги или стеклошелка, на которую с нахлестом наклеены пластинки слюды с помощью шеллака, силиконовой или эпоксидной смолы.

Высокие теплостойкость, механическая прочность, негорючесть, устойчивость при воздействии масла и влаги позволяют использовать микафолий при изготовлении изоляции асинхронных двигателей, обмоток генераторов и сухих трансформаторов.

3.2.4. Высокомолекулярные полимерные изоляционные материалы

Эти материалы состоят из макромолекул, представляющих собой объединение по меньшей мере многих сотен атомных групп. Объединение атомных групп в макромолекулы может существовать в трех формах.

Одномерные группы образуют молекулы в виде более или менее длинных нитей - термопластов. Двумерные группы дают плоские макромолекулы.

Трехмерные группы формируют пространственные макромолекулы, и материалы с такими молекулами называют duroпластами.

Формирование групп называют полиреакциями, при этом различают следующие процессы: полимеризацию, поликонденсацию и ступенчатую полимеризацию.

Полимеризация. Этим термином обозначают полиреакции, при которых одинаковые или похожие так называемые мономеры (конструкционные элементы), имеющие двойные химически активные связи, объединяются друг с другом, причем увеличение молекул происходит без образования побочных продуктов.

Благодаря такому цепочечному объединению элементов возникают линейные молекулы. Если полимеризация происходит с участием мономеров одного вида, то ее называют гомополимеризацией. Если же в реакции принимают участие два и более вида мономеров, то речь идет о кополимеризации.

Таблица 2.2

Сводный перечень применяемых в технике высоких напряжений пластмасс

Тип полимеров, реакции	Дуропласты	Термопласты
Полимеризация	Сшитые полиэфирные смолы на основе ненасыщенных полиэфиров.	Полиэтилен (PE), полипропилен (PP), поливинилхлорид (PVC), полистирол (PS), полиацетал (POM) и др.
Поликонденсация	Фенольные смолы (PF), меламинные смолы (MF), алкидные смолы и т.д.	Линейные насыщенные полиэфирные смолы: поликарбонат (PC), нейлон, перлон, полиимиды.
Ступенчатая полимеризация	Эпоксидные смолы (EP), сшитые полиуританы (PUR) и др.	Линейные полиуританы (PUR).

Поликонденсация. В противоположность полимеризации в поликонденсации участвуют неодинаковые мономеры, образующие цепочечные или разветвленные макромолекулы. Мономеры должны иметь две, три и т. д. активные связи. Соединение функциональных групп сопровождается выделением побоч-

ных продуктов, таких, как вода, аммиак и др. Эти продукты в процессе полиреакции приводят к образованию пустот, и поэтому материалы, полученные поликонденсацией, могут быть использованы, как правило, при низких напряжениях.

Ступенчатая полимеризация. Это реакция полиприсоединения маломолекулярных элементов с двумя и более связями в вещество с активными атомами водорода путем отдельных, не зависящих друг от друга единичных реакций, при этом объединение групп происходит без образования побочных продуктов, чаще всего за счет смещения атомов водорода. Появляющиеся таким образом материалы обладают высокими диэлектрическими свойствами. Их называют полиаддуктами или продуктами ступенчатой полимеризации.

3.2.5. Эластомеры

К эластомерам относится силиконовая резина. Силиконовая резина - это материал, получаемый путем вулканизации силиконового каучука.

Силиконовый каучук не окисляется, стоек к воздействию озона, света, жиров и хлорированных дифенилов. Пары воды силиконовая резина впитывает лишь при температуре выше 130°C и разрушается только при больших временах воздействия паров. Силиконовая резина набухает в бензине, алифатических углеводородах, в ароматических растворителях и маслах и теряет свою механическую прочность.

Силиконовая резина горячей вулканизации применяется в качестве изоляции жил и оболочек кабелей, используемых в технике связи и электроснабжении, для уплотнений вводов в аппараты с жидкой средой и изготовления изоляции проводов и защитных колпаков распределителей в системах зажигания двигателей внутреннего сгорания. Самоклеящиеся ленты из борсодержащей силиконовой резины используются в качестве изоляции кабелей.

Важнейшей областью применения силиконовой резины в технике высоких напряжений является изготовление подвесных изоляторов для воздушных линий электропередачи, состоящих из стеклотекстолитового стержня, устойчивого к растяжению, и экранов. Расширяется применение силиконовой резины при производстве штепсельных разъемов с регулированием поля для кабелей с пластмассовой изоляцией, работающих при средних напряжениях.

Твердеющие при низкой температуре материалы используются преимущественно для заливки обмоток и изготовления деталей, работающих при повышенных температурах.

Существуют также другие виды эластомеров, такие, как этиленпропиленкополимеризат (ЕРМ) и фторкаучук.

§3.3. Тепловой, электрический и ионизационный пробой твердой изоляции

3.3.1. Тепловое старение твердой изоляции

Тепловое старение, т. е. постепенное ухудшение характеристик внутренней изоляции при длительном нагреве, происходит вследствие того, что при повышении температуры возникают или ускоряются химические процессы в изоляционных материалах.

Тепловое старение твердых диэлектриков проявляется главным образом в снижении их механической прочности. В частности, у наиболее распространенных в высоковольтной изоляции материалов из целлюлозы (бумага, картон) при длительном нагреве особенно сильно снижается прочность на растяжение и излом.

Тепловое разложение (деструкция) бумаги в присутствии влаги и воздуха (кислорода) ускоряется. В случае, когда бумага пропитана минеральным маслом, скорость старения уменьшается, так как ограничивается доступ воздуха к бумаге. Однако в некоторых случаях этот эффект снижается вследствие того, что в самом масле образуются продукты, вызывающие разложение целлюлозы (например, органические кислоты, перекиси и др.).

Тепловое старение бумаги при отсутствии других внешних воздействий практически не меняет ее кратковременной электрической прочности. Однако в реальных условиях эксплуатации одновременно с нагревом изоляция подвергается также и воздействию механических усилий. Поэтому снижение механической прочности бумаги в результате теплового старения непременно приводит к механическому повреждению изоляции и уже как следствие к электрическому пробую.

Большинство твердых изоляционных материалов, применяемых в электрических аппаратах и машинах высокого напряжения, также постепенно те-

ряют механическую прочность при длительном нагреве и выходят из строя в результате пробоя, возникающего после механического повреждения.

Тепловое старение жидких диэлектриков выражается прежде всего в повышении проводимости и диэлектрических потерь. В минеральных маслах при повышении температуры развиваются окислительные процессы, в результате которых образуются органические кислоты, кетоны, альдегиды и твердые продукты (смолы). Эти продукты образуют ионы и коллоидные частицы в масле. В итоге проводимость и диэлектрические потери масла увеличиваются. Одновременно с этим снижается и электрическая прочность.

Увеличение диэлектрических потерь вызывает дополнительный нагрев изоляции и ускорение темпов ее старения. При определенных условиях рост диэлектрических потерь может привести к тепловому пробую.

Срок службы изоляции τ_T , при тепловом старении зависит от скорости химических реакций. Если принять приближенно, что эта скорость на протяжении всего времени старения остается неизменной, то

$$\tau_T = A / \kappa_{\text{хим}}, \quad (2.1)$$

где $\kappa_{\text{хим}}$ - величина, характеризующая скорость химических реакций, например количество продуктов, вступающих в реакцию в единицу времени; A - коэффициент пропорциональности.

При прочих равных условиях скорость процесса зависит от температуры T . Для простейших химических реакций эта зависимость определяется законом Аррениуса, согласно которому

$$\kappa_{\text{хим}} = k_o \ell^{-W_a/RT}, \quad (2.2)$$

где W_a - энергия активации; R - универсальная газовая постоянная.

Строго говоря, применение закона Аррениуса к сложным реакциям в изоляционных материалах неправомерно. Тем не менее опыт показывает, что выражение (2.2) дает результаты, хорошо совпадающие с экспериментальными и в случае процессов, возникающих при тепловом старении изоляции.

На основании выражений (2.1) и (2.2),

$$\tau_T = A_1 \ell^{B/T}, \quad (2.3)$$

где A_1 и B — постоянные.

В относительно узком интервале возможных рабочих температур зависимость $\tau_T = f(T)$, вытекающая из выражения (2.3), может быть представлена в виде

$$\tau_T = A_2 \ell^{-aT}. \quad (2.4)$$

Из выражения (2.4) следует, что отношение сроков службы изоляции при разных температурах T_1 и T_2 будет выражено следующими уравнениями:

$$\tau_{T_1} / \tau_{T_2} = \ell^{-a(T_1 - T_2)}, \quad (2.5)$$

$$\tau_{T_1} / \tau_{T_2} = 2^{-(T_1 - T_2 / \Delta T)}, \quad (2.6)$$

где $\Delta T = \ln 2/a$ - повышение температуры, вызывающее сокращение срока службы изоляции при термическом старении в два раза.

Значение ΔT в среднем составляет примерно 10°C . Поэтому при ориентировочных расчетах можно полагать, что повышение температуры изоляции на каждые 10°C дает сокращение срока службы в два раза.

Для того чтобы ограничить скорость теплового старения и обеспечить необходимую долговечность изоляции, устанавливают предельные допустимые температуры $T_{\text{раб.дон}}$, а изоляционные конструкции выполняются таким образом, что в номинальном режиме работы температура в наиболее нагретой точке изоляции не превышает допустимую.

Нормы нагрева устанавливаются для отдельных видов электротехнического оборудования с учетом специфических условий работы.

3.3.2. Тепловой пробой твердой изоляции

Механизм теплового пробоя можно пояснить на простейшем примере, приняв условно, что температура Θ во всех точках изоляции одинакова. При воздействии на изоляцию переменного напряжения U количество тепла Q_v , выделяющегося в единицу времени за счет диэлектрических потерь, а также количество тепла $Q_{\text{отв}}$, отводимого от изоляции в окружающую среду, определяются выражениями:

$$Q_v = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta, \quad (2.7)$$

$$Q_{\text{отв}} = Sk(\Theta - \Theta_{\text{окр}}), \quad (2.8)$$

где C - емкость изоляции; $\operatorname{tg} \delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь; S - поверхность изоляции, от которой отводится тепло в окружающую среду; k - коэффициент теплоотдачи; $\Theta_{\text{окр}}$ - температура окружающей среды, Θ - температура изоляции.

У большинства изоляционных материалов диэлектрические потери и, следовательно, величина $\operatorname{tg} \delta$ с ростом температуры увеличиваются. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от температуры Θ приближенно соответствует выражению

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_o \ell^{a(\Theta - \Theta_o)}, \quad (2.9)$$

где Θ_o - температура, при которой $\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_o$.

В этом случае Q_B и Q_{OTB} зависят от температуры изоляции, как показано на рис. 2.3, на котором кривые Q_B построены для нескольких значений напряжения. При напряжениях U_1 и U_2 достигается равенство $Q_B = Q_{OTB}$, т.е. возможны устойчивые режимы нагрева изоляции с температурами Θ_1 и Θ_2 соответственно.

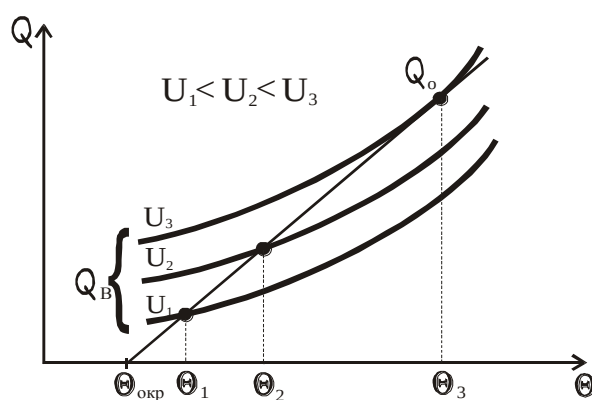


Рис. 2.3. К механизму теплового пробоя

Наибольшее значение напряжения, при котором еще может соблюдаться условие $Q_B = Q_{OTB}$, равно U_3 (кривые Q_B и Q_{OTB} касаются при $\Theta = \Theta_3$). Однако уже в этом предельном случае тепловой режим изоляции оказывается неустойчивым. При случайном повышении температуры или напряжения количество выделяющегося тепла будет постоянно превышать количество тепла отводимого и температура изоляции Θ станет неограниченно возрастать. Таким образом, при $U \geq U_3$ термическое равновесие изоляции нарушается, температура беспрестанно увеличивается и происходит термическое разрушение изоляции с потерей диэлектрических качеств. Такой процесс называют тепловым пробоем.

Из графиков на рис. 2.3 следует, что нарушение термического равновесия изоляции наступает, если $Q_B \geq Q_{OTB}$ и

$$\partial Q_B / \partial \Theta \geq \partial Q_{OTB} / \partial \Theta. \quad (2.10)$$

Напряжение теплового пробоя определяется условиями отвода тепла от изоляции и тепловыделениями в самой изоляционной конструкции. Сильное

влияние оказывают также размеры и теплопроводности самой изоляции, электродов и других элементов конструкции, а также тепловыделения в токоведущих частях.

Для изоляционных конструкций, работающих в напряженных тепловых режимах, для которых опасность теплового пробоя особенно велика (вводы, силовые кабели и конденсаторы), созданы инженерные методики расчета напряжения теплового пробоя, достаточно полно учитывающие действительные условия нагрева и охлаждения. Однако в этих методиках рассматриваются установившиеся режимы нагрева. В условиях же эксплуатации повышенные напряжения воздействуют на изоляцию ограниченное время, за которое не всегда достигается установившееся состояние нагрева. При непродолжительных повышениях напряжения изоляция может не успеть полностью нагреться и тепловой пробой не произойдет, даже если $U > U_{пр}$. Поскольку инженерные методы расчета напряжения теплового пробоя в неустановившихся режимах нагрева отсутствуют, способность изоляционной конструкции выдерживать непродолжительные перегрузки проверяется экспериментально.

3.3.3. Электрический пробой твердой изоляции

В твердых диэлектриках, как и в газах, электрический пробой связан с ускорением электронов под воздействием электрического поля. В твердом теле электроны частично связаны с индивидуальными атомами, а частично с группами атомов. Наиболее слабо электроны связаны с атомами в местах структурной неоднородности материала. В диэлектриках имеются также свободные электроны или электроны проводимости, однако число их при обычных температурах невелико. Показателем числа свободных электронов является ток проводимости (или сопротивление изоляции) при постоянном напряжении.

Мерой хаотического движения электронов проводимости является температура электронного «газа» T_e . С повышением температуры T_e и напряженности электрического поля E энергия электронов проводимости W возрастает, как это показано кривыми А на рис. 2.4. С повышением температуры T_e растет также энергия, передаваемая электроном кристаллической решетке диэлектрика и рассеиваемая в его толще (кривая В). Равновесное состояние характеризуется пересечением кривых А и В в точках 1 и 2. При напряженности внешнего поля $E_{пр}$, которому соответствует касание кривых А и В, происходит наруше-

ние равновесия; возникает непрерывный рост электронной температуры, что приводит к пробое диэлектрика. Критическая напряженность $E_{пр}$ является электрической прочностью диэлектриков. Таким образом, электрический пробой твердых диэлектриков есть проявление температурной неустойчивости на электронном уровне.

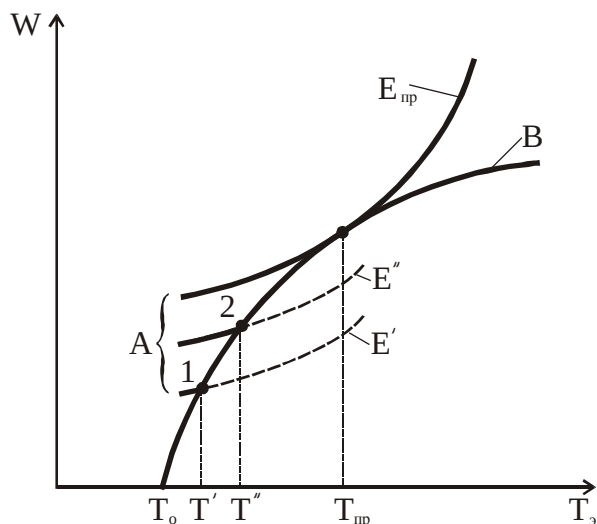


Рис. 2.4. Зависимости энергии, накопленной электроном (кривая A) и передаваемой решетке (кривая B), от температуры электронного газа $T_э$ при разных напряженностях поля E

С повышением температуры диэлектрика T_0 кривая B сдвигается вправо, и напряженность $E_{пр}$ должна снижаться. Такая зависимость действительно наблюдается для технических твердых диэлектриков. Поэтому электрическая прочность диэлектриков часто проверяется во всем диапазоне рабочих температур.

Электрическая прочность твердых диэлектриков почти не зависит от толщины образца, т.е. пробивное напряжение растет пропорционально толщине диэлектрика. Отступление от этой закономерности наблюдается только при очень тонкослойных диэлектриках. При толщине диэлектрика в несколько микрон электрическая прочность $E_{пр}$ резко возрастает.

В неоднородном поле условия электрического пробоя выполняются прежде всего у электрода с большой кривизной, с которого начинается прорастание разрядного канала. Канал переносит высокие напряженности поля в глубь промежутка, в результате чего происходит прорастание канала, завершающееся пробоем промежутка. Аналогично газовым промежуткам в твердой изоляции действует барьерный эффект из тонких высокопрочных пленок, заложенных в материал вблизи электрода с большей кривизной.

Характерной особенностью электрического импульсного пробоя твердой изоляции является возможность частичных разрядов, приводящих к необратимым частичным разрушениям материала и постепенному снижению электрической прочности изоляции. Явление пробоя изоляции под действием ряда импульсов называется кумулятивным эффектом. Кумулятивный эффект имеет важное значение при импульсных испытаниях высоковольтного оборудования.

3.3.4. Ионизационный пробой твердой изоляции

В технической изоляции могут возникать газовые включения. В этих включениях напряженность поля возрастает, электрическая же прочность газовой среды ниже прочности твердого диэлектрика. Поэтому в газовых включениях возникает ионизация, которая оказывает на окружающий диэлектрик электрическое, механическое и химическое воздействие. При неблагоприятных обстоятельствах в изоляции возникает медленное развитие дефекта, приводящее к пробое изоляции. Такой пробой называется ионизационным. Особенности ионизационных процессов можно проследить по схеме замещения изоляции (рис. 2.5).

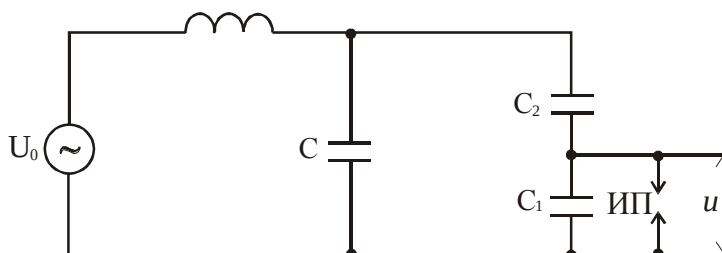


Рис. 2.5. Схема замещения изоляции с газовым включением на переменном напряжении

Емкость газового включения C_1 соединена последовательно с емкостью, оставшейся под газовым пузырьком толщи диэлектрика C_2 . Основная масса диэлектрика имеет емкость $C \gg \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$. Разряд в газовом включении имитирован

пробоем искрового промежутка ИП, включенного параллельно C_1 . В отсутствие пробоя ИП переменное напряжение U_0 распределяется обратно пропорционально C_1 и C_2 . Синусоидальная кривая напряжения на емкости C_1 показана на рис. 2.6 пунктиром. Пусть напряжение пробоя ИП (газового включения) равно $U_{пр}$. В точке А происходит пробой ИП и срез напряжения на емкости до

некоторого малого остаточного напряжения. Но вследствие малого значения емкости C_2 ток в ИП также мал, и искра, не переходя в дуговой разряд, сразу же гаснет. Начинается восстановление напряжения на емкости C_1 по кривой, эквидистантной пунктирной синусоиде.

Как только напряжение на ИП достигает $U_{пр}$, вновь происходит его пробой, гашение искры, восстановление напряжения и т.д. Кривая напряжения на C_1 приобретает форму, показанную на рис. 2.6 сплошной линией.

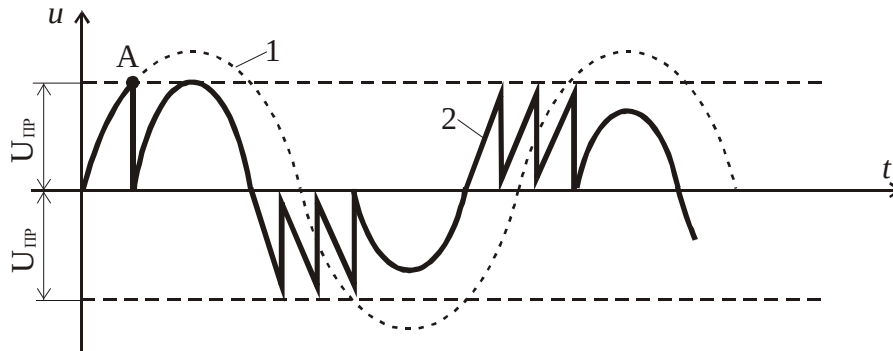


Рис. 2.6. Кривая напряжения на емкости C_1 (газовом включении):
1 - при отсутствии пробоя ИП; 2 - при пробое ИП

При каждом срезе напряжения нейтрализуется заряд $\Delta Q = C_1 U_{пр}$. Это приводит к скачкообразным снижениям напряжения на емкости C , равным

$$\Delta U = \frac{C_2}{C_1 + C_2} U_{пр} \approx \frac{C_2}{C_o} \cdot \frac{\Delta Q}{C_1}, \quad (2.11)$$

где C_o – общая емкость диэлектрика, приблизительно равная $C + C_2$.

Так как величины C_1 и C_2 неизвестны, для характеристики процесса следует ввести величину кажущейся интенсивности ионизации.

$$\Delta Q_o = \Delta Q \frac{C_2}{C_1}. \quad (2.12)$$

Используя эту величину из формулы (2.11), получено уравнение

$$\Delta Q_o = C_o \Delta U_o. \quad (2.13)$$

Измеряя ΔU_o , можно определить и значение ΔQ_o . Серия разрядов в воздушном включении повторяется каждые полпериода. Следовательно, число их пропорционально частоте приложенного напряжения. С увеличением амплитуды приложенного напряжения число разрядов за полупериод возрастает.

Развитие процесса будет протекать следующим образом. Нейтрализация заряда ΔQ связана с рассеиванием энергии $\frac{1}{2} C_1 \Delta Q$, переходящей в тепло. В

твёрдой синтетической изоляции, например, полиэтилене или полистироле, возникает микроскопическая эрозия материала, расширяющая объём газового включения. Постепенно возникает канал, по мере удлинения которого рассеиваемая энергия возрастает, способствуя ещё большей скорости эрозии материала. Под действием высокой температуры в канале часто образуются вещества типа смолы; зачастую при этом канал обуглероживается и становится проводящим. В этих случаях разряды прекращаются, но возникает новая электрическая или тепловая формы пробоя.

Ионизационный пробой характерен для бумажно-масляной и маслобумажной изоляции. Газовые включения в изоляции могут находиться там с момента изготовления конструкции или появиться вследствие нагрева остаточной влаги или других примесей.

Ионизационный пробой обычно начинается в местах с наиболее высокой напряжённостью поля. Особенно опасны тангенциальные составляющие поля вдоль слоёв бумаги. Поэтому в изоляционных конструкциях стремятся избежать высоких тангенциальных составляющих.

Ионизационный пробой (ИОП) развивается во времени очень медленно. Поэтому наличие газовых включений практически не сказывается на прочности изоляции при импульсных воздействиях. Однако каждый импульс высокой амплитуды вызывает разряд в газовых включениях и составляет хотя и малый, но необратимый след. По этой причине у ИОП ярко выражен кумулятивный эффект. Электрическая прочность существенно понижается при большом числе импульсных воздействий. Характеристикой изоляции в отношении ионизационных явлений служит напряжение ионизации, т.е. такое приложение напряжения рабочей частоты, при которой в изоляции начинает возникать ионизация, обнаруживаемая с помощью специальных схем. Различают следующие ионизационные характеристики изоляции:

- критическое напряжение ионизации. $U_{кр.и}$ – напряжение, при котором возникают разряды значительной интенсивности, способные вызвать ИОП изоляции за относительно короткий срок;
- начальное напряжение ионизации. $U_{н.и}$ – наименьшее напряжение, при котором возникают слабые разряды, вызывающие ионизационное старение изоляции.

Испытательное напряжение изоляции не должно превышать критического напряжения ионизации; рабочее напряжение не должно превышать началь-

ного напряжения ионизации. Исключение могут составлять только локальные участки вблизи электродов с острыми краями, например на краях конденсаторных обкладок, где напряженность поля очень высока и начальная напряженность $U_{н.и}$ ниже $U_{раб}$.

В бумажно-масляной и маслобарьерной изоляции повышение напряжения достигается тщательной очисткой масла, пропиткой твердой волокнистой изоляции, применением высококачественных волокнистых материалов (бумаги, картона, дерева и пр.), применением литых изделий из целлюлозы или пластмасс.

Изложенные выше особенности ионизационного пробоя относились к переменному напряжению или повторным импульсам. При постоянном напряжении ионизационные процессы в газовых включениях протекают иначе. Распределение постоянного напряжения по элементам изоляции происходит в соответствии с проводимостями этих элементов. Схема замещения изоляции с газовыми включениями приведена на рис. 2.7. В этой схеме R_1 и R_2 - сопротивления изоляции газового включения и последовательно включенного участка здоровой изоляции, а R - сопротивление остальной массы изоляции.

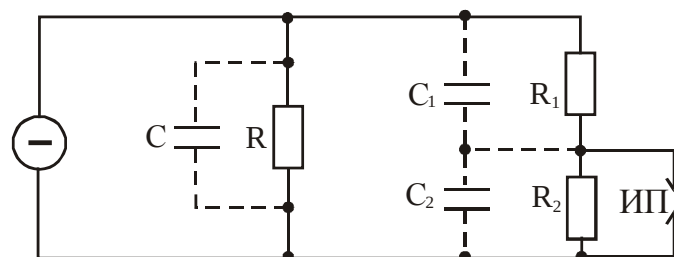


Рис. 2.7. Схема замещения изоляции с газовым включением на постоянном напряжении

В момент пробоя ИП напряжение на емкости C_2 (емкости газового включения) уменьшается до нуля, затем гаснет. Восстановление напряжения на C_2 происходит с постоянной времени $T = R_3 C_3$, где $R_3 = R_1 || R_2$; $C_3 = C_1 || C_2$. Вследствие высоких значений R_3 , T измеряется секундами или даже минутами. Поэтому повторные пробои газовых включений происходят редко. По этой причине на постоянное напряжение изоляционные конструкции допускают значительно большие рабочие напряженности поля, чем на переменное напряжение.

Глава 4. Газовая и вакуумная изоляция

Применение газовой изоляции дает ряд преимуществ по сравнению с твердыми и жидкими диэлектриками. В частности, газовая изоляция отличается очень малыми диэлектрическими потерями и практически не изменяет своих свойств в процессе эксплуатации. Применение ее приводит к резкому снижению массы конструкции. В ряде случаев конструкция устройства упрощается и становится пожаробезопасной.

При увеличении давления электрическая прочность элегаза (SF_6) и воздуха становится выше электрической прочности твердых и жидких диэлектриков, например минерального масла.

Газы, используемые для изоляции установок высокого напряжения, должны быть химически стойкими в электрическом разряде и не должны выделять химически активных веществ; быть инертными и не вступать в реакции с материалами, в сочетании с которыми они применяются; обладать низкой температурой сжижения, допускающей их применение при повышенных давлениях, и высокой теплопроводностью. Помимо этого они должны быть негорючими и нетоксичными, и иметь невысокую стоимость.

В настоящее время в качестве изоляции применяются воздух, азот и шестифтористая сера (элегаз). Из них наибольшей электрической прочностью, превышающей прочность азота и воздуха примерно в 2,5 раза, обладает элегаз. Причина этого заключается в том, что элегаз является электроотрицательным газом, в состав его молекулы SF_6 входит фтор — галоген, легко присоединяющий к себе электрон и образующий устойчивые отрицательные ионы. Свое название элегаз получил от сокращения “электрический газ”. Электрическая прочность при атмосферном давлении и зазоре 1 см составляет $E = 89 \text{ кВ/см}$. Элегаз химически инертен, нетоксичен, негорюч, термостоек (до 800°C), взрывобезопасен, слабо разлагается в разрядах, имеет низкую температуру сжижения. В отсутствие примесей элегаз совершенно безвреден для человека. Однако продукты разложения токсичны и химически активны.

При увеличении давления электрическая прочность элегаза возрастает почти пропорционально давлению и может быть выше электрической прочности жидких и некоторых твердых диэлектриков. Наибольшее рабочее давление и, следовательно, наибольший уровень электрической прочности элегаза в изоляционной конструкции ограничиваются возможностью сжижения элегаза при

низких температурах. Так, температура сжижения элегаза при давлении 0,3 МПа составляет -45°C , а при 0,5 МПа повышается до -30°C . Такие температуры у отключенного оборудования наружной установки вполне возможны зимой во многих районах страны. В связи с этим большой интерес представляют смеси элегаза с азотом, у которых электрическая прочность лишь на 10 — 15 % ниже прочности чистого элегаза, а допустимое давление резко возрастает. Так, например, у смеси из 30 % элегаза и 70 % азота сжижение при температуре -45°C наступает при давлении 8 МПа. Таким образом, допустимое рабочее давление для смеси оказывается примерно в 30 раз выше, чем для чистого элегаза.

Для крепления токоведущих частей в комбинации с элегазом используются опорные изоляционные конструкции из литой эпоксидной изоляции. Основным материалом в ней является эпоксидная или эпоксидно-диановая смола. Качество таких опорных изоляторов и особенно их длительная электрическая прочность в сильной степени зависят от технологии подготовки материалов и заливки. Обязательными считаются сушка исходных материалов, тщательное перемешивание компаунда, вакуумирование объема формы, заливка и выдержка до отверждения при избыточном давлении. Эти мероприятия позволяют исключить в литой изоляции газовые включения и тем самым обеспечить высокий уровень ее длительной электрической прочности.

Элегазовая изоляция может быть использована только в герметичных конструкциях. Практика показала, что надежная герметизация конструкций с элегазом является сложной задачей, требующей пристального внимания. В современных элегазовых аппаратах утечка элегаза не превышает 1 % общей массы в год.

Высокая надежность элегазовой изоляции, как показывает опыт эксплуатации, обеспечивается при условии очень тщательной очистки от загрязнений всех элементов конструкции, соприкасающихся с элегазом. Небольшие количества пыли, мелкой металлической стружки, волокон пряжи или бумаги могут снизить кратковременную электрическую прочность конструкции или вызвать появление в ней частичных разрядов. Последние опасны тем, что разлагают элегаз с образованием химически очень активных, а иногда и токсичных продуктов.

В настоящее время основной областью применения элегазовой изоляции являются комплектные распределительные устройства (КРУЭ) на напряжение

110 — 220 кВ, наибольшее рабочее давление элегаза в которых 0,3 МПа. Сейчас разрабатываются КРУЭ на напряжение 1150 кВ, ведутся работы по созданию силовых кабелей с элегазовой изоляцией.

Элегаз является не только хорошей изолирующей, но и хорошей дугогасящей средой. Ток отключения в элегазе примерно в 10 раз больше, чем в воздухе. Если же учесть, что в элегазе скорость восстановления электрической прочности после погасания дуги почти на порядок выше, чем в воздухе, то из этого следует, что мощность отключения в элегазе может быть почти в 100 раз больше, чем в воздухе. По этой причине элегазовые выключатели успешно конкурируют с воздушными выключателями.

Воздух под избыточным давлением в несколько атмосфер используется в основном в образцовых конденсаторах на напряжение до 35 кВ. Ограниченное применение воздуха связано с тем, что при частичных разрядах в воздухе образуется озон, вызывающий коррозию металлов и разрушение твердых диэлектриков.

Азот и элегаз применяются для изоляции конденсаторов, трансформаторов, кабелей и герметизированных распределительных устройств.

Характерной особенностью электроотрицательных газов (элегаза, воздуха) под давлением является наличие максимума в зависимости пробивного напряжения промежутков с резконеоднородным полем от давления. Такое явление наблюдается при переменном напряжении, а также при постоянном напряжении и положительной полярности электрода с высокой кривизной поверхности. При импульсных напряжениях максимум выражен слабо. Объясняется это возникновением вблизи электрода с большой кривизной в результате ионизации положительного объемного заряда. Диффузия этого заряда затруднена из-за повышения давления, и он как бы увеличивает радиус кривизны электрода, выравнивая электрическое поле, вследствие чего пробивное напряжение повышается. При дальнейшем росте давления после значения, соответствующего максимуму $U_{пр}$, вследствие увеличивающегося поглощения фотонов и усиления фотоионизации изменяется механизм разряда: из лавинного он становится стримерным, и пробивное напряжение достаточно резко снижается.

Напряжение начала короны, кВ, в элегазовых промежутках, образующих однородное поле, рассчитывается по формуле

$$U_k = 89,3 \delta L + 0,71, \quad (2.14)$$

где L – длина промежутка, см; δ - относительная плотность элегаза.

Для цилиндрических электродов, образующих коаксиальную систему, напряженность начала короны, кВ/см, определяется по выражению

$$E_k = 89,3\delta \left[1 + \frac{0,135}{(r\delta)^{0,48}} \right], \quad (2.15)$$

где r – радиус внутреннего электрода, см.

Напряжение начала короны рассчитывается по формуле

$$U_k = \frac{E_k L}{k_n}, \quad (2.16)$$

где k_n – коэффициент неоднородности электрического поля.

Приведенные формулы справедливы для гладких электродов. В реальных конструкциях на поверхности электродов всегда имеются микроскопические выступы (шероховатости) и осевшие частицы. Напряженность электрического поля у выступов возрастает, что приводит к снижению U_k . Оценка напряжения начала короны производится в таких случаях по экспериментальным данным.

При увеличении площади поверхности электрода вероятность зажигания разряда возрастает. Если среднее значение напряженности зажигания разряда на электроде площадью S равно E_{cpS} , то для такого же электрода с большей площадью S_1 среднее значение напряженности может быть определено как

$$E_{cpS1} = E_{cpS} - \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sigma \ln \frac{S_1}{S}. \quad (2.17)$$

Уменьшение E_{cp} с ростом площади электрода связано в первую очередь с ростом вероятности появления высоких выступов или оседания больших, частиц на его поверхности. Однако соответствии с законами теории вероятности E_{cp} должно уменьшаться с ростом площади и в случае гладких электродов.

Жесткость изоляционной конструкции с газом придают вставки, распорки и другие элементы, выполненные из твердых диэлектриков. Электрическая прочность такой комбинированной изоляции определяется напряжением перекрытия по поверхности твердого диэлектрика. Основными причинами снижения разрядных напряжений по сравнению с чисто элегазовым промежутком являются плохой контакт изолятора с электродами и большая нормальная составляющая напряженности электрического поля на по-

верхности твердого диэлектрика. Если исключить плохие контакты и выровнять поле, придав изолятору соответствующую форму или использовав внутренний экран, то удастся в некоторых случаях получить разрядные напряжения по поверхности изолятора, близкие по значениям к пробивному напряжению чисто элегазового промежутка.

Промежутки, для которых произведение давления газа на межэлектродное расстояние лежит в пределах $0,01 — 0,20$ кПа·см, считаются в а к у у м н ы м и промежутками. Возникновение разряда в них определяется практически только процессами на электродах. В ряде случаев электрическая прочность вакуумной изоляции может быть выше, чем газовой изоляции (порядка 30 кВ/см).

Различают три вида нарушения электрической прочности вакуумной изоляции: во-первых, появление более или менее стабильных токов с плотностью $10^{-4} — 10^{-3}$ А/см², резко зависящих от приложенного к электродам напряжения. Эти токи называются предпробивными; во-вторых, возникновение периодически повторяющихся самогасящихся маломощных импульсов тока силой $10^{-4} — 10^{-3}$ А и длительностью $10^{-4} — 10^{-3}$ с с частотой повторения от долей до десятков и сотен герц; в-третьих, возникновение пробоя всего изоляционного промежутка. Пробой характеризуется резким спадом напряжения между электродами и образованием дуги.

Под нарушением электрической прочности вакуумной изоляции понимают те явления, которые ограничивают подъем напряжения на электродах в данной конкретной установке. В одном случае это пробой при быстром подъеме напряжения, в других — возникновение изредка импульсов тока при длительном приложении напряжения или появление предпробивных токов. Таким образом, в зависимости от требований, предъявляемых к вакуумной изоляции, в понятие электрической прочности может вкладываться разный смысл.

Отличительной чертой вакуумной изоляции являются очень большие разбросы пробивных напряжений и напряжений появления предпробивных и импульсных токов (измеренные значения могут отличаться друг от друга в $1,5—3,0$ раза), что объясняется особенностями микроструктуры поверхности электродов и их чистотой (адсорбционные и окисные пленки). Характеристики поверхности зависят от материала и чистоты обработки электродов и могут изменяться при воздействии разрядов.

Уменьшить разброс пробивных напряжений удастся с помощью тренировки электродов, представляющей собой серию пробоев вакуумного промежутка до установления стабильного напряжения. При пробоях вакуумного промежутка происходят нагрев электродов и испарение их поверхности. В результате этого поверхность электродов становится более гладкой и очищается от посторонних веществ, что и приводит к повышению и стабилизации пробивного напряжения.

В установках с вакуумной изоляцией, так же как и с газовой, электрическая прочность промежутка очень часто определяется разрядным напряжением по поверхности твердых изоляторов, которые применяются для крепления различных узлов установки. Для повышения и стабилизации разрядного напряжения по поверхности твердого диэлектрика также проводят тренировку, которая представляет собой выдержку промежутка под напряжением.

Вакуумная изоляция используется в установках и приборах, где вакуум является рабочей средой. Это — ускорители, космические двигатели, электростатические сепараторы, электровакуумные приборы. Вакуумная изоляция применяется также в конденсаторах на 20 — 50 кВ, в выключателях, вакуумных разрядниках и реле. Использование вакуумной изоляции в выключателях представляет интерес благодаря быстрому восстановлению электрической прочности промежутка после пробоя (10^{-3} — 10^{-4} с); применение вакуумной изоляции в искровых реле позволяет получать хорошие временные характеристики реле: нестабильность времени срабатывания меньше 10 нс.

Недостатком вакуумной изоляции являются конструктивные сложности получения высокого вакуума и сложная технологическая обработка токоведущих частей.

Раздел 3. Испытательные установки и измерения высоких напряжений

Глава 1. Испытательные установки высокого напряжения

Термин “испытательное напряжение” имеет узкий смысл, ограниченный специальной областью техники высоких напряжений, связанной с разработкой и электрическими испытаниями электротехнического оборудования ЛЭП и его элементов. Так как в этой области встречаются предельно высокие (до нескольких мегавольт) напряжения, как стационарные (постоянные и переменные напряжения), так и чрезвычайно кратковременные (импульсы нано- и микросекундного диапазонов).

Для большинства видов изоляции разрядное напряжение зависит от наибольшего мгновенного значения приложенного напряжения U_m , а значение испытательного напряжения равно $U_m/\sqrt{2}$.

Требуемое испытательное переменное напряжение определяется главным образом теми электрическими воздействиями, которые испытывает аппарат при работе в сети. С помощью кратковременных испытательных воздействий должно быть получено подтверждение, способен ли аппарат выдержать длительные воздействия при эксплуатации в течение десятков лет, а также временно возникающие перенапряжения. Так как большинство применяемых жидких и твердых изоляционных материалов в большей или меньшей степени стареет и их электрическая прочность снижается со временем, то испытательное напряжение должно быть существенно больше, чем рабочее. При разработке изоляции нового электрооборудования испытания проводятся еще большими напряжениями, чтобы оценить степень надежности изоляции.

Для этого в лабораториях имеются специальные испытательные трансформаторы, номинальное напряжение которых в 2 - 5 раз (в зависимости от вида оборудования и класса напряжения) превышает рабочее напряжение трехфазных линий электропередачи.

§1.1. Испытательные трансформаторы

Номинальное напряжение трансформатора U_n однозначно определяется его назначением, а номинальная мощность P за исключением редких случаев

определяется емкостной нагрузкой, так как испытываемая изоляция обладает не большими диэлектрическими потерями. Поэтому типовая (номинальная) мощность пропорциональна емкостной реактивной мощности.

$$P_n = k U_n^2 \omega C_p, \quad (3.1)$$

где C_p – наибольшая емкость испытываемых объектов; k – коэффициент пропорциональности, учитывающий: а) разброс емкости объектов испытаний; б) емкость соединительных проводов, связывающих трансформатор и объект, и экранирующих электродов может оказаться большой в случае, если при напряжении в несколько сотен киловольт требуется обеспечить отсутствие частичных разрядов (ЧР) во всем испытательном контуре; в) дополнительную нагрузку, которую создают измерительного устройства на стороне высокого напряжения, например измерительные шаровые разрядники и емкостные трансформаторы напряжения.

Так как пробой изоляции в большинстве случаев происходит в момент достижения напряжением максимального значения U_m , а из-за емкостного характера нагрузки фазовый угол между напряжением и током близок к $\pi/2$, то мгновенное значение тока в момент пробоя (КЗ) трансформатора очень мало.

Испытательный трансформатор из-за своей высокой индуктивности рассеяния L_σ не в состоянии за короткое время обеспечить номинальный ток через пробитый объект. Большая часть необходимой для пробоя энергии поступает от емкости, включенной на стороне высокого напряжения, т.е. C_p и другого оборудования. Если же для завершения пробоя потребуется больше энергии, то напряжение резко понижается, что сказывается на процессе пробоя. Типичным случаем аналогичного взаимного влияния процесса пробоя и мощности источника является случай испытаний загрязненных изоляторов, когда при пробое по загрязненной поверхности проходят нелинейные токи порядка нескольких ампер. Чтобы это не влияло на процесс пробоя, напряжение источника не должно упасть больше чем на 5 % или ток короткого замыкания всего устройства не должен быть ниже определенного значения в зависимости от соотношения общих активных и реактивных сопротивлений испытательного контура и испытательного напряжения. Поэтому при испытаниях загрязненной изоляции необходимо выбирать трансформатор большей мощности.

Испытательные трансформаторы редко работают в длительном режиме, при котором существуют границы допустимой нагрузки по условиям нагрева обмоток возбуждения или низкого напряжения. Параметры обмоток высоких

напряжений определяется по соображениям механической прочности, и они обычно нагреваются незначительно.

На испытательные трансформаторы не воздействуют внешние перенапряжения, поэтому изоляция испытательных трансформаторов испытывается в течение одной минуты напряжением в 1,2 – 1,3 раза превышающим номинальное.

Испытательные трансформаторы выполняются всегда однофазными, от них получают высокое напряжение относительно земли.

Особенности схем и конструкций трансформаторов обусловлены тем, что из экономических соображений целесообразно выполнять обмотку высокого напряжения в виде единой катушки лишь при напряжении до нескольких сотен киловольт. При больших напряжениях выполняется несколько секций обмотки, и общие изоляционные проблемы решаются путем обеспечения изоляции отдельных секций.

§1.2. Генераторы импульсных напряжений и токов

На оборудование линий электропередач высоких напряжений воздействуют, кроме рабочего, также кратковременные напряжения, возникающие либо в результате коммутации, либо за счет воздействия молнии. Эти импульсные напряжения по амплитуде намного превышают наибольшее рабочее напряжение, и поэтому их называют перенапряжениями и разделяют на грозовые и коммутационные в соответствии с причиной их возникновения. Перенапряжения длительностью менее 1 мс воздействуют на изоляцию, и в большинстве случаев именно они определяют уровень изоляции электрооборудования. Изоляция оборудования высокого напряжения подвергается испытаниям кратковременным напряжением, которое имитирует возникающие при эксплуатации перенапряжения. Испытания производятся после изготовления типового образца, а также частично и выпускаемой продукции.

Грозовые перенапряжения определяются как током молнии, имеющим большой статистический разброс, так и процессами отражений и затуханий волн в линиях. Коммутационные перенапряжения, их изменение во времени зависят от структуры сети и вида коммутации. Если нужно провести качест-

венное испытание изоляции, то необходимо воспроизвести нормированное изменение во времени испытательного напряжения.

Формы импульса должна быть относительно простой, чтобы ее можно было воспроизводить при очень высоких напряжениях с приемлемыми затратами на испытательное оборудование. Импульсы сравнительно простой формы, используемые для испытания на электрическую прочность изоляции, называются испытательными импульсами. Они делятся на грозовые для имитации грозовых перенапряжений и коммутационные, воспроизводящие напряжения, возникающие при коммутациях.

1.2.1. Генераторы импульсных напряжений

Рассматривая оба импульса напряжений – грозовой и коммутационный, можно установить, что они воспроизводятся наложением двух затухающих экспоненциальных функций разных полярностей. Это означает, что схема для получения этих импульсов должна содержать, по крайней мере, два накопителя энергии, чтобы обеспечить требуемую двухэкспоненциальную форму кривой. Так как индуктивный накопитель с большой накапливаемой энергией не пригоден для быстрого разряда в микросекундном диапазоне, а испытуемый объект чаще всего представляет собой емкостную нагрузку, в качестве генераторов используются схемы с емкостным накопителем энергии, а индуктивностью в схемах генератора пренебрегают, так как она мала вследствие конструктивных решений.

Для получения очень высоких напряжений используются, как правило, многоступенчатые схемы.

Схема одноступенчатого генератора импульсных напряжений. При напряжении меньше 100 кВ применяются схемы, приведенные на рис. 3.1. Накопительный конденсатор C_s медленно, за время > 5 с, заряжается от любого источника до U_0 и затем через коммутатор SF разряжается на емкость нагрузки C_b . Сопротивления R_d и R_e служат для получения требуемой формы импульса. При $U_0 > 10$ кВ в качестве коммутатора SF может быть использован простейший шаровой разрядник, работающий в атмосферном воздухе и срабатывающий без дополнительной системы управления при малых разбросах напряжения пробоя. Уровень требуемого напряжения регулируется расстоянием S между шарами. Время коммутационного точного простейшего шарового проме-

жутка при больших напряжениях меньше 0,1 мкс, и поэтому процесс коммутации незначительно влияет на изменение $u(t)$. Сам элемент SF можно рассматривать как идеальный коммутатор при получении грозовых импульсов (малое падение напряжения в проводящем состоянии).

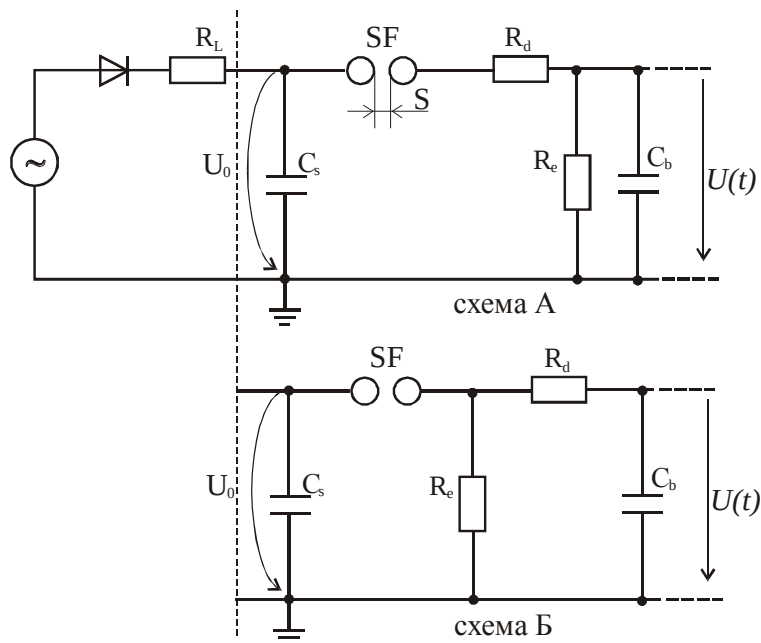


Рис. 3.1. Схемы одноступенчатого генератора импульсных напряжений

Следует отметить, что в качестве коммутаторов применяются также разрядники с регулируемым давлением газа, в которых используется закон пробоя, для регулирования напряжения пробоя, а также разрядники с системой управления.

Нагрузка C_b состоит, прежде всего, из емкостей испытуемого объекта C_p , включенной параллельно ему измерительной аппаратуры C_m и всех соединительных проводов на стороне высокого напряжения C_L . При компактном исполнении испытательной схемы величиной C_L можно пренебречь. Так как параметры этих емкостей могут изменяться достаточно широко, то предусматривается еще один элемент схемы – дополнительный конденсатор C_{bd} высокого напряжения емкостью от 0,5 до 2 нФ. Поэтому отпадает необходимость в замене резисторов R_d и R_e при изменении емкости нагрузки (C_p , C_m , C_L) и получении нормированной формы импульса. Таким образом, емкость нагрузки $C_b = C_{bd} + C_p + C_m + C_L$ должна заряжаться через демпферное сопротивление R_d .

Принцип работы. Малая длительность фронта T_1 импульса $u(t)$ может быть обеспечена за счет сопротивления R_d , а требуемая длительность импульса T_2 получается за счет медленного разряда емкостей через сопротивление R_e .

Максимальное значение выходного напряжения регулируется за счет напряжения пробоя коммутатора SF. В простых разрядниках, работающих в атмосферном воздухе и пробивающихся при зарядном напряжении, равном пробивному, необходима бесступенчатая регулировка расстояния между электродами. Если используются управляемые разрядники, то нужно измерять зарядное напряжение U_0 и по достижении требуемого значения напряжения подавать сигнал на запуск разрядников. При необходимости работы генератора в режиме повторяющихся импульсов с постоянной амплитудой нельзя воспользоваться напряжением пробоя разрядников, так как на его значение влияют предшествующие разряды. В этом случае следует поддерживать постоянное время зарядки емкости C_S .

Важнейшей характеристикой генератора является накопленная в конденсаторе C_S энергия, кДж, при максимальном рабочем напряжении U_0 :

$$W = \frac{1}{2} C_S U_0^2. \quad (3.2)$$

Энергия W определяет также и стоимость генератора. При напряжении больше 250 - 300 кВ одноступенчатые схемы не применяются, так как затраты на создание источника высокого зарядного напряжения оказываются чрезмерно большими, а значительные размеры элементов приводят к большим габаритным размерам генератора.

Компактные и экономичные конструкции можно получить, используя схему умножения напряжения.

1.2.2. Генераторы импульсных токов

Разряд осуществляется с помощью быстродействующего, как правило, управляемого коммутатора SF. Так как необходимо коммутировать токи до 100 кА и больше, в качестве коммутаторов используются в основном тригатроны. Ток $i(t)$ измеряется с помощью низкоомного шунта, сопротивление которого $R_s \ll R$.

Объектом R часто является низкоомный элемент (искровой канал или плазма, металлические проводники), однако нельзя пренебрегать активным и индуктивным падениями напряжения на объекте. В связи с тем, что активное сопротивление часто является нелинейным, например у резистивных элементов вентильного разрядника, то U_0 необходимо выбирать достаточно большим, чтобы можно было поддерживать требуемую форму импульса тока. Индуктив-

ность L обычно представляет собой не специальную катушку, а сумму распределенных паразитных индуктивностей конденсаторов, соединительных проводов, резистора R и разрядника SF .

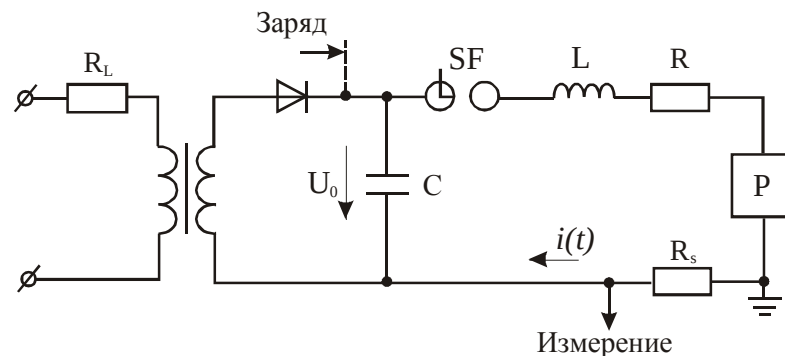


Рис. 3.2. Принципиальная схема генератора токов экспоненциальной формы

Считая параметры объекта P линейными, а L и R суммарными индуктивностью и сопротивлением всех элементов разрядного контура, может быть записано интегродифференциальное уравнение тока разряда $i(t)$ для RLC-контура в виде

$$\frac{1}{C} \int i dt + L \frac{di}{dt} + Ri = U_0. \quad (3.3)$$

Решение этого уравнения характеризует колебательное ($0 < R < R_{кр}$) и апериодическое ($R > R_{кр}$) изменения тока во времени, при чем при $R = R_{кр}$ имеет место критический режим.

Для измерений на высоком напряжении необходимо разрабатывать специальные методы измерений, сильно отличающиеся от традиционных методов электрических измерений.

Глава 2. Измерения на высоком напряжении. Электростатические киловольтметры. Измерение максимальных значений напряжения с помощью шаровых разрядников. Измерение напряжения с помощью делителей

§2.1. Электростатические вольтметры

Если между поверхностями металлических электродов идеального плоского конденсатора с помощью электродов A и расстояниями между ними x соз-

дано электрическое поле напряженностью E , то на электроды действует притягивающая сила F . Ее значение рассчитывается из условия стремления системы к минимуму накопленной электрической энергии $W = \varepsilon A E^2 x / 2$:

$$F(x) = -\frac{dW}{dx} = \frac{1}{2} \varepsilon E^2(x) A. \quad (3.4)$$

Эта сила создает давление $F(x)/A$, действующее на любой элемент поверхности электрода, даже если напряженность поля на поверхности электрода неодинакова. Уравнение (3.4) подсказывает принцип измерения напряженности поля путем регистрации силового действия поля. Однако в электростатическом вольтметре напряженность поля обусловлена приложенным напряжением и электродной системой, и в случае плоского конденсатора можно записать уравнение

$$U = Ex; \quad \frac{F(x)}{A} = \frac{1}{2} \varepsilon \frac{U^2}{x^2}. \quad (3.5)$$

Таким образом, сила пропорциональна квадрату напряжения или напряженности. Следовательно, электростатическими вольтметрами можно измерять постоянное напряжение или эффективное значение переменного напряжения, если сила усредняется во времени. Верхняя частота не ограничивается в случае, когда поле между электродами остается квазиэлектростатическим. Если сила измеряется без перемещения, то от источника измеряемого напряжения мощность не отнимается. Так как практически во всех конструкциях измерительный электрод перемещается на очень небольшое расстояние, а общая накопленная энергия W невелика, то эти приборы практически не потребляют активной мощности, если пренебречь током утечки изоляции.

Электростатические вольтметры разнообразны по конструктивному выполнению.

Для диапазона среднего напряжения (от 10 до 100 кВ) имеются относительно дешевые конструкции электростатических киловольтметров, применяемые в тех случаях, когда недопустимо подключение устройств, потребляющих мощность, при этом предпочтительной является электродная система с плоскими закругленными на краях электродами, в которой можно осуществлять изменение диапазона измеренных напряжений путем изменения расстояния между электродами. Собственно измерительная система и система отсчета на шкале прибора сильно различаются. Известный вольтметр Штырке-Шрёдера

содержит металлическую пластинку, закрепленную на эксцентричной подвеске.

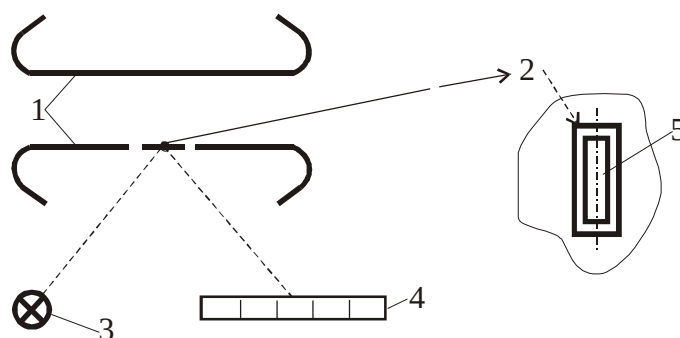


Рис. 3.3. Устройство вольтметра Штырке-Шрёдера:

1 - электроды с профилем Роговского; 2 – вырез на электроде; 3 – источник света; 4 – шкала; 5 – эксцентрично расположенная пластинка с возвратной пружиной

При напряжении больше 100 кВ размеры электродов, работающих в воздухе, становятся очень большими. Если в качестве рабочей среды иметь элегаз под давлением $5 \cdot 10^5$ Па, то эффективное значение рабочей напряженности составит 100 кВ/см, тогда с приемлемыми затратами могут быть изготовлены приборы для измерения постоянного и переменного напряжения до 1000 кВ с высокой точностью (погрешность равна 0,1 %). Так как в настоящее время возможны абсолютные, точные измерения силы с помощью балансирных весов с привлечением оптических или оптоэлектронных методов и измерение напряжения в электродной системе сводится к изменению силы и перемещения, то можно говорить об абсолютном изменении напряжения.

§2.2. Измерительные разрядники

Из теории газового разряда следует, что в атмосферном воздухе промежуток между двумя электродами теряет свои изоляционные свойства в определенных условиях при хорошо воспроизводимом значении разрядного напряжения. Если использовать этот эффект для целей измерения напряжения, то очевиден его существенный недостаток: невозможно непрерывно измерять напряжение, а только в момент пробоя, соответствующий КЗ источника, поэтому можно только установить, как велико было напряжение к этому моменту.

Условия, при которых достигается хорошая и достаточно точная воспроизводимость разряда, определяются в первую очередь конфигурацией электро-

дов и их пригодностью для измерений определенного вида напряжения. Из теории газового разряда следует, что стримерный разряд наступает при давлениях воздуха с его обычными атмосферными колебаниями лишь в однородном или квазиоднородном поле. Этот вид разряда обладает малым временем формирования канала, а стримерному критерию пробоя соответствует строго определенная напряженность поля. Если еще позаботиться о том, чтобы разброс статистического времени был мал, то промежутки с однородным и квазиоднородным полями будут пробиваться за очень небольшое время при достижении напряжением максимального значения. Таким промежутком является, например, промежуток между сферическими электродами, если расстояние между ними гораздо меньше диаметра шаров. Шаровые разрядники, называемые также измерительными разрядниками, используются очень широко для измерений максимального значения напряжения. Этот вид измерительных разрядников являются очень надежными приборами для измерений постоянного напряжения, а также максимального значения переменного, импульсного, в том числе грозового полного и срезанного, напряжений.

На величину напряжения пробоя влияют напряженность поля $E(x)$ и ее изменение вдоль кратчайшей силовой линии, а также физические характеристики газа, от которых зависит электрическая прочность газа. Напряженность E_d , при которой происходит пробой, зависит прежде всего от геометрии размеров и расположения сферических электродов и металлических элементов, необходимых для их механического крепления. Два измерительных шара могут быть установлены по вертикальной или горизонтальной оси. Шаровой разрядник не является измерительным прибором с указателем. Он позволяет лишь установить, что измеряемое напряжение в момент пробоя достигает заранее известного значения.

§2.3. Делители для измерений высоких постоянных, переменных и импульсных напряжений

В конструкции делителей напряжения общим является размещение рабочих элементов в цилиндре из качественного изоляционного материала сравнительно небольшого диаметра. Часто используемое заполнение цилиндра маслом обеспечивает изоляцию между элементами, теплоотвод и устраняет разря-

ды по поверхности элементов, которые возникают на стороне высокого потенциала при большой напряженности поля.

Масло частично можно заменить газом с высокой электрической прочностью, например элегазом под давлением. При воздушной изоляции входной электрод высокого напряжения делителя, как правило, должен быть выполнен так, чтобы на нем не было частичных разрядов (ЧР). Общая высота делителя определяется необходимой внешней изоляцией, т. е. электрической прочностью окружающего делитель воздуха. Хотя эту высоту можно существенно уменьшить за счет оптимизации формы и размеров электродов, все же средние напряженности выбираются не очень высокими, чтобы учесть специфические изоляционные проблемы, известные из теории разрядов в газах при различных видах воздействующего напряжения (зарядка поверхности изоляции при постоянном напряжении, особенности развития лидеров при коммутационных напряжениях). Обычно удельные высоты делителей выбираются следующими: 2,5 - 3 м/МВ при постоянном напряжении; 2 - 2,5 м/МВ при грозовых импульсах; 4 - 6 м/МВ при коммутационных импульсах; 4 - 5 м/МВ (эффективное значение) при переменном напряжении. Если напряжение составляет несколько сотен киловольт, проблема выбора размеров делителя обычно не возникает, так как требуемая площадь еще невелика. В области ультравысоких напряжений сильная нелинейная зависимость разрядного напряжения от расстояния между электродами приводит к очень большим размерам делителей.

Делитель напряжения представляет собой не обязательно специальное устройство. В установках постоянного напряжения, если это возможно, делитель встраивается непосредственно в генератор. Его также можно объединить с объектом испытаний, например, вводом высокого напряжения с конденсаторными обкладками.

Делитель напряжения с тщательно выбранными параметрами представляет собой линейный пассивный четырехполюсник.

Если рассматривать кратко представленные делители, то для них можно составить общую схему замещения (рис. 3.4). Она состоит из большого числа n последовательно включенных элементов – продольных сопротивлений Z_e , представляющих собой прежде всего наиболее важные детали делителя (резисторы, конденсаторы), к которым приложено высокое напряжение. В схеме учтены также паразитные параметры продольных элементов. По цепочке про-

дольного сопротивления равномерно распределены поперечные сопротивления Z'_{-q} , учитывающие только влияние электрического поля продольных элементов, находящихся под разными потенциалами. Выходное напряжение U_2 , которое много меньше входного напряжения, снимается с последнего элемента этой схемы. Следовательно, число элементов определяет и коэффициент деления N . Однако если рассматривать измерительную систему в целом, то n и N могут различаться, так как в схеме могут содержаться и другие элементы.

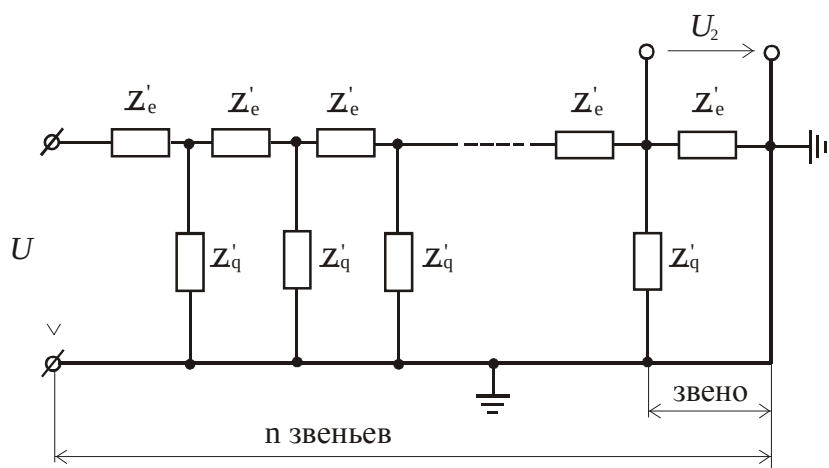


Рис. 3.4. Цепочечная схема однородного делителя напряжения

Как правило, делитель высокого напряжения (ДВН) конструктивно не совмещается с источником напряжения или объектом испытания и представляет собой отдельный прибор. В этом случае необходимо прежде всего учитывать взаимные электрические и магнитные связи, если элементы делителя не экранированы, так как экранирование часто осуществить невозможно. Делитель обычно состоит из нескольких соединенных между собой элементов, не имеющих электрических или магнитных экранов. Эти элементы на входе делителя, находящиеся под высоким потенциалом и на выходе имеющие потенциал, близкий к потенциалу земли, пространственно удалены друг от друга. Поэтому окружающее делитель пространство, такое же большое, как и в случае шарового разрядника, не должно содержать посторонних предметов. Делитель или устанавливают достаточно далеко как от источника напряжения, так и от испытуемого объекта (как правило, это расстояние равно высоте делителя), или же их так ориентируют относительно друг друга, чтобы связь между ними была слабой (например, делитель подвешивают над объектом испытания).

При использовании делителей, как и в обычных измерительных схемах, необходимы металлические соединения, изолированные на соответствующее напряжение между делителем и точкой измерения напряжения.

Тщательное экранирование участков схемы с выходным напряжением (в большинстве случаев не больше 1000 В) выполнить несложно. Такое экранирование, безусловно, необходимо, так как на эти участки воздействуют электромагнитные поля, создаваемые всеми элементами, находящимися под высоким напряжением. Измерительная схема с делителем напряжения в импульсной измерительной цепи изображена на рис. 3.5.

Измерительный контур является передаточной системой, состоящей из нескольких компонентов, которые нельзя не учитывать. При измерениях постоянного напряжения влияние соединительных проводов на сторонах высокого 4 и низкого 6 напряжений отсутствует. В случае измерения низкочастотных переменных напряжений емкость измерительного кабеля 6 может сказаться на значении коэффициента деления N . В обоих случаях плечо низкого напряжения располагается у измерительного прибора 7.

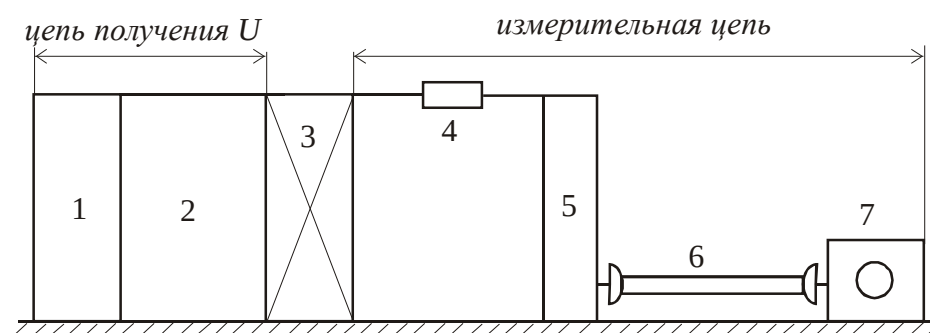


Рис. 3.5. Делитель напряжения в импульсной измерительной цепи:

1 – генератор импульсных напряжений; 2 – соединительный провод; 3 – объект; 4 – соединительный провод с демпфирующим резистором; 5 – делитель напряжения; 6 – измерительный коаксиальный кабель; 7 – измерительный прибор низкого напряжения

При измерениях импульсных напряжений все элементы измерительного контура и их конструктивное выполнение в большей или меньшей степени влияют на передаточные свойства измерительной цепи. Саму цепочечную схему делителя необходимо дополнить другими элементами. Соединительный провод 4 желательно представить в виде линии.

Раздел 4. Линейная и станционная изоляция.

Профилактика изоляции установок высокого напряжения

Глава 1. Изоляторы высокого напряжения. Линейные изоляторы, станционно-аппаратные изоляторы

§1.1. Изоляторы высокого напряжения

Изоляторы представляют собой конструкции, которые используются для крепления токоведущих и других находящихся под напряжением частей электротехнических устройств (проводов воздушных линий электропередачи, шин распределительных устройств и т. д.), а также для перемещения подвижных контактов выключателей и иных коммутационных аппаратов.

В соответствии с выполняемыми функциями изоляторы должны прежде всего обладать достаточной механической прочностью по отношению ко всем видам возможных эксплуатационных нагрузок: статическим, ударным и др. Особенность этого очевидного требования применительно к изоляторам установок высокого напряжения состоит в том, что механическая прочность должна обеспечиваться при воздействии сильных электрических полей. В таких условиях местные, небольшие повреждения, не влияющие на общую механическую прочность, могут иногда вызывать существенное снижение пробивного напряжения и приводить к преждевременному выходу изолятора из строя.

Изоляторы как самостоятельные конструкции имеют свою внутреннюю и внешнюю изоляцию. В этом разделе будут рассмотрены изоляторы с относительно простой внутренней изоляцией, выполняемой из одного изоляционного материала - электротехнического фарфора или из специальных сортов стекла. Электрическая прочность такой изоляции обеспечивается путем выбора соответствующей толщины фарфора или стекла, иногда с использованием некоторых средств для регулирования электрических полей.

При длительном воздействии сильных электрических полей у многих видов внутренней изоляции наблюдается постепенное ухудшение характеристик - электрическое старение, причиной которого являются частичные разряды, например, в небольших газовых включениях. Однако фарфор и стекло обладают такой высокой стойкостью к частичным разрядам, что они практически не подвержены электрическому старению. Это обстоятельство упрощает конструиро-

вание внутренней изоляции фарфоровых и стеклянных изоляторов, так как освобождает от необходимости учитывать сложные процессы, определяющие длительную электрическую прочность изоляции.

Следует отметить, что во всех случаях внутренняя изоляция, которая при пробое разрушается необратимо, выполняется несколько более прочной, чем изоляция внешняя. Поэтому разрядные характеристики изоляторов определяются электрической прочностью их внешней изоляции.

В наиболее сложных условиях находится внешняя изоляция изоляторов наружной установки, поверхности которых могут загрязняться и увлажняться дождем или другими мокрыми осадками. Чтобы обеспечить высокие значения разрядных напряжений при относительно небольших габаритных размерах, изоляторы наружной установки выполняют с сильно развитыми поверхностями, т. е. с ребрами или юбками. Число, форма и размеры ребер или юбок - основные конструктивные параметры изоляторов, от которых зависят их эксплуатационные характеристики.

Ребра и юбки увеличивают полную длину утечки по поверхности, от которой наиболее сильно зависит разрядное напряжение при дожде и загрязнении. Кроме того, при некоторых видах мокрых осадков нижние поверхности ребер и юбок смачиваются в меньшей степени, и это значительно увеличивает полное сопротивление утечки. При правильно выбранных размерах и форме ребра разряд, развивающийся вдоль изолятора, отрывается от его поверхности. В этом случае участки вдоль поверхности изолятора чередуются с чисто воздушными промежутками, и разрядное напряжение оказывается более высоким. Однако с увеличением числа и размеров ребер растет не только полная длина утечки по поверхности, но и эквивалентный диаметр $D_э$, что отрицательно влияет на разрядное напряжение.

От формы изолятора в сильной степени зависит интенсивность его загрязнения в условиях эксплуатации. Дело в том, что отложение загрязнений происходит при ветре, а их количество на единицу площади прямо пропорционально градиенту скорости потока воздуха у поверхности. При усложнении формы изолятора около него могут возникать завихрения в потоке воздуха и соответственно возрастать интенсивность загрязнения. Кроме того, форма изолятора влияет на эффективность самоочистки поверхностей при дожде и ветре. При выборе формы изоляторов учитывают все эти соображения, а также требования, связанные с удобством массового производства.

Требования к электрической прочности изоляторов для установок разных классов напряжения определяют значения испытательных напряжений, которые устанавливаются с учетом уровня ожидаемых перенапряжений и возможных изменений метеоусловий. Испытательные напряжения и методы проведения испытаний регламентированы ГОСТ, которым для отдельных изоляторов и внешней изоляции оборудования предусмотрены испытания при сухих и чистых поверхностях напряжением частотой 50 Гц, полным и срезанным импульсами, а при искусственном дожде - напряжением частотой 50 Гц.

При испытаниях напряжением промышленной частоты прикладываемое напряжение плавно повышается до установленного стандартом значения, а затем без выдержки во времени плавно снижается. Импульсные испытания изоляторов проводятся по так называемому пятиударному методу: изоляторы должны выдержать при каждой полярности пять раз полный импульс 1,2/50 мкс и пять раз импульс, срезанный при времени, составляющим не менее 2 мкс. Параметры искусственного дождя должны быть следующими: сила дождя - $3 \pm 0,3$ мм/мин, удельное сопротивление воды - 100 ± 5 Ом·м (измеренное при температуре 20° С), угол падения капель - около 45° к горизонтали.

§1.2. Линейные изоляторы

Изоляторы, применяемые для крепления проводов воздушных линий электропередачи, делятся по своей конструкции на штыревые, подобные опорным штыревым, и подвесные. Последние подразделяются на изоляторы тарельчатого типа и стержневые.

Линейные изоляторы испытывают механические нагрузки, которые создаются тяжением проводов и зависят от сечения проводов и длин пролетов между опорами, от температуры проводов, силы ветра и других факторов. Для штыревых линейных изоляторов эти нагрузки являются главным образом изгибающими. Подвесные изоляторы благодаря шарнирному креплению подвергаются только растягивающим усилиям.

Штыревые изоляторы. Провод крепится на верхней или боковой бороздке изолятора с помощью проволоочной вязки или специальных зажимов. Сам изолятор наворачивается на металлический штырь или крюк, закрепленный на опоре. Чтобы крюк не поворачивался в опоре при натяжении провода, ему

придается такая форма, что ось провода и ось ввертываемой в опору части крюка лежат в одной плоскости. При этом тяжение провода не создает вращающего момента относительно оси крюка.

Гнездо с резьбой для ввертывания штыря или крюка углублено в тело изолятора настолько, что верхняя часть штыря или крюка оказывается на уровне шейки изолятора. Этим достигается уменьшение изгибающего момента, действующего на тело изолятора. Механическая прочность штыревых изоляторов характеризуется минимальной разрушающей нагрузкой на изгиб.

При дожде внешняя часть поверхности изолятора оказывается полностью смоченной водой. Сухой остается лишь его нижняя поверхность, поэтому почти все напряжение оказывается приложенным между концом внешнего ребра и штырем. Вследствие этого, несмотря на значительное увеличение диаметра изолятора (он примерно на 35% больше высоты), мокроразрядное напряжение получается почти вдвое меньше, чем сухоразрядное.

Изоляторы типа ШФ20 на напряжение 20 кВ и ШФ35 на напряжение 35 кВ в целях получения необходимых электрической и механической прочностей выполняются из двух фарфоровых частей, склеиваемых цементным раствором. В настоящее время для замены этих изоляторов на действующих линиях выпускаются полимерные изоляторы типа ШПУ-20 и ШПУ-35 на 20кВ и 35 кВ рабочего напряжения. На вновь сооружаемых линиях рекомендуется применять изоляторы серии ОЛК (опорный, линейный, кремнийорганический). В изоляторах типа ОЛК применена специальная конструкция, предназначенная для крепления проводов ВЛЭП 10-20кВ на траверсе или бестраверсного крепление провода 10-20кВ к опоре. Расстояние между верхним оконцевателем с проводом и нижним штырем более 120мм. По этой причине изолятор практически не пробиваем внутри стеклопластикового композита имеющего электрическую прочность более 40кВ на 1см, в отличие от ранее применявшихся фарфоровых и стеклянных изоляторов со стенкой отделяющей заземленный штырь от провода 10-15мм. Возможность применения в труднодоступных районах (болота, тайга, горная местность) делают изоляторы незаменимыми для использования в нефтяной и газовой промышленности. В экстремальных ситуациях изоляторы в заводской упаковке могут доставляться к месту установки сбрасыванием с вертолетов с высоты до 15 метров. При обычной транспортировке полностью исключен бой данных изоляторов, в отличие от ранее применявшихся фарфоровых изоляторов ШФ-20. Малый вес и удобная упаковка по-

звolyют на месте монтажа перемещать необходимые количества изоляторов вручную без применения машин и техники.

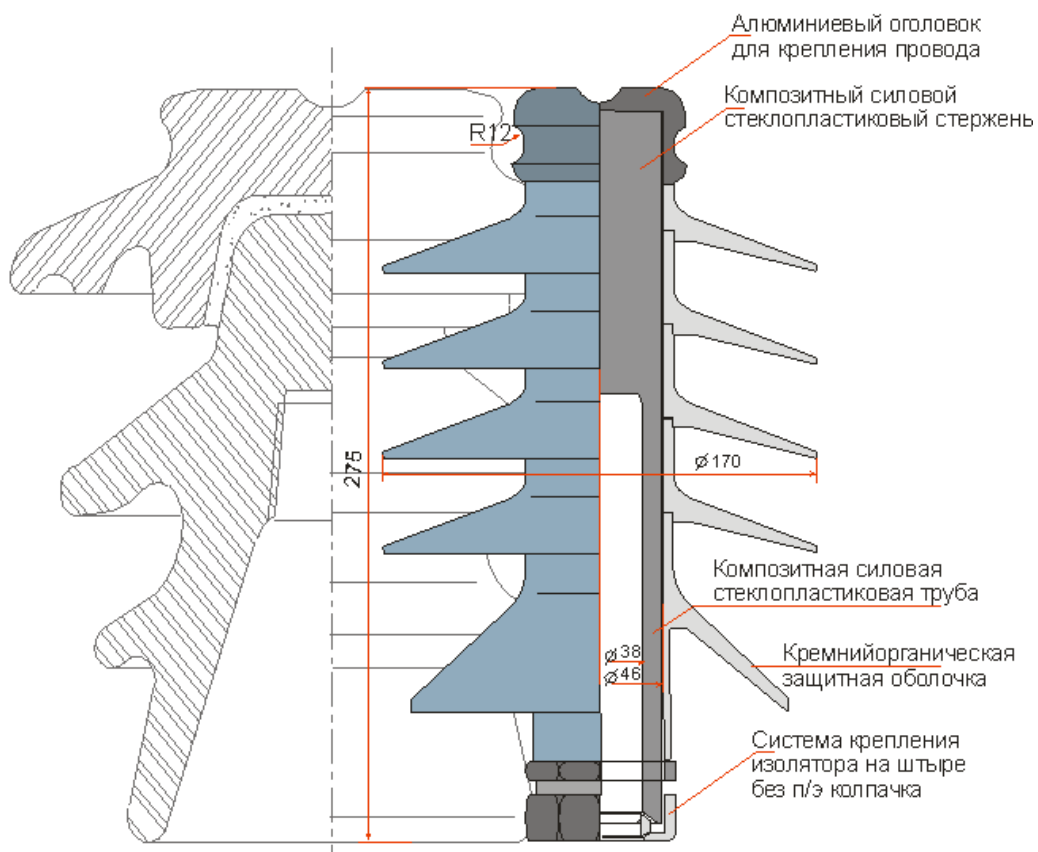


Рис. 4.1. Внешний вид изоляторов ШФ-35 и ШПУ-35

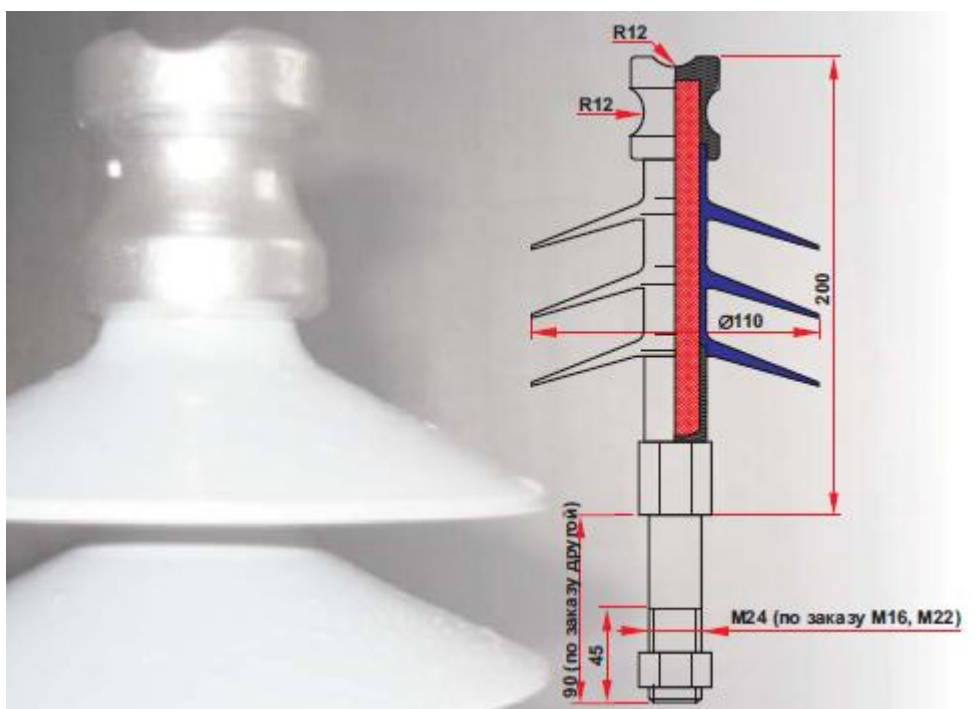


Рис. 4.2. Внешний вид линейных стержневых изоляторов ОЛК-4-20-А-3 УХЛ1

Подвесные изоляторы тарельчатого типа. На линиях 35 кВ и более высокого напряжения применяются преимущественно подвесные изоляторы тарельчатого типа. Путем последовательного соединения таких изоляторов можно получить гирлянды на любое номинальное напряжение. Применение на линиях разного класса напряжения гирлянд из изоляторов одного и того же типа значительно упрощает организацию их массового производства и эксплуатацию.

Как уже отмечалось, из-за шарнирного соединения изоляторы в гирлянде работают только на растяжение. Однако сами изоляторы сконструированы так, что внешнее растягивающее усилие вызывает в изоляционном теле в основном напряжения сжатия и среза. Тем самым используется весьма высокая прочность фарфора и стекла на сжатие.

Основу изолятора составляет фарфоровое или стеклянное тело - тарелка, средняя часть которой, вытянутая кверху, называется головкой. На головке крепится шапка из ковкого чугуна, а в гнездо, расположенное внутри головки, заделывается стальной стержень. Армирование изолятора, т.е. механическое соединение изоляционного тела с металлической арматурой, выполняется при помощи цемента.

Соединение изоляторов в гирлянду осуществляется путем введения утолщенной головки стержня в специальное ушко на шапке другого изолятора и закрепления его замком. Длина стержня делается минимальной, но достаточной для удобной сборки гирлянды.

Механическую нагрузку несут в основном головка изолятора и прежде всего ее боковые опорные части. Поэтому конструкции тарельчатых изоляторов различаются в первую очередь формой головки.

Изолятор с конической головкой. При приложении к такому изолятору растягивающей нагрузки, направленной вдоль оси изолятора, цементное тело конической формы, расположенное в гнезде головки, работает как клин, стремящийся расширить головку изолятора. Внешняя поверхность головки, имеющая форму конуса, также образует клин, который сжимается при вдавливании в цементную прослойку между шапкой и головкой. В результате фарфор в боковых стенках головки испытывает в основном напряжение сжатия.

Коэффициент температурного расширения у цемента выше, чем у фарфора. Поэтому во избежание опасных механических напряжений при изменениях температуры в головке не возникали опасные механические напряжения

предусмотрена возможность некоторого перемещения фарфора относительно цемента. С этой целью наружные и внутренние поверхности головки выполняются гладкими, глазурованными, благодаря чему цемент с ними не схватывается. Кроме того, для уменьшения силы трения между соприкасающимися поверхностями угол конусности головки делается достаточно большим (не менее $10—13^\circ$).

Недостатком изоляторов с конической головкой являются относительно большие размеры шапки, что неблагоприятно сказывается на разрядных характеристиках гирлянд. Помимо этого так называемая обратная конусность головки не позволяет изготавливать изоляторы высокопроизводительным методом штамповки.

Несколько меньше размеры шапки у изоляторов с цилиндрической головкой. Точнее, головка у этих изоляторов имеет небольшую прямую конусность, облегчающую процесс штамповки изоляционного тела. Для прочного закрепления шапки боковые поверхности головки покрывают фарфоровой крошкой, которая при обжиге прочно спекается с фарфором. Компенсация температурных деформаций и устранение механических напряжений, обусловленных различием коэффициентов температурного расширения фарфора и цемента, достигаются путем покрытия поверхности головки битумным составом.

Размеры и форма фарфоровой тарелки у изоляторов с конической и цилиндрической головками одинаковы. Верхняя гладкая поверхность тарелки наклонена под углом $5—10^\circ$ к горизонтали для обеспечения отекания дождевой воды. Край тарелки изогнут вниз и образует так называемую капельницу, не допускающую возникновения непрерывного потока воды с верхней поверхности изолятора на нижнюю. Нижняя поверхность тарелки сделана ребристой для увеличения длины утечки по поверхности и повышения мокроразрядного напряжения. Изоляторы, предназначенные для работы в загрязненных районах, имеют существенно более сложную форму.

Конструкция стеклянных изоляторов аналогична рассмотренным. В связи с тем, что коэффициенты температурного расширения стекла, цемента и арматуры приблизительно одинаковы, в стеклянных изоляторах отсутствует битумная промазка.

Важное достоинство изоляторов тарельчатого типа состоит в том, что при повреждении изоляционного тела, например в случае пробоя под шапкой, механическая прочность изолятора и, следовательно, всей гирлянды не нару-

шается. Благодаря этому пробой изолятора в гирлянде не приводит к падению провода на землю.

Проверка механической прочности тарельчатых изоляторов проводится при плавном увеличении механической нагрузки и одновременном воздействии напряжения, составляющего 75—80% сухоразрядного. При этом механические повреждения изоляционного тела под шапкой обнаруживаются по электрическому пробую. Величина механической нагрузки, повреждающей изолятор при таком испытании, называется электромеханической прочностью изолятора. Эта характеристика указывается в обозначении изолятора. Например, ПФ6 — подвесной фарфоровый с электромеханической прочностью 60 кН; ПС 16 — подвесной стеклянный на 160 кН; ПСГ-22 — подвесной стеклянный для районов с загрязненной атмосферой на 220 кН. Подвесные изоляторы тарельчатого типа выпускаются с электромеханической прочностью от 60 до 400 кН.

Подвесные стержневые изоляторы представляют собой фарфоровый стержень с ребрами, армированный на концах двумя металлическими шапками при помощи цементного раствора. Для прочного соединения шапок с фарфором концы стержня, а также внутренние опорные поверхности шапок имеют коническую форму.

Диаметр фарфорового стержня выбирается в зависимости от требуемой механической прочности с учетом того, что фарфор при таких толщинах имеет прочность на растяжение 1300-1400 Н/см².

Применение стержневых изоляторов дает значительную экономию металла за счет уменьшения числа шапок, уменьшение массы и, главное, длины изоляционной конструкции, на которой крепится провод. Недостатками изоляторов этого типа являются возможность их полного разрушения и падения провода на землю или на заземленные конструкции. Ограничивает их применение также сравнительно невысокая механическая прочность.

Из-за большой длины пути утечки, а также относительно простой формы, обеспечивающей хорошую очистку поверхности дождем и ветром, стержневые изоляторы весьма перспективны для районов с загрязненной атмосферой. Изолятор с винтообразными ребрами хорошо очищается струей дождевой воды, стекающей по желобу, который образует ребро.

В настоящее время на замену фарфоровых изоляторов применяются подвесные полимерные изоляторы серии ЛК. Изоляторы изготавливаются из высокопрочного стеклопластикового стержня. Имеют гидрофобную, трекингостой-

кую кремнийорганическую оболочку. Оконцеватели изолятора защищены от коррозии цинком термодиффузионным методом на глубину до 80 мкм. Покрытие насыщает поверхностные слои стали цинком. Монолитность термодиффузионной защиты исключает отслоение покрытия при опрессовке оконцевателей на стержне, и создает защиту в 3 раза превосходящую гальваническое цинкование и в 1,5 раза превосходит покрытие нанесенное методом окунания в расплав цинка. Полимерные изоляторы ЛК имеют высокие электрические характеристики при высокой загрязненности поверхности, увеличенную длину пути утечки. Высоковольтные полимерные изоляторы выпускаются серийно на основе композиционных материалов: высокопрочного стеклопластикового стержня диаметром 16 мм, защитной оболочки из кремнийорганической резины обладающей повышенной гидрофобностью и трекингостойкостью из сырьевых материалов фирмы Dow Corning, Wacker, General Electric и др. Изоляторы обладают повышенной сейсмостойкостью и устойчивостью к актам вандализма. Изоляторы предназначены для изоляции и крепления токоведущих частей в электрических аппаратах, распределительных устройствах электрических станций и подстанций.

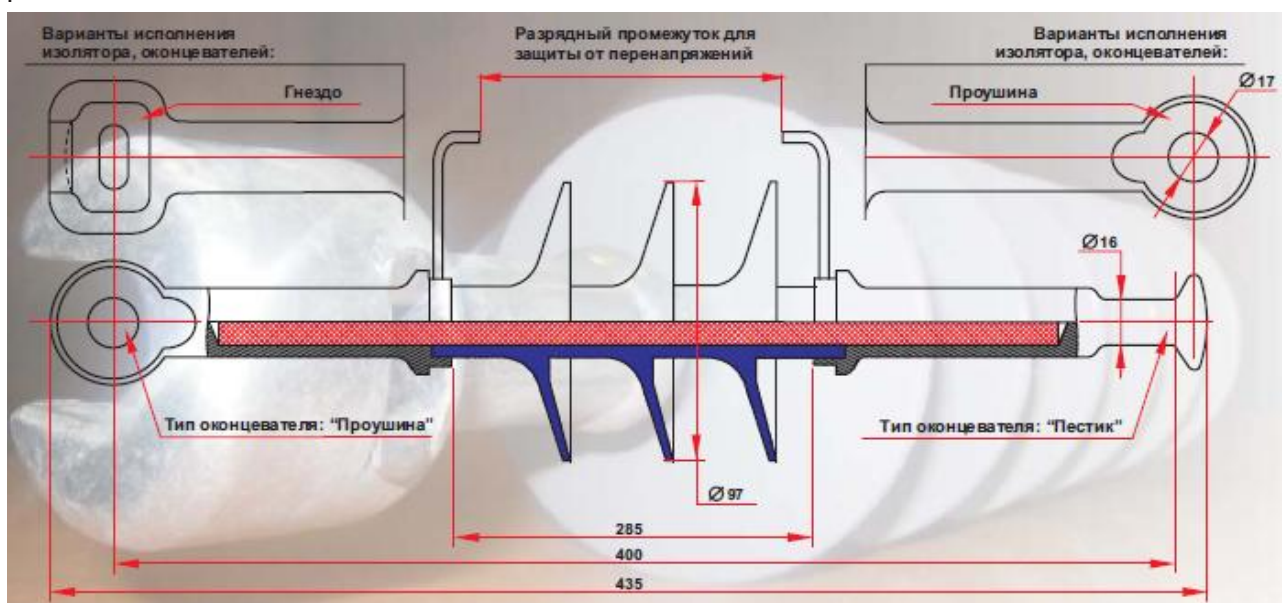


Рис. 4.3. Конструкция изолятора полимерного подвесного АМКА-70/10-4 УХЛ1

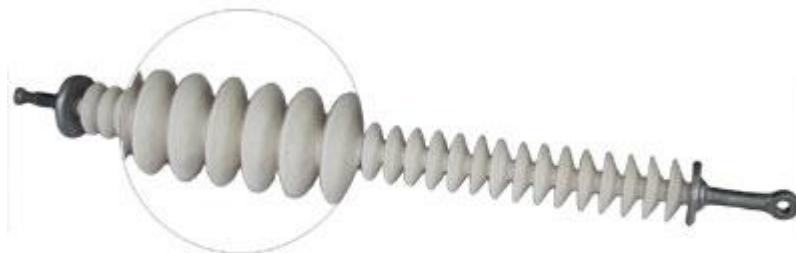


Рис. 4.4. Внешний вид изолятора полимерного подвесного ЛК-70/110-IV УХЛ1

§1.3. Станционно-аппаратные изоляторы

В распределительных устройствах подстанций используются опорные, проходные, а при напряжениях свыше 35 кВ - подвесные изоляторы. Опорные и подвесные изоляторы служат для крепления токоведущих шин; проходные изоляторы устанавливают в местах, где находящиеся под напряжением части проходят через стены, перекрытия или ограждения. В электрических аппаратах, кроме опорных и проходных изоляторов, применяются также изоляционные тяги, валы, рычаги, покрышки и т. д.

Опорные и проходные изоляторы испытывают в основном изгибающие механические нагрузки, обусловленные электродинамическими силами от токов КЗ, давлением ветра, воздействиями при работе контактов и т.д. Поэтому основной механической характеристикой этих изоляторов является гарантированная механическая прочность на изгиб, т.е. минимальное разрушающее усилие, определяемое при плавном увеличении нагрузки до видимого разрушения.

Опорные стержневые изоляторы. Наиболее простую форму имеют изоляторы стержневого типа для закрытых распределительных устройств. Изолятор представляет собой полое фарфоровое тело почти цилиндрической формы. Верхняя часть изолятора выполнена сплошной для предотвращения разрядов во внутренней полости. Фарфор с помощью цемента армирован внизу чугунным фланцем, а наверху чугунной шапкой.

Улучшение разрядных характеристик опорного изолятора может быть достигнуто с помощью внутреннего экрана, уменьшающего напряженность электрического поля у шапки. При положительной полярности разрядное напряжение монотонно растет по мере увеличения длины экрана, так как при

этом уменьшается напряженность поля у шапки. При отрицательной полярности разрядное напряжение, напротив, снижается. Продвижение разряда от отрицательного электрода в резконеоднородном поле сильно затруднено, поэтому разряд развивается от положительного электрода, т. е. от заземленного фланца, даже если напряженность около него значительно меньше, чем у шапки. По мере удлинения внутреннего экрана напряженность у фланца возрастает, и в связи с этим разрядное напряжение уменьшается. Целесообразная длина внутреннего экрана соответствует равенству разрядных напряжений при обеих полярностях. Роль внутреннего экрана в опорных изоляторах выполняют металлические элементы внутренней заделки арматуры. Изолятор такой конструкции имеет меньшие размеры и массу.

Для повышения разрядного напряжения на теле изолятора делается ребро, которое заставляет разряд развиваться под углом к силовым линиям поля, т.е. по пути с меньшей напряженностью. Влияние ребра существенно сказывается только при большом времени разряда. Наибольшее повышение разрядного напряжения наблюдается в том случае, когда ребро находится у электрода, с которого развивается разряд. При положительной полярности таким электродом является шапка, при отрицательной - фланец. Так как у опорных изоляторов разрядное напряжение при положительной полярности шапки значительно меньше, чем при отрицательной полярности, ребро необходимо располагать вблизи шапки.

Стержневые опорные изоляторы внутренней установки выпускаются на номинальные напряжения до 35 кВ и имеют механическую прочность (минимальную разрушающую нагрузку) на изгиб от 3750 до 42500 Н. Изоляторы с более высокой механической прочностью имеют больший диаметр. В обозначении этих изоляторов указываются их тип и материал, номинальное напряжение и механическая прочность в килограмм-силах. Например, ОФ-35-750 — опорный фарфоровый на 35 кВ, механическая прочность 7,5 кН.

Стержневые опорные изоляторы для наружной установки отличаются сильно развитой поверхностью. На напряжения 35 - 110 кВ такие изоляторы изготавливаются в виде сплошного фарфорового стержня с равномерно расположенными ребрами. Обозначение ОНС-110-1000 расшифровывается следующим образом: опорный, наружной установки, стержневой на 110 кВ с механической прочностью 10 кН.

В настоящее время нашли широкое применение изоляторы серии ОСК (опорный, стержневой, кремнийорганический), предназначены для изоляции и крепления токоведущих частей в электрических аппаратах и распределительных устройствах (РУ) электрических станций и подстанций переменного тока напряжением 6-220 кВ частотой 50 Гц. Изоляторы изготавливаются в соответствии с впервые введенным в 2003 году ГОСТ Р 52082-2003 "Изоляторы полимерные опорные наружной установки на напряжение 6-220кВ. Общие технические условия" и ТУ 3494-004-59116459-0 "Изоляторы полимерные опорные типа ОСК" разработанными и выпущенными ОАО "ФСК ЕЭС" с регистрацией в Госстандарте. В сравнении с устаревшими изоляторами типа ИОСПК изоляторы отвечают более жестким требованиям нового ГОСТа по электрическим и механическим параметрам и характеристикам с учетом особенностей полимерных материалов и композиций.

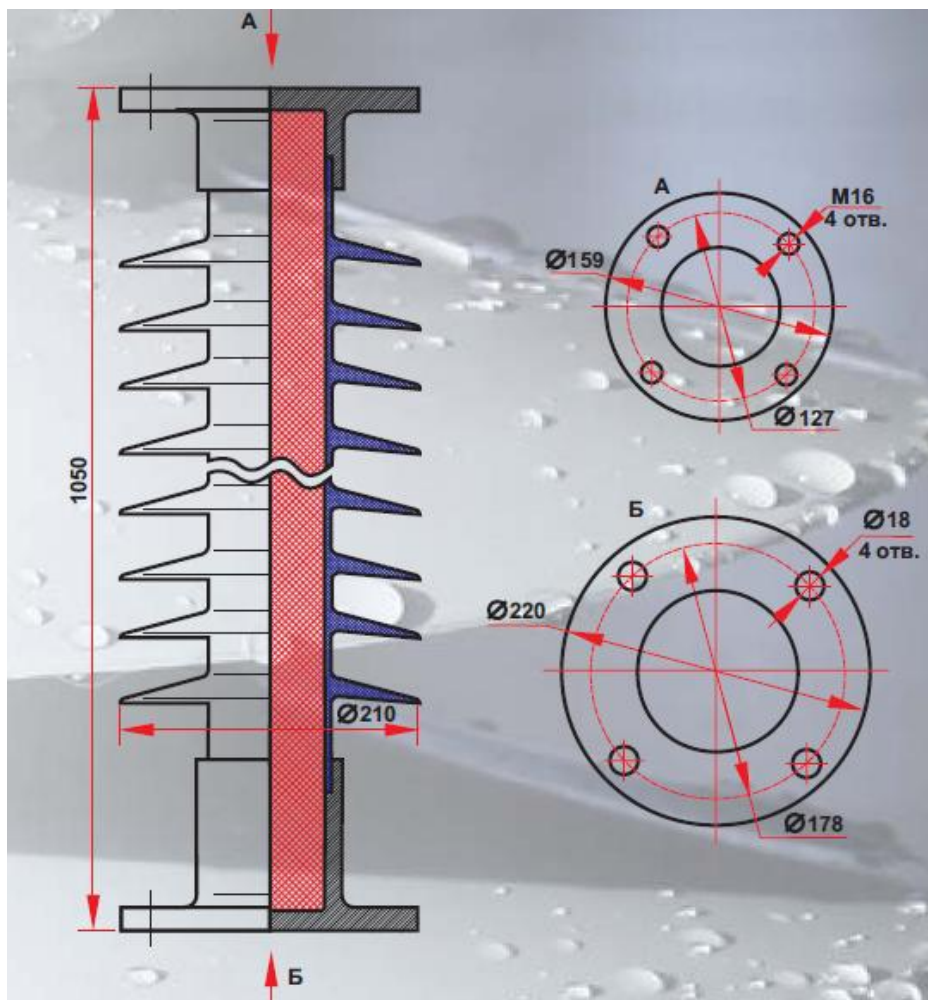


Рис. 4.5. Конструкция изоляторов ОСК

Монолитный стержень в изоляторах ОСК исключает возникновение внутренних разрядов и пробоя в отличие от труб заполненных пеной , а также утечки тока по внутренней полости и по стенкам трубы в следствие выпадения конденсата, в отличии от полых труб. Фланцы изолятор выполнены цельнолитыми из высокопрочных алюминиевых сплавов. Отсутствие сварных швов во фланцах позволяет применять изоляторы в условиях крайнего Севера. Достоинства изоляторов ОСК:

- срок эксплуатации 30 лет, благодаря применению кремнийорганической изоляционной оболочки;
- высокая стойкость к воздействию кислот и щелочей, к ультрафиолетовому облучению;
- трекинго-эрозинная стойкость;
- высокие гидрофобные свойства;
- лёгкий вес; более стоек к актам вандализма;
- устойчив к ошибкам персонала при монтаже и эксплуатации.



Рис. 4.6. Внешний вид изоляторов ОСК

Опорные полимерные изоляторы наружной установки типа ОТК (опорный трубчатый с кремнийорганической изоляцией) предназначены для изоляции и крепления токоведущих частей в электрических аппаратах и распределительных устройствах (РУ) электрических станций и подстанций на номиналь-

ное напряжение 110 кВ переменного тока частотой 50 Гц. Кроме того, их можно применять в качестве опорной конструкции в разъединителях РНДЗ, РДЗ, РГ. Конструктивно изолятор ОТК выполнен в виде полимерной оболочки, основой которой является стеклотекстолитового цилиндр, обеспечивающий необходимую механическую и электрическую прочность. На стеклотекстолитовый цилиндр методом прессования нанесено трекингоэрозионно стойкое, гидрофобное кремнийорганическое покрытие. Длина покрытия и количество ребер определяют путь тока утечки. Торцы трубы закрывают стальные фланцы с антикоррозийным покрытием. Способ крепления фланцев обеспечивает герметичность конструкции. Внутренняя полость изолятора заполняется кремнийорганическим пено-герметиком. Использование в качестве основы стеклотекстолитовой трубы, заполненной пеногерметиком, увеличивает механическую прочность и уменьшает вес изолятора, что выгодно отличает его от аналогичных изоляторов с основой в виде стержня. Использование стеклотекстолитовых цилиндров разного диаметра и толщины стенки позволит заказчику выбрать тот тип изолятора, у которого выдерживаемая нагрузка в плоскости перпендикулярной оси изолятора соответствует необходимым требованиям.

Опорные штыревые изоляторы. С увеличением номинального напряжения и высоты изолятора растут изгибающие моменты, и прочность изоляторов стержневого типа оказывается недостаточной. Не обеспечивают они необходимую прочность и в установках с относительно низкими напряжениями, но с большими токами КЗ.

Лучшими механическими характеристиками обладают изоляторы штыревого типа. Их отличительной особенностью является использование тонкостенного фарфора, электрическая и механическая прочность которого растет с уменьшением толщины и применением стального штыря, воспринимающего на себя основную часть изгибающего усилия.

В качестве примера можно рассмотреть опорный штыревой изолятор типа ОНШ-10-500 наружной установки на напряжение 10 кВ с минимальной разрушающей нагрузкой на изгиб 5 кН. Механическая прочность изолятора такого типа определяется прочностью его штыря, а не изоляционного тела, так как изгибающий момент, действующий на фарфоровую часть, из-за малого плеча оказывается намного меньше изгибающего момента, приложенного к штырю. Для прочного соединения фарфора с шапкой и штырем армируемые поверхности фарфора покрывают фарфоровой крошкой. Достаточно большая длина

утечки и высокое мокроразрядное напряжение изолятора обеспечиваются за счет ребер. Изоляторы такого типа на напряжение 35 кВ имеют две фарфоровые части, соединенные между собой цементом. У изоляторов для районов с повышенной загрязненностью атмосферы ребра выполняются с более развитой поверхностью для увеличения пути утечки.

В установках на напряжение 110 кВ и выше используются колонки, состоящие из нескольких, установленных друг на друга опорноштыревых изоляторов на напряжение 35 кВ. При большой высоте колонки на фарфоровую часть нижнего изолятора действует почти такой же изгибающий момент, как и на штырь. Поэтому слабым местом здесь является фарфоровое тело нижнего изолятора.

Чтобы увеличить допустимые нагрузки на изгиб для всей колонки, фарфоровое тело изолятора выполняют не из двух, а из трех более тонких, а значит, более прочных частей.

Одиночные колонки из трех - пяти изоляторов применяются в установках с напряжением до 220 кВ. При более высоких напряжениях используются в основном опорные конструкции в виде треноги, состоящей из нескольких колонок. Изоляторы в таких конструкциях работают не только на изгиб, но и на растяжение и сжатие.

Проходные изоляторы. Типичные конструкции проходных изоляторов на напряжения 6 и 35 кВ для внутренней и наружной установки состоят из изоляционного фарфорового тела, токоведущего стержня и фланца, с помощью которого изолятор укрепляется на стене, перекрытии или ограждении.

Проходные изоляторы, как и изоляторы других типов, конструируют так, чтобы пробивное напряжение их внутренней изоляции превышало разрядное напряжение по поверхности. Для изоляторов на номинальные напряжения до 35 кВ требуемую величину пробивного напряжения можно получить при относительно малой толщине фарфора. Однако при этом получается большая удельная поверхностная емкость и облегчается развитие разряда по поверхности. Учитывая слабую зависимость разрядного напряжения от расстояния между электродами по поверхности, в этих условиях пришлось бы неоправданно увеличить длину изолятора, чтобы обеспечить требуемое напряжение перекрытия.

Сокращение длины изолятора без снижения его разрядного напряжения достигается путем уменьшения удельной поверхностной емкости за счет уве-

личения толщины изоляции или диаметра фланца. Поскольку развитие разряда начинается от фланца, то достаточно увеличить диаметр только в этой части изолятора.

Между токоведущим стержнем и изоляционным телом в фарфоровых изоляторах остается воздушная полость. При напряжении, близком к разрядному, в полости происходит ионизация воздуха, что приводит к увеличению поверхностной емкости и некоторому снижению напряжения перекрытия. Хотя это обстоятельство и вызывает необходимость дополнительного увеличения толщины фарфора, однако мало влияет на размеры проходных изоляторов на напряжения до 20 кВ.

В проходных изоляторах на напряжение 35 кВ токоведущий стержень покрывают слоем бакелизированной бумаги толщиной 3—6 мм. Это увеличивает напряжение возникновения короны примерно в два раза и способствует повышению разрядного напряжения. Существенное увеличение разрядного напряжения изоляторов на 35 кВ дают ребра, особенно расположенные вблизи фланца, которые затрудняют развитие разряда, уменьшая удельную поверхностную емкость и направляя разряд по пути с меньшей напряженностью электрического поля.

Проходные изоляторы для наружной установки отличаются более развитой поверхностью той части изолятора, которая располагается вне помещения.

Современные проходные изоляторы типа ИППУ-10/4000, ИППУ-20/2000, ИППУ-35/630 и др. предназначены для изоляции и соединения токоведущих частей закрытых распределительных устройств с открытыми распределительными устройствами или линиями электропередачи, а также предназначены для прохода токоведущих элементов через стену или перекрытие, имеющие другой электрический потенциал. Изготавливаются по ГОСТ 20454-85 "Изоляторы проходные на напряжение свыше 1000В. Типы, основные параметры и размеры", ТУ 3494-015-59116459-07.

Преимуществом полимерных проходных изоляторов является отсутствие хрупкости и стойкость к динамическим ударным воздействиям, например при токах КЗ, устойчивая работа в условиях сильного загрязнения. Изоляторы ИППУ-35/1600 производятся взамен снятого с производства фарфорового изолятора ИППУ-35/1600. Поставленные на производство изоляторы ИППУ рассчитаны для работы в более жестких условиях, в частности на открытом воздухе, тогда как Заменяемый фарфоровый аналог был рассчитан для работы толь-

ко внутри помещения. Завод имеет возможность поставки проходных изоляторов с установочными размерами фланцев по требованию заказчика.

Срок эксплуатации 25 лет, благодаря применению кремнийорганической изоляционной оболочки на изоляционном теле; высокая стойкость к воздействию кислот и щелочей, к ультрафиолетовому облучению; трекинго-эрозинная стойкость; высокие гидрофобные свойства; лёгкий вес; более стоек к актам вандализма; устойчив к ошибкам персонала при монтаже и эксплуатации. Полимерный изолятор при нагрузках превышающих разрушающие не ломается и не падает на землю, а только изгибается. Это исключает падение шин на землю и возможные травмы персонала. Преимуществом является отсутствие хрупкости и стойкость к динамическим ударным воздействиям, например при токах КЗ.

Полимерные проходные изоляторы ИППУ подвергаются приемосдаточным испытаниям по 15 показателям, включающим:

- приложение испытательной силы на изгиб, контроль прогиба, контроль отсутствия пластической деформации;
- приложение испытательного крутящего момента в течение 1 мин., контроль угла закручивания, контроль отсутствия пластической деформации при кручении;
- приложение испытательного переменного кратковременного напряжения в сухом состоянии;
- определение уровня частичных разрядов;
- определение стойкости к проникновению красящей жидкости;
- определение адгезии оболочки к изоляционному телу;
- испытание на проникновение воды;
- испытание образцов от партии до разрушения на изгиб, кручение, растяжение;
- испытание образцов от партии изоляторов путем кипячения в соленой воде в течение 42 часов с последующим приложением импульсов напряжения с крутым фронтом, имитирующем разряд молнии;
- термомеханические испытания четырех циклов по 24 часа охлаждения до 60 градусов и нагревания до 50 градусов с одновременным приложением механической разрушающей силы.

Глава 2. Изоляция силовых электроустановок напряжением выше 1000 В

§2.1. Общие положения

В оборудовании энергосистем изоляция выполняет не только роль диэлектрического барьера между проводниками, работающими при разных потенциалах. Например, в силовых конденсаторах изоляция является той средой, в которой накапливается энергия. В кабелях и других линиях в окружающей проводники изоляции распространяется энергия электромагнитного поля, поэтому от параметров изоляции зависят волновые свойства линий. В коммутационных аппаратах с помощью изоляционных конструкций осуществляется передача механического движения от привода к подвижным контактам, а отдельные диэлектрики играют роль дугогасящей среды. Во всех случаях изоляционные конструкции служат для механического крепления проводников, через них отводится тепло от токоведущих частей, а иногда и от магнитопроводов.

Конструкция изоляции оборудования высокого напряжения определяется многими факторами: выполняемыми ею функциями, устройством и технологией изготовления отдельных деталей и узлов оборудования, режимами и условиями работы, определяющими требования к электрической и механической прочности, нагревостойкости, срокам службы и т.д., а также стоимостью и технологическими свойствами изоляционных материалов.

Требования к кратковременной электрической прочности изоляционных конструкций в виде величин испытательных напряжений устанавливают путем анализа возможных перенапряжений. Необходимая длительная электрическая прочность определяется наибольшим рабочим напряжением и требуемым сроком службы оборудования. Чтобы обеспечить длительную электрическую прочность изоляции, на основании специальных исследований и опыта эксплуатации устанавливают допустимые значения мощности ЧР и других параметров, косвенно характеризующих способность изоляции длительно выдерживать воздействие рабочего напряжения.

При определении требований к механической прочности изоляционных конструкций отдельно учитывают статические нагрузки (массу поддерживаемых деталей, давление газов или жидкостей, заполняющих внутренний объем, и т.д.), ударные нагрузки от электродинамических усилий при прохождении

токов КЗ, от движения контактов или от повышения давления при гашении дуги, а также длительную вибрацию.

К числу тепловых воздействий, влияющих на выбор конструкции и материалов изоляции, относятся длительные нагревы в номинальных режимах работы, кратковременные эпизодические повышения температуры, обусловленные большими тепловыделениями при прохождении токов внешних КЗ, а также циклические нагревы и остывания, если оборудование может работать с периодически меняющейся нагрузкой. Большое значение при этом имеет состав окружающей среды, т.е. наличие в воздухе влаги и химически активных примесей.

В ряде случаев приходится учитывать специфические воздействия на изоляцию например, для оборудования, работающего в тропических условиях, - повышенную солнечную радиацию и деятельность некоторых микроорганизмов.

§2.2. Изоляция вращающихся электрических машин

К электрическим машинам высокого напряжения относятся турбо- и гидрогенераторы, синхронные компенсаторы и двигатели большой мощности с номинальным напряжением 3 кВ и выше. Как источники энергии или приводы крупных агрегатов они выполняют исключительно важные функции в энергосистемах и на промышленных предприятиях, поэтому к машинам высокого напряжения в целом и к их изоляции в частности предъявляются очень высокие требования в отношении надежности и сроков службы.

Номинальные напряжения генераторов в настоящее время достигают 20 кВ. При современной тенденции увеличения единичных мощностей генераторов до 1000 МВт и более номинальное напряжение 20 кВ оказывается уже недостаточным, так как из-за огромных рабочих токов осуществление передачи энергии от генератора к трансформатору становится крайне затруднительным. Однако повышение номинальных напряжений генераторов без ухудшения остальных технико-экономических показателей представляет собой очень сложную проблему.

Активные материалы, т. е. медь обмотки и сталь статора, работают в электрических машинах при больших удельных нагрузках (плотностях тока,

индукциях). Соответственно потери в единице объема этих материалов получаются высокими, и для эффективного отвода выделяющегося тепла требуются большие перепады температур активных частей над температурой охлаждающей среды. Последняя для газообразной охлаждающей среды равна плюс 40°С. При поверхностном (косвенном) охлаждении обмотки, когда тепло от меди отводится через изоляцию, все это обуславливает необходимость высоких допустимых температур и высокой теплопроводности изоляции. В случае внутреннего (непосредственного) охлаждения, осуществляемого за счет принудительной циркуляции газа или жидкости (воды, масла) по встроенным в обмотку полым проводникам, требования к теплопроводности снижаются. В связи со сказанным во вращающихся машинах высокого напряжения используется изоляция, относящаяся по нагревостойкости к классам В, F и H.

В электрических машинах изоляция работает в условиях постоянной вибрации, особенно сильной на лобовых частях обмотки. Кроме того, она эпизодически подвергается ударным механическим воздействиям, возникающим при прохождении по обмотке больших токов во время внешних КЗ, при включении в сеть в режиме самосинхронизации и т. д.

Наиболее опасные механические напряжения возникают на участках выхода обмотки из пазов статора. Поскольку механическое повреждение изоляции приводит к немедленному или быстрому ухудшению ее диэлектрических свойств, к изоляции вращающихся машин предъявляются жесткие требования в отношении ее механической прочности.

Устройство изоляции вращающейся машины высокого напряжения определяется конструкцией ее статорной обмотки, которая зависит от мощности и номинального напряжения машины, от частоты вращения ротора и системы охлаждения.

Каждая фаза обмотки статора состоит из ряда последовательно соединенных витков, которые могут группироваться в катушки (катушечная обмотка) или укладываться порознь (стрежневая обмотка, одновитковые катушки). Катушки размещаются по пазам в один или два слоя, т. е. в каждом пазу может находиться по одной пазовой (активной) части катушки или по две от разных катушек одной и той же фазы. В машинах высокого напряжения, как правило, используются двухслойные обмотки. Для уменьшения добавочных потерь в меди от вихревых токов в машинах большой мощности витки на активных частях катушек (стержней) выполняют из изолиро-

ванных друг от друга элементарных проводников, укладываемых с транспозицией.

Конструкция изоляции электрических машин. Изоляция статорных обмоток электрических машин подразделяется на главную (корпусную) и продольную. Главной называется изоляция между проводниками обмотки и корпусом. Она имеет разную конструкцию на пазовых и лобовых частях катушек, а также на выводах (линейных и у нейтрали). К продольной относится изоляция между витками одной катушки, т. е. междувитковая (у стержневых обмоток отсутствует), а также изоляция между уложенными в одном пазу катушками.

Междувитковой изоляцией, а также изоляцией между элементарными проводниками обычно служит собственная изоляция обмоточных проводов. В зависимости от типа обмоточного провода она представляет собой три слоя лавсановой пленки, покрытых слоем хлопчатобумажной пряжи (ППЛБО), или два слоя стеклотенты, пропитанных нагревостойким лаком (ПСД), или дельта-асбестовую изоляцию (ПДА).

Главная изоляция статорных обмоток электрических машин высокого напряжения в связи с очень жесткими требованиями к электрической и механической прочностям и нагревостойкости выполняется только на основе слюдяных изоляционных материалов. При этом исходные материалы и технология изготовления выбираются такими, чтобы достигались высокая прочность и монолитность изоляции в целом. Объясняется это тем, что, несмотря на высокую короностойкость самой слюды, частичные разряды в газовых включениях, воздействуя на связующие материалы, все же ограничивают сроки службы изоляции. Кроме того, газовые прослойки сильно снижают механическую прочность и теплопроводность изоляции.

В РФ настоящее время все машины высокого напряжения изготавливаются с непрерывной изоляцией, которая получается путем пропитки и опрессовки намотанных на стержень лент из слюдяных материалов. Такая изоляция имеет одинаковую структуру и прочность на всех участках обмотки.

В современных крупных генераторах, а также в большинстве машин средней мощности используется термореактивная изоляция. Такая изоляция не размягчается при нагревах (общее свойство термореактивных смол) и сохраняет высокую механическую и электрическую прочность.

На пазовых частях обмотки используются покрытия с удельным поверхностным сопротивлением $10^3 - 10^4$ Ом, которые плотно прилегают к поверхности изоляции и во многих точках соприкасаются со стенками паза. Благодаря этим покрытиям электрическое поле в воздушных щелях отсутствует. Кроме того, устраняются местные повышения напряженности в области вентиляционных каналов в статоре.

На выходе обмотки из паза используются покрытия с удельным поверхностным сопротивлением $10^7 - 10^8$ Ом.

§2.3. Изоляция силовых трансформаторов

В силовых трансформаторах изоляция состоит из ряда различных по конструкции элементов, работающих в неодинаковых условиях и имеющих разные характеристики. Воздушные промежутки между вводами и по их поверхностям на землю составляют внешнюю изоляцию, а все изоляционные участки, расположенные внутри бака, - внутреннюю изоляцию трансформатора. В свою очередь внутренняя изоляция подразделяется на главную и продольную. К главной относится изоляция обмоток относительно земли и между разными обмотками. Это могут быть следующие участки: обмотка - магнитопровод или бак; обмотка НН - обмотка ВН; отвод - стенка бака; между отводами разных обмоток. К продольной относится изоляция между разными точками одной и той же обмотки: между витками, слоями, катушками.

Требования к электрической прочности отдельных элементов изоляции определяются специфическими особенностями переходного процесса в трансформаторе при воздействии на него импульсных напряжений.

При заземленной нейтрали трансформатора наибольшее импульсное напряжение на главной изоляции имеет место на расстоянии приблизительно $1/3$ длины обмотки от начала и может на 15 - 20 % превышать действующее напряжение.

При изолированной нейтрали наибольшее импульсное напряжение возникает на конце обмотки и может превышать действующее напряжение на 50 - 80 %.

Если импульс имеет крутой фронт, то на продольной изоляции могут возникать напряжения, более, чем в 10 раз превышающие напряжения нор-

мального режима. При пологих импульсах, например при внутренних перенапряжениях, напряжения на продольной изоляции намного ниже. Наибольшие напряжения на продольной изоляции возникают при срезах, т.е. при пробое какого-либо промежутка, расположенного поблизости от трансформатора. Из-за наличия индуктивности соединительных проводов напряжение на трансформаторе при срезе имеет колебательный характер, причем максимум напряжения в отрицательный полупериод может составить около 0,6 напряжения среза $U_{\text{ср}}$. Воздействие такого импульса на обмотку трансформатора приблизительно эквивалентно воздействию полного импульса, равного $1,6U_{\text{ср}}$.

В связи с этими особенностями поведения трансформатора при импульсных воздействиях необходимые габаритные размеры и конструкция продольной изоляции определяются грозовыми перенапряжениями. Для снижения напряжения на продольной изоляции при импульсных воздействиях применяют емкостные экраны и так называемые переплетенные обмотки, в которых витки соединяются друг с другом в определенной последовательности. При этом соседние витки оказываются под существенно разными потенциалами, и снижение импульсных напряжений достигается путем увеличения рабочего напряжения на продольной изоляции. Однако это позволяет несколько уменьшить габаритные размеры продольной изоляции.

Основные габаритные размеры главной изоляции трансформаторов до последнего времени также определялись грозовыми перенапряжениями. Однако ситуация существенно изменилась в связи с широким внедрением в электрических системах номинальных напряжений 330 кВ и выше, для которых основное значение приобретают внутренние перенапряжения. Если перенапряжения этого вида удастся эффективно ограничить, на первый план выступит длительная электрическая прочность, которая, вероятно, станет определяющим фактором при выборе изоляционных расстояний в главной изоляции трансформаторов.

На конструкцию изоляции трансформаторов сильное влияние оказывает то обстоятельство, что в активных частях трансформатора, т. е. в меди обмоток и в магнитопроводе, при работе выделяется большое количество тепла. Это заставляет выполнять изоляцию так, чтобы можно было непрерывно охлаждать активные части.

Конструкция изоляции трансформаторов. В современных силовых трансформаторах в качестве главной используется преимущественно масло-

барьерная изоляция. Продольная изоляция выполняется бумажно-масляной либо с помощью изолирования и покрытия витков и катушек обмотки.

Маслобарьерная изоляция, как уже отмечалось ранее, обладает достаточно высокой кратковременной электрической прочностью и позволяет интенсивно охлаждать конструкцию за счет циркуляции масла. Для того чтобы барьеры были эффективными, они должны располагаться перпендикулярно силовым линиям электрического поля. В проходных изоляторах, где электрическое поле в основном радиальное, это без труда достигается путем применения цилиндрических барьеров. В трансформаторах электрическое поле имеет сложную конфигурацию, поэтому приходится применять комбинацию барьеров разной формы. Подробнее рассматривается в разделе 2.

§2.4. Изоляция кабелей

Электрические кабели - это гибкие изолированные проводники, снабженные защитными оболочками, которые предохраняют изоляцию от внешних механических и иных воздействий. Основными элементами силовых кабелей являются проводники - жилы, изоляция по отношению к земле и между жилами, герметичная металлическая оболочка и защитные покровы.

Металлическая оболочка, выполняемая обычно из свинца или алюминия, предохраняет изоляцию главным образом от влаги и отчасти от механических повреждений. Защитные покровы включают броню из стальных проволок или лент и слои кабельной пряжи из джутового волокна, пропитанной битуминозными составами с антисептиками. Броня обеспечивает главную защиту оболочки кабеля и его изоляции от внешних механических воздействий, а джутовые покровы - защиту оболочки от коррозии.

Кабели в целом и все их элементы должны обладать достаточной гибкостью, чтобы их можно было наматывать на барабаны для транспортировки или хранения и изгибать при укладке по неровной трассе. Поэтому, в частности, жилы силовых кабелей выполняются из большого числа скрученных тонких проволок.

В кабелях изоляция воспринимает на себя массу токоведущих жил, а также значительные усилия, необходимые для изгибания жил при намотке на

барабан или при прокладке. В связи с этим от изоляции кабелей требуется сочетание достаточной гибкости с высокой механической прочностью.

Обычное для изоляции оборудования высокого напряжения требование высокой электрической прочности применительно к силовым кабелям имеет особое значение. Дело в том, что при увеличении электрической прочности и соответственно при уменьшении толщины изоляции не только снижаются затраты на ее изготовление, но и улучшаются условия отвода тепла от жилы и увеличиваются допустимые рабочие токи, кабель становится более гибким, достигается экономия металла оболочки и покровных материалов.

К надежности кабельных линий и, следовательно, к их изоляции предъявляются повышенные требования, так как на отыскание места повреждения и особенно на его устранение в подземных линиях затрачивается много времени и средств. При этом следует иметь в виду, что кабельные линии выполняются обычно из нескольких отрезков ограниченной длины (строительная длина - от 250 до 750 м), соединяемых последовательно муфтами. Последние монтируются в полевых условиях, поэтому технология наложения в них изоляции значительно уступает заводской.

В силовых кабелях высокого напряжения преимущественно используется бумажно-масляная изоляция, но в настоящее время все большее применение находят кабели из сшитого полиэтилена (СПЭ).

2.4.1 Основные конструкции кабелей высокого напряжения

Для напряжений до 35 кВ наибольшее применение получили кабели с вязкой пропиткой, у которых ленточная бумажная изоляция пропитывается маслоканифольным или синтетическими нестекающими составами повышенном вязкости.

Кабели с нестекающими составами могут прокладываться с разностью уровней до 300 м. При этом не возникает опасности стекания пропитывающего состава в нижнюю часть кабеля и образования в его верхней части больших объемов обеднено-пропитанной изоляции. Основным недостаток кабелей с вязкой пропиткой состоит в том, что в их изоляции неизбежно образуются газовые включения. Одна из причин - циклические нагревы и остывания при работе с периодически меняющейся нагрузкой. После нескольких таких циклов при остывании оболочка из-за остаточной деформации сохраняет размеры, соот-

ветствующие нагретому состоянию, а изоляция уменьшается в объеме. В результате в изоляции образуются пустоты, которые постепенно заполняются газами, выделяющимися из изоляции. Наличие газовых включений снижает длительную электрическую прочность изоляции. Вследствие этого в кабелях с вязкой пропиткой рабочие напряженности имеют относительно невысокие значения.

Такие кабели выпускаются нескольких типов с одной, двумя, тремя и четырьмя жилами. В качестве примера на рис. 4.1 показано сечение трехжильного кабеля с поясной изоляцией и с секторными жилами. Как видно из рисунка, для уменьшения наружного диаметра кабеля жилам придается не круглая, а секторная форма. Изоляция состоит из двух частей - фазной и поясной. Таким образом, между жилами кабеля находится двойная фазная изоляция, рассчитанная на линейное напряжение, а между каждой жилой и оболочкой - фазная и поясная. Зазоры между отдельными изолированными жилами заполняются низ-

кокачественной изоляцией (бумажными жгутами).

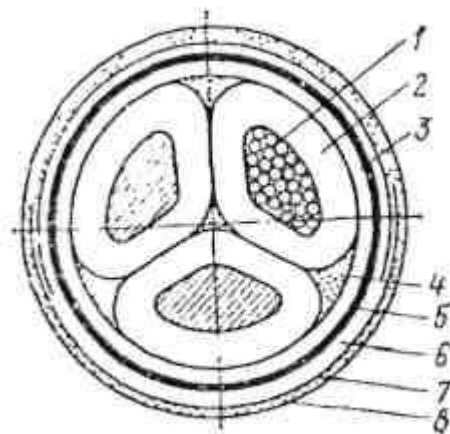


Рис.4.1. Трехжильный кабель с поясной изоляцией и секторными жилами:

1 – жила; 2 – фазная изоляция; 3 – поясная изоляция; 4 – наполнитель; 5 – оболочка; 6 – подушка под броней из пряжи, пропитанной битумом; 7 – броня из стальных лент; 8 – наружный защитный покров.

Для напряжений 110 - 220 кВ промышленной частоты используются маслонаполненные кабели, которые, как правило, выполняются одножильными. В таких кабелях ленточная бумажная изоляция пропитывается маловязким маслом, которое может перемещаться внутри жилы вдоль кабеля и находится под избыточным давлением. Благодаря этому исключается возможность появления в изоляции газовых включений при циклических изменениях температуры и длительная электрическая прочность повышается в 3 раза и более по сравнению с прочностью изоляции, пропитанной вязкими составами.

Для поддержания неизменного давления в кабеле в условиях эксплуатации на кабельной линии через каждые 1 - 2,5 км устанавливаются баки давления. Внутри герметичного корпуса располагаются упругие элементы в виде

полых дисков с волнистой поверхностью, заполненных воздухом под давлением. При нагревании кабеля давление масла в нем повышается и часть масла уходит в бак давления (упругие элементы сжимаются). При охлаждении масло возвращается в кабель (упругие элементы расширяются). Баки давления присоединяются к концевым и к специальным стопорным муфтам, в которых имеются каналы масла в изоляции от заземленных металлических частей до токоведущей жилы.

По давлению маслонаполненные кабели делятся на кабели низкого (до 0,2 МПа), среднего (0,4 – 0,5 МПа) и высокого (0,8 – 1,6 МПа) давления. С увеличением давления масла электрическая прочность растет, однако конструкция упрочняющих покровов и уплотнений в муфтах усложняется. Толщина изоляции у кабелей среднего давления на напряжение 110 кВ в зависимости от сечения жилы лежит в пределах 9,0 – 11,0 мм, а у кабелей 220 кВ – в пределах 16 – 20 мм. Пример конструкции маслонаполненного кабеля среднего давления показан на рис. 4.2.

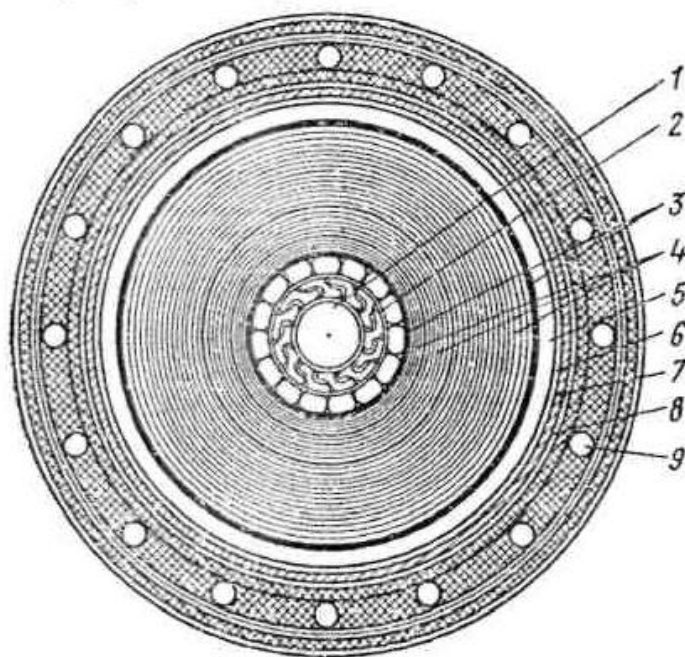


Рис. 4.2. Маслонаполненный кабель среднего давления 220 кВ:

1 – маслопроводящий канал; 2 – жила из фасонных луженых проволок; 3 – экран по жиле и по изоляции из полупроводящей металлизированной бумаги, 4 – изоляция из бумаги разной толщины и плотности; 5 – свинцовая оболочка; 6 – ленты из пластиката; 7 – медные усиливающие ленты; 8 – защитные покровы; 9 – стальные проволоки.

В маслонаполненных кабелях на напряжения 110 – 220 кВ особое внимание уделяется регулированию электрических полей. Прежде всего жила кабеля

выполняется из проволок специального профиля, а не из круглых, как в кабелях на напряжения до 35 кВ. За счет этого достигается более гладкая поверхность жилы. Кроме того, жила экранируется слоями полупроводящей бумаги, благодаря чему устраняются повышения напряженности у кромок от дельных проволок. Наконец, в таких кабелях изоляция выполняется градированной.

При напряжениях 110 – 150 кВ переменного тока наибольшее распространение у нас в стране получили маслонаполненные кабели высокого давления в стальных трубах. Устройство таких кабелей показано на рис. 4.3. В стальном трубопроводе, заполненном маловязким маслом под давлением около 1,5 МПа, помещаются три круглые жилы с изоляцией, которая пропитана вязкими составами. Изоляция покрыта эластичным, герметически плотным слоем (полиэтилен и др.), который предотвращает контакт изоляции с маслом в трубе, а также увлажнение изоляции при транспортировке и монтаже. Эластичное покрытие свободно передает изоляции давление масла, заполняющего стальную трубу.

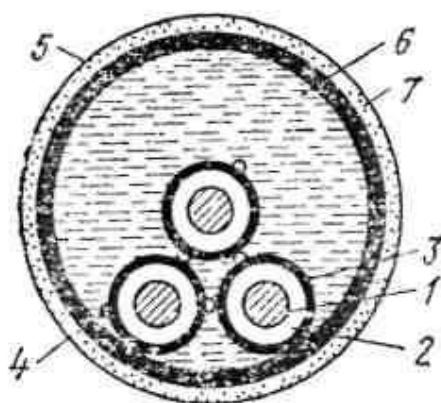


Рис. 4.3. Трубопровод с кабелем под давлением масла:

- 1 – жила; 2 – изоляция; 3 – герметизирующие покровы; 4 – полукруглая проволока;
5 – стальная труба; 6 – масло; 7 – антикоррозийные покровы.

Преимущество кабелей в трубах состоит в том, что упрощается конструкция оболочки, воспринимающей давление масла. Однако увеличивается объем работ при прокладке линии (сварка стальных труб, зачистка швов, наложение антикоррозийных покрытий и т. д.) и значительно возрастает объем масла, что усложняет систему поддержания избыточного давления.

Наряду с рассмотренными ранее при напряжениях до 220 кВ применяются газонаполненные кабели, в которых необходимая длительная электрическая прочность достигается за счет повышения давления газа (сухой очищенный азот). Эти кабели имеют устройство примерно такое же, как и маслонаполнен-

ные, но в них используется изоляция с обедненной пропиткой, заведомо содержащая газовые включения. Однако электрическая прочность включений значительно повышается за счет того, что создается повышенное давление путем непосредственного ввода газа в кабель под давлением, либо за счет прокладки кабеля с эластичной оболочкой в стальной трубе с газом под давлением. Преимущество таких кабелей состоит в том, что получается более простая система обеспечения повышенных давлений за счет использования баллонов со сжатым газом. Кроме того, такие кабели могут укладываться на трассах с большим уклоном. Однако в газонаполненных кабелях условия охлаждения хуже, и это ограничивает рабочие токи.

Конструкция кабеля с пластмассовой изоляцией достаточно проста: токоведущая жила у кабелей до 3 кВ покрывается сплошным слоем полиэтилена, а кабели на напряжение 6 кВ и выше имеют дополнительно экраны из полупроводящего полиэтилена или поливинилхлорида поверх изоляции либо на изоляции и на жиле. Наличие таких экранов уменьшает влияние воздушных включений, возникающих на границе изоляции с жилой, и делает электрическое поле в изоляции более однородным. Выпускают также кабели с защитными покровами и броней, как у кабелей с вязкой пропиткой.

Преимущества пластмассовых кабелей по сравнению с кабелями с вязкой пропиткой состоят в том, что масса их меньше и не требуется (или упрощается) система оболочек, защищающих изоляцию от внешних воздействий. Однако нагревостойкость существующих изоляционных пластмасс существенно ниже, чем бумажной изоляции с вязкой пропиткой.

Кабели с элегазовой изоляцией под давлением устроены следующим образом. В стальной трубе на распорках из твердого диэлектрика закреплена токоведущая жила (или три жилы). Линия собирается из отрезков таких труб и заполняется высокопрочным газом - элегазом под давлением. Такие кабели имеют ряд преимуществ: сравнительно простую конструкцию, малые диэлектрические потери, характерную для внешней изоляции способность к восстановлению электрической прочности после случайного пробоя, малую емкость на единицу длины. Расчеты показывают, что такие кабели будут особенно эффективны при сверхвысоких напряжениях и могут оказаться экономически более выгодными, чем воздушные линии электропередачи.

Для ввода больших мощностей в крупные города и промышленные центры разрабатываются кабели с охлаждением токоведущих жил до температуры

жидкого азота (77 К) или жидкого гелия (около 5 К). В первом случае (криорезистивные кабели) повышение пропускной способности достигается за счет значительного уменьшения активного сопротивления медных или алюминиевых жил и, следовательно, джоулевых потерь, что позволяет увеличить токовые нагрузки. В кабелях с жидким гелием используется эффект сверхпроводимости.

В настоящее время в Российской Федерации повысился интерес потребителей к новым кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ, XLPE), которые в недалеком будущем заменят кабели с бумажно-пропитанной (БПИ) и поливинилхлоридной (ПВХ) изоляцией. Это связано с тем, что предприятия, имеющие такие кабельные линии, высоко оценили эксплуатационные преимущества кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. По этому принципу пошли и многие российские производители, которые уже модернизировали свои технологии и наладили производство подобных кабелей для отечественных потребителей.

Это объясняется значимыми преимуществами СПЭ-кабелей:

1. за счет увеличения допустимой температуры жилы достигнута большая пропускная способность кабеля (в зависимости от условий прокладки, допустимые нагрузочные токи на $1/6 - 1/3$ выше, чем у кабелей с бумажной изоляцией);

2. высокая устойчивость к влаге, при этом отпадает необходимость в металлической оболочке;

3. при коротком замыкании обеспечивается больший ток термической устойчивости;

4. изоляционные электрические характеристики выше, а диэлектрические потери ниже;

5. меньше допустимый радиус изгиба кабеля;

6. поскольку для изоляции и оболочки применяются полимерные материалы, то для прокладки кабелей при температурах -20°C их предварительный подогрев не требуется;

7. неограниченные возможности по прокладке кабелей на трассах с любой разностью уровней;

СПЭ-кабель имеет меньшие габариты и массу, как следствие прокладка кабеля, как в кабельных сооружениях, так и в грунте на сложных трассах становится легче.



Рис. 4.4. Внешний вид трехжильного кабеля с изоляцией из СПЭ

Кабели же с бумажно-пропитанной изоляцией, несмотря на достаточно высокие и стабильные электрические характеристики, имеют ряд недостатков:

- технология изготовления кабеля сложна и трудоемка, из-за этого стоимость его довольно высока;
- кабель имеет ограничения при вертикальной прокладке, т.к. наблюдается стекание пропиточного состава;
- конструкция кабеля имеет большой вес, т.к. обязательным элементом конструкции является металлическая оболочка, которая защищает пропитанную бумагу, теряющую свойства изоляции при попадании влаги.

Все вышеперечисленные недостатки не присущи кабелям, изоляция которых состоит из полиолефиновых материалов. Самым распространенным и широко используемым в кабельной продукции полиолефином, является полиэтилен (ПЭ).

В начальной стадии обработки термопластичный полиэтилен имеет серьезные недостатки, основным из которых это ухудшение механических свойств, при нагреве до температуры плавления материала.

Чтобы решить данную задачу производители применяют сшитый полиэтилен, причем «сшивка» происходит на молекулярном уровне. При этом в процессе сшивки, образуются поперечные связи между макромолекулами полиэтилена, которые создают трехмерную структуру материала. За счет такого строения, полиэтилен имеет высокие показатели электрических и механических характеристик, большой диапазон использования рабочих температур, меньшую гигроскопичность. Есть несколько технологий сшивания термопластичных материалов. Для кабелей до 1 кВ используется самый распространен-

ный способ - сшивание через привитые органофункциональные группы, в качестве таких групп используют силаны. Этот способ еще называют силанольная сшивка. Сшивание полиэтилена происходит с использованием пара или воды, температура которых достигает 80-90 °С. Под воздействием влаги, тепла и применением катализатора, совершается гидролиз силанольных групп и, как следствие, сшивка материала.

Этот способ сшивания полиэтилена невозможно применить для кабелей с изоляцией, рассчитанной на напряжение 10 – 35 кВ, потому в процессе обработки достаточно сложно добиться равномерности физико-механических свойств в радиальном направлении изоляции, а также по причине того, что изоляция кабелей высокого напряжения имеет значительно большую толщину, по сравнению с изоляцией кабелей низкого напряжения.

Для того чтобы сшить изоляцию кабелей на напряжение 10 – 35 кВ применяется другой способ – сшивание с использованием пероксидов. Этот процесс, в отличие от силанольной сшивки, происходит в сухой среде, а именно в среде инертного газа (азота), при воздействии высоких температур от 300 до 400 °С и давления в 8 – 12 атм., при этом сохраняются электрические характеристики высоковольтных кабелей.

Применение вышеописанных способов сшивки кабелей подтверждается и мировыми производителями, которые наладили технологию производства и практически полностью перешли на использование силовых кабелей на среднее и высокое напряжение с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Это можно объяснить тем, что кабели с бумажно-пропитанной изоляцией расцениваются и считаются как морально устаревшие. Как показывает практика, применяя кабели с изоляцией из СПЭ на напряжение 6-10 кВ можно решить задачи по улучшению надежности электроснабжения потребителей путем оптимизации и реконструкции схем электрических сетей.

На сегодняшний день многие страны уже положительно оценили эксплуатационные характеристики кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) на среднее и высокое напряжение и практически полностью перешли на их использование. Энергетические компании России, оценив положительные аспекты эксплуатации кабелей среднего и высокого напряжения с изоляцией из СПЭ, также ориентированы на использование данного типа кабелей при прокладке новых кабельных линий и замене либо капитальном ремонте старых. Кроме того, для осуществления соединений между кабелями с бумажно-

пропитанной изоляцией и изоляцией из сшитого ПЭ применяются специально разработанные муфты. Это существенно уменьшает проблемы при ремонтах и реконструкциях электрических сетей.

Глава 3. Профилактика изоляции. Основные методы профилактики изоляции. Профилактика изоляции силовых трансформаторов, линейной изоляции, вращающихся машин, кабелей

§3.1. Профилактика изоляции. Основные методы профилактики изоляции

На заводах контроль изоляции производится при изготовлении и выпуске изделий с целью проверки качества промежуточных технологических операций и соответствия изоляционных характеристик изделий требованиям ГОСТ или заводским нормам. Часто на заводах измеряются изоляционные характеристики изделий, которые не нормированы, но важны в качестве исходных данных для последующего контроля за состоянием изоляционных конструкций.

Контроль изоляции в эксплуатации, обозначаемый часто термином «профилактика изоляции», служит для выявления дефектов в изоляционных конструкциях и последующей их замены или восстановления на месте.

Развитие дефектов в изоляции большей частью связано с проникновением в нее влаги. Попадание влаги обычно связано с механическими повреждениями изоляционных конструкций и изменением температурных условий. Процесс образования дефекта и разрушения изоляции протекает в начале весьма медленно и только на последних стадиях имеет скачкообразный характер, заканчиваясь пробоем изоляции.

Технически правильная эксплуатация, предотвращающая вредные воздействия на изоляцию, служит обязательным условием надежной работы высоковольтного оборудования. Срок службы изоляции в существенной степени зависит от постановки эксплуатационного надзора и контроля за изоляцией. Профилактика изоляции является только одним из элементов этого контроля. В задачу профилактики входит также установление типичных для тех или иных изоляционных конструкций дефектов, разработка эф-

фективных способов устранения этих дефектов и рекомендации по разработке рациональных изоляционных конструкций на заводах.

Все методы контроля изоляции можно разделить на разрушающие и неразрушающие. К первым принадлежит испытание повышенным напряжением, ко вторым — все остальные методы, которые проводятся без приложения к изоляции напряжений, способных привести к пробое. Но по этой же причине все неразрушающие испытания являются в известной мере косвенными.

Для выявления возникающих в изоляции дефектов разработаны и применяются следующие методы неразрушающих испытаний изоляции:

- а) измерение сопротивления изоляции или измерение тока сквозной проводимости;
- б) измерение угла диэлектрических потерь;
- в) измерение емкости;
- г) измерение распределения напряжения;
- д) измерение частичных разрядов в изоляции;
- е) просвечивание рентгеновскими лучами или ультразвуком.

В начале изучаются методы неразрушающих испытаний, затем рассматриваются испытания повышенным напряжением.

3.1.1. Контроль изоляции по $tg\delta$

Контроль изоляции по $tg\delta$ является одним из наиболее распространенных. Как показывает опыт, по значению $tg\delta$ можно установить наличие в изоляции различных по характеру дефектов. Однако дефекты одного и того же типа, но разных размеров неодинаково влияют на результаты измерения $tg\delta$ изоляции и поэтому обнаруживаются с различной чувствительностью. Объясняется это тем, что измеряемый $tg\delta$ изоляции, состоящей из нескольких различных материалов, представляет собой средневзвешенную величину. Например, для простейшей модели изоляции в виде плоского конденсатора с дефектным участком (рис. 4.5) выражение для измеряемого $tg\delta_{изм}$ будет иметь следующий вид:

$$tg\delta_{изм} = (\epsilon_n V_n tg\delta_n + \epsilon_d V_d tg\delta_d) / (\epsilon_n V_n + \epsilon_d V_d), \quad (4.1)$$

где $\operatorname{tg} \delta_n$ и $\operatorname{tg} \delta_d$ — значения тангенса угла потерь для нормальной и дефектной изоляции; V_n и V_d — объемы соответственно участков с нормальной и дефектной изоляцией.

Во многих случаях с появлением дефекта диэлектрическая проницаемость изоляции изменяется мало и можно считать, что $\varepsilon_d \approx \varepsilon_n$. Тогда

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{изм}} = \operatorname{tg} \delta_n \left[1 + \frac{V_d}{V} \left(\frac{\operatorname{tg} \delta_d}{\operatorname{tg} \delta_n} - 1 \right) \right], \quad (4.2)$$

где V — полный объем изоляции.

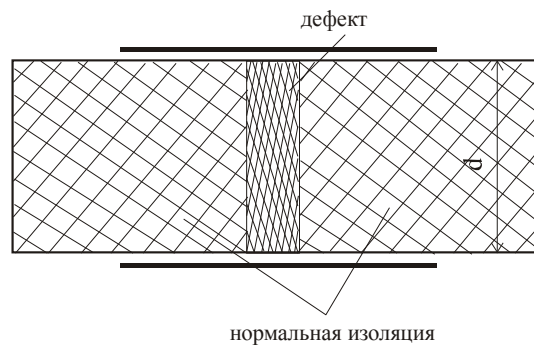


Рис. 4.5. Изоляция с дефектным участком

Из выражения (4.2) следует, что при малых размерах дефектного участка измеряемый $\operatorname{tg} \delta_{\text{изм}}$ может незначительно отличаться от $\operatorname{tg} \delta_n$ и дефект останется незамеченным. Например, появление в изоляции дефекта с $V_d = 0.005V$ и $\operatorname{tg} \delta_d = 10 \operatorname{tg} \delta_n$ вызовет увеличение измеряемого значения $\operatorname{tg} \delta$ против нормального всего на 5%, что сравнимо с точностью измерений в эксплуатационных условиях и с возможными случайными разбросами значений $\operatorname{tg} \delta_n$ для нормальной изоляции. Таким образом, измерения $\operatorname{tg} \delta$ изоляции позволяют наиболее надежно выявлять распределенные дефекты.

При испытаниях некоторых видов оборудования $\operatorname{tg} \delta$ изоляции измеряют при нескольких напряжениях в интервале, равном $(0,5—1,5)U_{\text{раб}}$, и строят зависимость $\operatorname{tg} \delta = f(U)$, по которой иногда можно судить не только о наличии, но и о характере дефектов в изоляции (рис. 4.6).

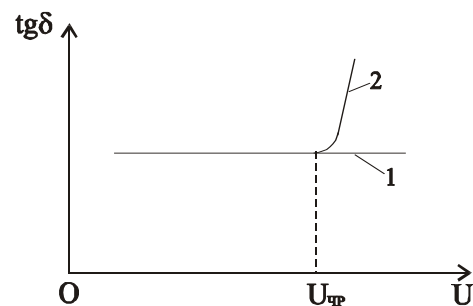


Рис. 4.6. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ изоляции от напряжения:

1 — изоляция нормальная; 2 — изоляция с газовыми включениями

У изоляции нормального качества значение $tg\delta$ при напряжениях до $1,5U_{раб}$ в большинстве случаев остается практически неизменным (кривая 1 на рис. 4.6).

В случае изоляции с газовыми включениями после возникновения ЧР $tg\delta$ с ростом напряжения увеличивается вследствие рассеяния в разрядах дополнительной энергии (кривая 2 на рис. 4.6). Такая зависимость $tg\delta = f(U)$ получила название «кривой ионизации». По ней можно ориентировочно определить напряжение $U_{чр}$ появления ЧР как напряжение, при котором начинается рост $tg\delta$. Однако следует иметь в виду, что такая оценка напряжения $U_{чр}$ может оказаться завышенной (иногда в 1,5—2,0 раза), так как при напряжениях, едва превышающих действительное значение $U_{чр}$, энергия, рассеиваемая в ЧР, еще мала и изменение величины $tg\delta$ не выходит за пределы точности измерения.

При профилактических испытаниях качество изоляции оценивают только по абсолютной величине $tg\delta$, которую измеряют при напряжении не выше 10 кВ независимо от номинального напряжения оборудования. Измерения при более высоких напряжениях в условиях эксплуатации не проводятся, так как для этого требуется громоздкое оборудование.

Мосты для измерения $tg\delta$ изоляции. Величину $tg\delta$ изоляции измеряют с помощью моста Шеринга, принципиальная схема которого показана на рис. 4.7. На этой схеме C_X — испытуемая изоляция; C_N — эталонный конденсатор с очень малыми диэлектрическими потерями (газовая изоляция); $И$ — индикатор равновесия моста; РЗ — защитные разрядники, предохраняющие измерительные плечи моста в случае пробоя испытуемой изоляции. Для уменьшения ошибок измерения вследствие наводок от внешних полей мост экранируется.

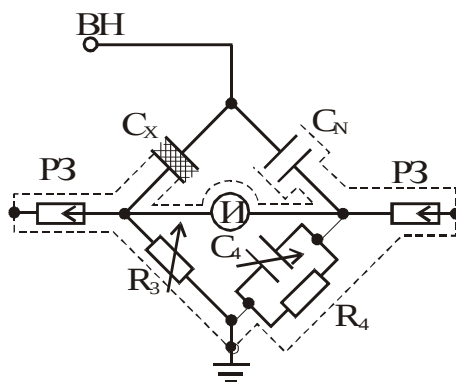


Рис. 4.7. Нормальная схема моста Шеринга для измерения емкости и $tg\delta$ изоляции

Равновесие моста достигается при условии

$$Z_X / Z_3 = Z_N / Z_4 \text{ или } Z_X Z_4 = Z_N Z_3, \quad (4.3)$$

где Z_X , Z_N , Z_3 и Z_4 — полные сопротивления плеч моста. Испытуемая изоляция с диэлектрическими потерями может быть замещена с помощью последовательного или параллельного соединения емкости C_X изоляции и сопротивления R_X , в котором происходит рассеяние энергии.

Пусть, например, принята последовательная схема замещения изоляции. Тогда $Z_X = R_X + 1/j\omega C_X$ и условие (4.3) с учетом действительного сопротивления каждого плеча запишется в виде:

$$\left(R_X + \frac{1}{j\omega C_X} \right) \frac{R_4 \frac{1}{j\omega C_4}}{R_4 + \frac{1}{j\omega C_4}} = R_3 \frac{1}{j\omega C_N}. \quad (4.4)$$

Приравнявая действительные и мнимые части равенства (4.4), получены два условия равновесия моста (по амплитуде и по фазе):

$$C_X = C_N R_4 / R_3; \quad R_X = R_3 C_4 / C_N. \quad (4.5)$$

Так как $\operatorname{tg} \delta$ изоляции при последовательной схеме замещения равен $\omega C_X R_X$, то $\operatorname{tg} \delta = \omega C_X R_X = \omega C_4 R_4$.

Обычно сопротивление R_4 в мостах для напряжения с частотой 50 Гц принимается равным $R_4 = 10^4 / \pi = 3184$ Ом. Тогда $\operatorname{tg} \delta = 10^6 C_4$, т. е. значение $\operatorname{tg} \delta$ численно равно емкости C_4 , мкФ.

В условиях эксплуатации часто один из электродов испытуемой изоляционной конструкции «наглухо» заземлен, тогда нормальная схема моста по рис. 4.7 не может быть использована. В таких случаях измерения $\operatorname{tg} \delta$ проводят по так называемой «перевернутой» схеме (рис. 4.8), которая отличается от основной тем, что высокое напряжение подается в точку соединения сопротивлений R_3 и R_4 , а заземляется точка соединения C_X и C_N .

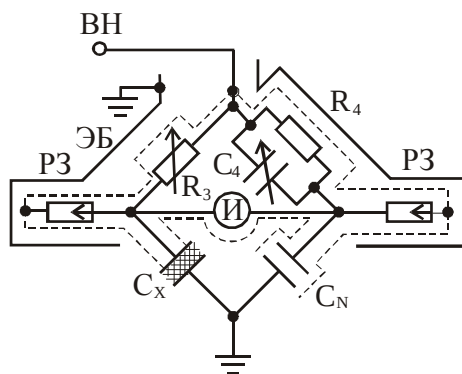


Рис. 4.8. «Перевернутая» схема моста Шеринга для измерения емкости и $\operatorname{tg} \delta$ изоляции

В «перевернутой» схеме оба измерительных плеча и индикатор I оказываются под высоким потенциалом. Чтобы обеспечить безопасные условия работы с мостом, ручки от регулируемых элементов моста (R_3 , C_4 , индикатора I) выполняются изолированными на напряжение, вдвое превышающее номинальное для моста.

Для контроля качества изоляции по $\text{tg}\delta$ в энергосистемах используются компактные переносные мосты типов МД-16 и Р-595, которые позволяют проводить измерения при напряжениях до 10 кВ по «нормальной» и «перевернутой» схемам. В настоящее время появились новые приборы для измерения $\text{tg}\delta$ мост переменного тока Р5026 М, измеритель параметров изоляции Вектор – 2.0 М, мосты переменного тока высоковольтные автоматизированные СА7100, измеритель тангенса угла диэлектрических потерь ТАНГЕНС-2000 и др. В качестве источника высокого напряжения обычно применяют измерительный трансформатор напряжения НОМ-10.

3.1.2. Методы контроля с использованием явления абсорбции

Для пояснения методов контроля изоляции использованием явления абсорбции можно воспользоваться схемой замещения изоляции, поясняющей процессы поляризации, протекающие в изоляции при приложении к ней напряжения. На рис. 4.9 приведена схема замещения изоляции.

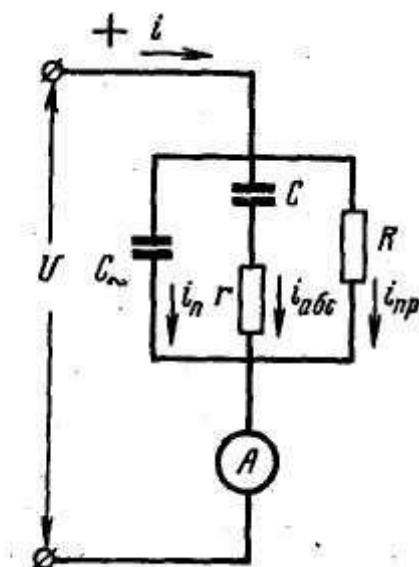


Рис. 4.9. Схема замещения изоляции при испытаниях напряжением постоянного тока

В схеме имеются три параллельные цепи. Одна цепь с емкостью $C_{\sim}$ отражает заряд геометрической емкости и электронную и ионную поляризацию; соответствующие этим явлениям токи протекают одинаково быстро, поэтому обобщены в одну цепь. Вторая цепь – последовательно включенные емкость C и сопротивление r эквивалентные емкостям и сопротивлениям последовательно включенных слоев изоляции; при этом число последовательно включенных емкостей и сопротивлений по существу равно числу слоев. Цепь из C и r отражает межслоевую и дипольную поляризацию и имеет наибольшее значение. Третья цепь – сопротивление R соответствует сквозной проводимости. Через измерительный прибор, показанный на схеме замещения, протечет ток i , равный сумме токов трех ветвей: $i_{\sim}$, $i_{\text{абс}}$ и $i_{\text{пр}}$. Первый ток не отразится на показаниях прибора, поскольку он быстро затухает; ток сквозной проводимости $i_{\text{пр}}$ останется постоянным в продолжение всего процесса. Его величина определит установившееся значение показаний прибора. Ток поляризации, обычно называемый током абсорбции $i_{\text{абс}}$ является затухающим. Время его затухания зависит от свойств изоляции.

Ток абсорбции $i_{\text{абс}} = Ie^{-t/T/r}$ изменяется по экспоненциальному закону с постоянной времени $T = rC$, т. е. он тем медленнее убывает, чем больше r – сопротивление тех слоев изоляции, через которые заряжается межслоевая емкость. Сопротивление же слоя зависит главным образом от его увлажнения – чем суше изоляция, тем медленнее затухает ток абсорбции. Для того чтобы судить о быстроте спада $i_{\text{абс}}$, обычно снимают показания прибора через 15 и 60 с после приложения напряжения и берут их отношение:

$$K_{\text{абс}} = R_{60}/R_{15}, \quad (4.6)$$

где $K_{\text{абс}}$ – коэффициент абсорбции. Таким образом, методы контроля изоляции использованием явления абсорбции в основном применяются для определения степени увлажненности изоляции. Далее приведены некоторые из этих методов.

Контроль изоляции по «возвратному» напряжению. Опыт, в котором наблюдается «возвратное» напряжение, состоит в следующем. Неоднородная изоляция, которую для простоты можно считать двухслойной, в течение некоторого времени выдерживается при постоянном напряжении, чтобы в ней накопился заряд абсорбции. Затем она отсоединяется от источника напряжения, и ее электроды замыкаются «накоротко» на очень малый промежуток времени Δt , после чего вновь размыкаются.

За время Δt геометрическая емкость C_T изоляции полностью разряжается, а заряд абсорбции на границе слоев и связанные с ним заряды обратного знака на электродах остаются практически неизменными. В период Δt емкости слоев C_1 и C_2 включены параллельно и заряжаются от заряда абсорбции до напряжения $U_o = q_{abc} / (C_1 + C_2)$. При этом их электроды приобретают заряд того же знака, что и заряд абсорбции. После размыкания внешних электродов изоляции емкости C_1 и C_2 вновь оказываются соединенными последовательно и при этом заряженными до одинакового напряжения U_o , но разной полярности. Далее емкости C_1 и C_2 будут разряжаться на сопротивления утечки своих слоев R_1 и R_2 с разной скоростью, так как постоянные времени $R_1 C_1$ и $R_2 C_2$ не одинаковы. В итоге на изоляции появится напряжение, которое получило название «возвратного» напряжения.

Напряжение $U_{возвр} \neq 0$ для любой неоднородной изоляции. Чем больше степень неоднородности, тем выше $U_{возвр}$ и тем сильнее различаются скорости подъема и спада «возвратного» напряжения.

Таким образом, по форме и величине «возвратного» напряжения можно судить о состоянии изоляции. Например, неравномерное увлажнение многослойной изоляции обнаруживается по увеличению «возвратного» напряжения. Однако не всегда ухудшение качества изоляции сопровождается ростом напряжения $U_{возвр}$. В частности, при сквозном и равномерном увлажнении неоднородность изоляции может уменьшиться, тогда «возвратное» напряжение снизится. Поэтому контроль по «возвратному» напряжению недостаточен и должен сочетаться с другими методами.

Возможность появления «возвратного» напряжения обязательно должна учитываться при выборе мер безопасного проведения испытаний изоляции повышенным напряжением. После окончания испытаний необходимо разрядить не только геометрическую емкость, но и нейтрализовать заряд абсорбции, для чего надо замкнуть электроды на продолжительное время (минуты).

Контроль изоляции по «кривой саморазряда». После отключения источника постоянного напряжения U_o емкости слоев изоляции разряжаются на сопротивления утечки своих слоев, и происходит постепенный саморазряд изоляции. При этом напряжение на многослойной неоднородной изоляции как сумма напряжений на отдельных слоях изменяется в соответствии с выражением

$$U_{C.P} = \frac{U_o}{R} \sum_{i=1}^n R_i e^{-t/R_i C_i}, \quad (4.7)$$

где R_i и C_i — сопротивление утечки и емкость i -го слоя; R — сопротивление утечки всей изоляции; n — число слоев изоляции.

В случае идеально однородной изоляции, т. е. при $n = 1$ «кривая саморазряда» есть просто экспонента $U_{c.p.} = U_0 e^{-t/RC}$. Если ее построить в полулогарифмическом масштабе, т. е. представить в виде $\ln U_{c.p.} = f(t)$, то она будет иметь вид прямой, у которой тангенс угла наклона равен $1/RC$. Для неоднородной изоляции «кривая саморазряда» в данном масштабе, как сумма экспонент, уже не будет прямой. Чем больше она отклоняется от прямой линии, тем сильнее неоднородность изоляции.

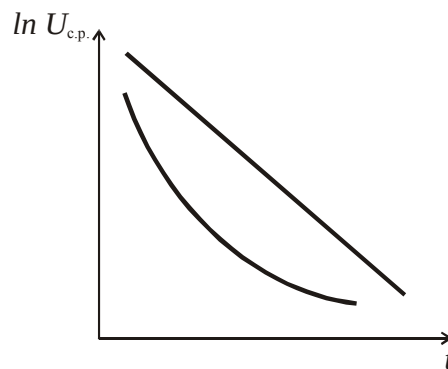


Рис. 4.10. Кривая «саморазряда»

Контроль изоляции по сопротивлению утечки. Измерения сопротивлений выполняются с помощью простых переносных приборов — мегаомметров. Упрощенная схема мегаомметра показана на рис. 4.11.

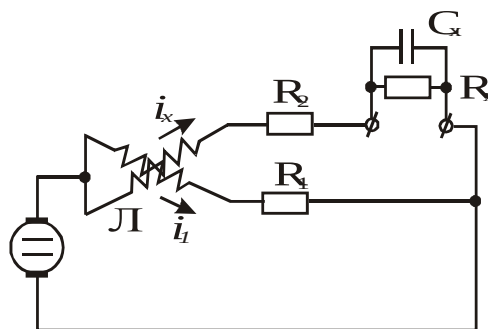


Рис. 4.11. Упрощенная схема мегаомметра для измерения сопротивления утечки изоляции:

Л — логометр; R_1 и R_2 — добавочные резисторы;

R_x и C_x — сопротивление утечки и емкость испытуемой изоляции

Источником постоянного напряжения в нем служит генератор с ручным или моторным приводом, а измерительным прибором — логометр, имеющий две расположенные под углом рамки. Угол отклонения стрелки логометра пропорционален отношению токов i_x/i_L , поэтому определяется лишь сопротивлением утечки проверяемой изоляции и не зависит от абсолютного значения напря-

жения генератора. При измерениях важное значение имеет лишь стабильность этого напряжения. Если напряжение сильно колеблется (неравномерное вращение рукоятки генератора), то через мегаомметр протекает значительный емкостный ток, стрелка колеблется и это затрудняет или даже делает невозможными измерения.

При включении испытуемой изоляции на постоянное напряжение сопротивление утечки изменяется во времени:

$$R(t) = U/i(t) = Rr/(r + Re^{-t/T}), \quad (4.8)$$

где $R = R_1 + R_2$, $r = R_1 R_2 (R_1 + R_2) (C_1 + C_2)^2 / (R_1 C_1 - R_2 C_2)^2$, $T = R_1 R_2 (C_1 + C_2) / (R_1 + R_2)$.

Опытом установлено, что для большинства изоляционных конструкций постоянная времени поляризации $T < 1$ мин. Это означает, что к моменту времени $T = 1$ мин. после приложения напряжения $R_{из}$ достигает установившегося значения, равного R . Величина R определяет наличие сквозных проводящих путей в изоляции. Резкое снижение R указывает на далеко зашедший дефект в изоляции.

При испытаниях изоляции зависимость $R(t)$ от времени полностью не определяют, а оценивают ее характер по двум точкам, а именно по сопротивлениям, измеренным через 15 и 60 с после включения мегаомметра. О качестве изоляции судят как по абсолютному значению сопротивления R_{60} , так и по отношению $K_{абс} = R_{60}/R_{15}$, которое называют *коэффициентом абсорбции*.

Для многих видов реальной изоляции $K_{абс}$ по мере уменьшения в ней влаги стремится не к 1, а к некоторому предельному значению, равному примерно 2 – 2,5. Высокая однородность и низкие значения коэффициента $K_{абс}$ в такой изоляции могут иметь место только при сильном увлажнении, когда и абсолютные значения R_{60} оказываются низкими.

По сопротивлению (или току) утечки можно судить о наличии в изоляции не только распределенных, но и сосредоточенных дефектов. Например, механические повреждения в виде неполных проколов или поперечных трещин, а также следы от незавершенных разрядов часто приводят к сильному снижению сопротивления изоляции.

Недостатком контроля изоляции по сопротивлению утечки является то, что в ряде случаев на результаты измерения сильное влияние могут оказывать утечки по поверхности твердых диэлектриков, которые не всегда правильно отражают состояние изоляции.

Контроль изоляции по емкостным характеристикам. Существует несколько методов проверки качества изоляции по емкостным характеристикам,

причем все они прямо или косвенно используют зависимость емкости неоднородной изоляции от частоты.

Косвенно зависимость $C\omega=f(U)$ используется в *емкостно-температурном* методе, при котором качество изоляции оценивается по изменению емкости при нагреве. При значительном увлажнении сопротивление утечки сильно снижается по мере роста температуры, так как при этом увеличивается не только подвижность ионов, но также растет растворимость и степень диссоциации примесей во влаге. В соответствии с изменением сопротивления уменьшается постоянная времени изоляции T , а эквивалентная емкость изоляции увеличивается. Для изоляции нормального качества емкость растет в меньшей степени. Емкость в этом методе измеряют обычными мостами Шеринга.

Непосредственно по зависимости $C\omega=f(U)$ качество изоляции оценивается методами «емкость — частота» и «емкость — время». В обоих случаях определяются не вся зависимость $C\omega=f(U)$, а лишь две ее характерные точки, позволяющие судить о степени неоднородности изоляции и тем самым о ее увлажнении.

В методе «емкость — частота» емкость изоляции измеряется на частотах 2 и 50 Гц и определяется отношение C_2/C_{50} , которое и служит показателем качества изоляции.

В методе «емкость — время» измеряются емкости C_z (геометрическая) и ΔC и подсчитывается отношение $\Delta C/C_z$, которое является критерием качества изоляции.

По емкостным характеристикам наиболее эффективно выявляется увлажнение маслонаполненной изоляции. Поэтому переносные компактные приборы получили название ПКВ — приборов контроля влажности. Они используются для определения степени увлажнения изоляции силовых трансформаторов.

3.1.3. Испытание повышенным напряжением

Испытание на переменном токе. Испытания повышенным напряжением производятся для проверки наличия необходимого запаса электрической прочности изоляции. Так как понижение электрической прочности вызывается, как правило, местными дефектами в изоляции, то испытание повы-

шенным напряжением есть также способ обнаружения в изоляции местных дефектов. Испытание повышенным напряжением гарантирует также, что изоляция оборудования имеет нужный уровень прочности по отношению к перенапряжениям, возникающим в эксплуатации.

При выпуске изделий с завода испытание повышенным напряжением является основным видом испытания изоляции. Испытательные напряжения для разных типов оборудования определены действующими ГОСТ.

Испытательное напряжение должно прикладываться к изоляции в течение времени, достаточного для развития частичных разрядов или даже развития разряда до пробоя. Практика показала, что для этого достаточно приложение испытательного напряжения в течение 1 мин. Чрезмерно длительное приложение напряжения нежелательно, так как ведет к порче органической изоляции ионизационными процессами.

Изоляция считается выдержавшей испытание повышенным напряжением переменного тока, если в изоляции отсутствуют разряды, отмечаемые на слух или по колебаниям стрелки вольтметра, измеряющего напряжение в первичной цепи. После испытания повышенным напряжением изоляция не должна иметь местных нагревов. Для наиболее ответственного оборудования современная техника требует контроля с помощью индикатора частичных разрядов (ИЧР), причем испытательное напряжение должно быть ниже критического напряжения ионизации.

Испытание на постоянном напряжении. Испытание повышенным напряжением постоянного тока применяется для объектов большой емкости (например, кабелей), требующих при переменном токе слишком большой мощности испытательных трансформаторов.

При приложении выпрямленного напряжения в изоляции не протекают поляризационные токи, следовательно, потери в изоляции малы. Отсутствие емкостного тока препятствует значительному развитию частичных разрядов в изоляции. Поэтому пробивное напряжение изоляции на выпрямленном токе существенно выше, чем на переменном. Коэффициент упрочнения изоляции достигает 3—4. В силу этого испытательные напряжения выпрямленного тока повышаются по сравнению с испытательными напряжениями переменного тока.

Коэффициент упрочнения для доброкачественной изоляции выше, чем для дефектной. Это обстоятельство делает испытание на выпрямленном напряжении избирательным к выявлению ряда возникающих в изоляции де-

фектов. В этом заключается существенное преимущество испытания изоляции выпрямленным напряжением. Кроме того, в этом испытании можно вести контроль за состоянием изоляции путем измерения токов проводимости.

3.1.4. Контроль изоляции по распределению напряжения на элементах конструкции

В изоляционных конструкциях, состоящих из ряда элементов (например, в гирляндах изоляторов или колонках опорных изоляторов и др.) рабочее напряжение распределяется по емкостям элементов конструкции, а также частичным емкостям относительно земли и токоведущих частей.

При резком понижении сопротивления изоляции отдельных элементов распределение напряжения по всей конструкции будет искажено по сравнению с нормальным. Следовательно, измерение распределения напряжения по конструкции может быть использовано для выявления дефектных элементов. Для практического применения метода необходимо знать нормальное распределение напряжения по изоляционной конструкции в рабочем состоянии. Метод измерения распределения напряжения позволяет производить контроль за состоянием изоляции под рабочим напряжением. Измерение производится под рабочим напряжением с помощью измерительной штанги.

На электроды изолятора накладываются щупы, к которым подсоединен измерительный прибор или регулируемый «искровой» промежуток. Перенося щупы штанги с одного изолятора на другой, поочередно измеряют напряжения на изоляторах. Сравнение с нормальным распределением указывает на дефектные изоляторы.

3.1.5. Обнаружение ионизационных процессов в изоляции

При развитии в изоляции ионизационных процессов происходит дополнительное рассеивание энергии, связанное с нейтрализацией зарядов на емкости газовых включений. По этой причине развитие ионизационных процессов должно повышать $\operatorname{tg} \delta$ изоляции. Ионизационные процессы в изоляции могут быть обнаружены путем снятия зависимости $\operatorname{tg} \delta$ от напряжения, приложенного к изоляции. Такая зависимость получила название кривой ионизации (рис.

4.12). В интервале $U < U_{\text{и}}$ $\text{tg} \delta$ остается практически неизменным. В точке А, называемой точкой ионизации, наблюдается излом кривой, и в дальнейшем $\text{tg} \delta$ резко возрастает с напряжением. Очевидно, что при напряжении $U_{\text{и}}$ в изоляции возникают ионизационные явления.

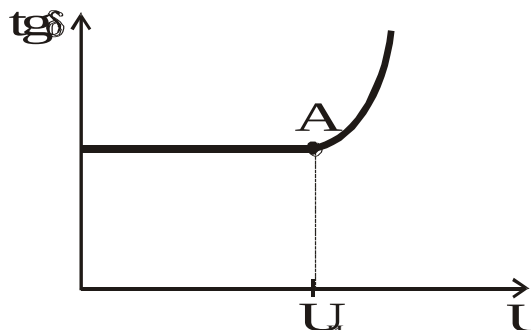


Рис. 4.12. Зависимость $\text{tg} \delta$ изоляции от приложенного напряжения (кривая ионизации)

Другой метод ионизационных процессов основан на непосредственном измерении частичных разрядов в газовых включениях. При возникновении в изоляции частичных разрядов в кривой напряжения появляются высокочастотные колебания с амплитудой ΔU_0 . Схема обнаружения и количественной оценки частичных разрядов показана на рис. 4.13.

Индикатор частичных разрядов (ИЧР) подключен к испытываемому объекту через разделительную емкость $C_{\text{разд}}$, которая служит заграждающим фильтром для токов рабочей частоты.

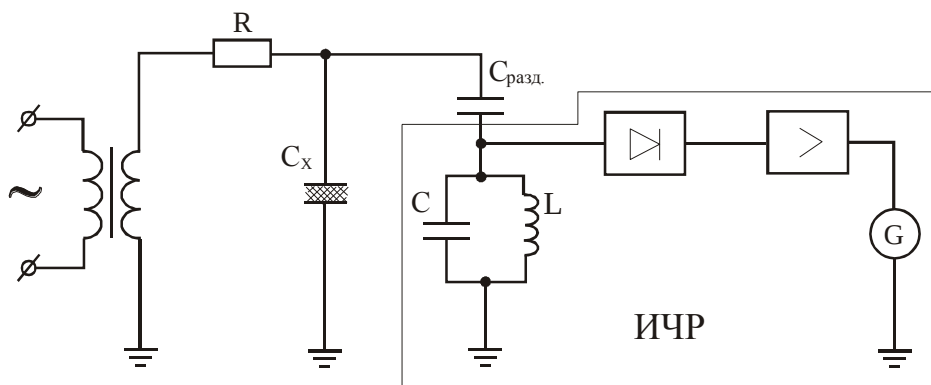


Рис. 4.13. Принципиальная схема измерения частичных разрядов в изоляции с помощью ИЧР

При возникновении частичных разрядов в C_x хаотические колебания напряжения на испытываемом объекте возбуждают в ИЧР незатухающие периодические колебания с частотой, соответствующей собственному периоду колебаний контура $T = 2\pi \sqrt{LC}$ (при $C \gg C_{\text{разд}}$). Частота настройки ИЧР обычно принимается порядка нескольких десятков кГц. Амплитуда вы-

сокочастотных колебаний ΔU измеряется гальванометром G , включенным через усилитель и выпрямитель. По значению ΔU определяется кажущаяся интенсивность ионизации.

Для обнаружения частичных разрядов можно использовать также высокочастотное электромагнитное поле, возбуждаемое ими в контуре, который образуется протяженными электродами изоляции. Например, для подвешенной на опоре гирлянды изоляторов такой контур образуется проводом линии и землей. Излучаемые этим контуром электромагнитные волны могут быть приняты антенной прибора, называемого дефектоскопом и представляющего собой регенеративный приемник прямого усиления, на выход которого включен катодный вольтметр либо миллиамперметр. Частота настройки дефектоскопов обычно принимается в интервале 1 - 2 МГц. Этот метод является одним из самых первых и наиболее удобных методов регистрации частичных разрядов, так как обеспечивает дистанционные измерения без подключения к объекту. В последние годы происходит переход к использованию диапазона частот от нескольких сотен мегагерц до нескольких гигагерц. В этом диапазоне частот уровень помех значительно ниже и можно использовать антенны с высокой степенью направленности, обеспечивающие локализацию источника сигналов с точностью до нескольких десятков сантиметров. Эти датчики наиболее чувствительны к дефектам в наружных частях оборудования (таких как вводы и изоляторы), сигналы от дефектов расположенных внутри металлического бака сильно ослабляются. Одним из современных приборов контроля частичных разрядов в изоляции является R-400.

§3.2. Профилактика изоляции силовых трансформаторов

Для контроля технологического режима обработки изоляции (в ходе сушки, пропитки), проверки состояния изоляции трансформатора перед включением и для профилактических испытаний изоляции в эксплуатации применяются следующие измерения характеристик изоляции:

- а) измерение сопротивления изоляции R_{60} ;
- б) измерение угла диэлектрических потерь $\tan \delta$;
- в) измерение отношения или приращения емкости при низкой и высокой частотах C_2/C_{50} или $\Delta C/C_\infty$;

- г) измерение отношения емкости при высокой и низкой температуре $C_{гор}/C_{хол}$;
- д) химический анализ масла из бака.

В трансформаторах с их сложной изоляцией часто прибегают к измерениям характеристик изоляции по зонам. Обычно измерения проводятся для трех зон: ВН — земля, ВН — НН и НН — земля. В первом случае обмотка НН подключается к экрану измерительного прибора и тем самым из измерения исключаются зоны ВН — НН и НН — земля. Аналогично проводятся измерения для третьего случая. Во втором случае рабочие выводы измерительного прибора подключаются к обмоткам ВН и НН, а экран заземляется. Для возможности выполнения таких зонных измерений все измерительные приборы (мегаомметры, мосты для измерения $\tan \delta$ и C , приборы контроля влажности и др.) снабжаются экранами.

Характеристики изоляции служат обычно индикатором увлажнения изоляции и выпадения шлама на изоляции. Так как наличие шлама можно более точно установить по физико-химическому анализу масла, то измерение характеристик изоляции служит в основном для определения степени увлажнения изоляции. В этом отношении характеристики $\tan \delta$, C_2/C_{50} , $C_{гор}/C_{хол}$ равноценны, и их совместное измерение служит только для более уверенного заключения о результатах испытания. Поэтому часто довольствуются одной характеристикой, например C_2/C_{50} , которая проще всего измеряется.

Разряд во внутренней изоляции трансформатора имеет преимущественно ионизационную форму. Поэтому выявление частичных разрядов может служить хорошим индикатором возникновения и развития разряда, приводящего с течением времени к пробое изоляции трансформатора. Трансформатор возбуждается рабочим или повышенным напряжением со стороны обмотки НН. На выводе обмотки ВН через разделительный конденсатор C , свободно пропускающий колебания высокой частоты, подключается индикатор частичных разрядов.

Измерения частичных разрядов могут вестись в эксплуатационных условиях. Внедрение таких измерений в программу профилактических испытаний целесообразно в первую очередь для мощных трансформаторов со сниженными уровнями изоляции.

Одним из наиболее перспективных направлений в исследовании повреждений работающих трансформаторов является периодический анализ содержания растворенных в масле газов, определяемых хроматографическим методом.

Процессы термического разложения изоляции и ее разрушения электрическими разрядами приводят к выделению газов, растворяющихся в масле. Каждому виду дефекта соответствует характерный набор газов. В табл. 4.1. приведен состав газов, растворенных в масле, характерный для различных дефектов трансформаторов.

Таблица 4.1.

Состав газов, характерный для различных дефектов

Газ	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆
Электрические разряды:							
- дуговые	а	б	г	б	а	г	в
- искровые	а	в	г	в	а	-	г
- частичные	а	в	г	г	в (д)	-	-
Местный нагрев:							
- до 300 °С	г	в	а	в	-	б	г
- до 1000 °С	г	в	г	а	г	г	б
- св. 1000 °С	в	б	г	а	в	г	в

Обозначения: а – основной газ для данного дефекта; б,в – характерный газ соответственно при высоком содержании или малом содержании; г - нехарактерный газ; д – газ при высокой плотности выделяемой энергии.

Кроме указанных газов в масле может содержаться кислород (воздух), наличие которого свидетельствует о нарушении герметичности трансформаторов. Растворенная вода, особенно в комбинации с полярными продуктами старения масла и кислотами, существенно влияет на диэлектрические характеристики жидких и твердых изоляционных материалов. Непрерывный контроль влагосодержания масла на протяжении длительного периода времени и принятие соответствующих мер при внезапном росте или недопустимо высоком влагосодержании поможет продлить жизнь маслонаполненного оборудования, сохранить его высокие технические характеристики и эксплуатационную надежность.

В настоящее время выпускается большой спектр хроматографических установок, позволяющих проводить анализ содержания воды и растворенных газов.

Отечественные установки, содержащие хроматограф, пробоотборники, программное обеспечение результатов анализа и различное вспомогательное оборудование, разработаны во ВНИИЭ (НПФ «Электра»). Эти установки по-

зволяют обнаруживать вредные компоненты при следующей нижней концентрации: вода - 2,0 г/т, воздух - 0,03 %, водород - 0,0005 %, метан, этан, этилен - 0,0001 %, ацетилен - 0,00005 %, оксид и диоксид углерода - 0,002 %.

В ВЭИ была создана и внедрена дистанционная система диагностики ССГ-1, предназначенная для работы в составе АСУТП непрерывного контроля и прогнозирования состояния трансформаторов. Шкаф ССГ-1 устанавливается у трансформатора и подключается к его заземленной системе охлаждения в двух точках с разным давлением масла, чтобы обеспечить его естественную циркуляцию через установку.

За рубежом получили распространение установки непрерывного действия HYDRAN фирмы «Syprotec Corp» (США) различных модификаций, которые также подключаются непосредственно к трансформатору. Они измеряют суммарную концентрацию горючих газов и пересчитывают ее в водородный эквивалент.

Регулярный контроль газов на месте установки трансформатора можно осуществлять с помощью прибора TFGA-P200, применение которого позволяет снизить эксплуатационные расходы и уменьшить количество анализов в лаборатории. Прибор TFGA-P200 - это высокоскоростной газовый микрохроматограф, оптимизированный для измерения семи наиболее важных дефектных газов: водорода, метана, оксида углерода, диоксида углерода, этилена, этана и ацетилена.

Кроме того, разработаны и применяются и другие установки для хроматографического контроля силовых трансформаторов.

Сушка изоляции трансформаторов. Волокнистая изоляция трансформаторов при соприкосновении с атмосферным воздухом или увлажненным маслом впитывает в себя влагу, в результате чего ее электрическая прочность резко снижается и изоляция быстро стареет. Поэтому сушка является важнейшей технологической операцией при производстве и монтаже силовых трансформаторов.

Сушка трансформаторов в заводских условиях проводится в вакуум-сушильных шкафах с паровым или электрическим обогревом и теплоизоляцией. Для ускорения сушки применяется температура 100—110°C, максимально допустимая для волокнистой изоляции трансформатора. Обычно сушка проводится при давлении около 70 мм рт. ст. Дальнейшее снижение давления еще более повышает эффективность сушки, однако требует усиления механической прочности шкафов. Процесс сушки продолжается несколько часов.

Для сокращения времени сушки применяется принудительная циркуляция воздуха по замкнутому циклу с промежуточным осушением воздуха. Весьма эффективен также прогрев обмотки током.

В эксплуатационных условиях сушка изоляции производится в собственном баке с нагревом от паровых обогревателей, воздуходувок или токами нулевой последовательности, пропускаемыми через обмотки.

Контроль процесса сушки производится измерением характеристик изоляции (R_{60} , $\operatorname{tg} \delta$, $\Delta C/C_{\infty}$). Признаком конца сушки является стабилизация величины $\operatorname{tg} \delta$ и снижение $\Delta C/C_{\infty}$ до значения около 10%.

§3.3. Профилактика линейной изоляции

В эксплуатации проверяется электрическая прочность изоляторов гирлянд. Проверка осуществляется по кривым распределения напряжения по изоляторам, которые снимаются с помощью измерительной штанги. Возможно также использование упрощенной штанги, определяющей только наличие нулевых изоляторов в гирлянде.

При пробое подвесных изоляторов из закаленного стекла равновесие внутренних сил в стекле нарушается и стеклянная тарелка изолятора рассыпается. Остатки стекла, заклиненные между шапкой и пестиком, не позволяют пестику выйти из шапки и тем самым удерживают провод от падения на землю. Механическая прочность остатка оказывается достаточной для нормальных эксплуатационных нагрузок. Так как разрушение тарелки изолятора легко обнаруживается осмотром с земли, измерения штангой на стеклянных изоляторах не нужны.

Стержневые изоляторы с большой толщиной фарфора (или стекла) между электродами не могут быть пробиты, и потому измерения с помощью штанги для них также не проводятся.

Кроме того, дистанционная проверка изоляторов производится с использованием инфракрасных и/или электронно-оптических приборов. Одним из наиболее широко используемых приборов для диагностики фарфоровых изоляторов является прибор ультрафиолетовой диагностики «Филин»

Ультрафиолетовый дефектоскоп «Филин – 6» - электронно-оптический дефектоскоп. «Филин – 6» преобразует ультрафиолетовое излучение разрядных

процессов в видимое и совмещает его на экране с изображением объекта контроля в видимом спектре. Выявляет следующие дефекты:

- как нарушение заделки опорных изоляторов и наличие поверхностных микротрещин фарфора;
- наличие и оценка степени загрязнения любых изоляторов;
- нарушение целостности жил проводов ВЛ;
- пробитые (нулевые) фарфоровые изоляторы в гирлянде;
- дефекты монтажа подвесок, внутрифазовых распорок ВЛ, контактных соединений и т. д.

Дефектные нулевые изоляторы заменяются при первом же плановом отключении линии. Кроме того, используются методы замены изоляторов под рабочим напряжением. Эти методы используются, например, в случае обнаружения в одной гирлянде нескольких дефектных изоляторов.

§3.4. Профилактика изоляции вращающихся машин

В процессе изготовления изоляции машины ее электрическая прочность многократно проверяется повышенным напряжением промышленной частоты в течение 1 мин.

Первое испытание изоляции катушек или секций статора и ротора производится до укладки их в паз. Значение испытательного напряжения зависит от мощности и номинального напряжения машины. Статорные катушки или секции машин мощностью до 10 МВ·А испытываются напряжением $2,75U_{\text{ном}} + 4500$ В, изоляция машин мощностью свыше 10 МВ·А - напряжением $2,75U_{\text{ном}} + 6500$ В, а после укладки обмотки в пазы - соответственно напряжениями $2,5U_{\text{ном}} + 2500$ В и $2,5U_{\text{ном}} + 4500$ В.

После пайки лобовых соединений обмоток испытательные напряжения снижаются до значений $2,25U_{\text{ном}} + 2000$ В и $2,25U_{\text{ном}} + 4000$ В, а при выпуске машины в соответствии с требованиями ГОСТ устанавливаются равными $2U_{\text{ном}} + 3000$ В.

Приемо-сдаточные испытания генераторов производятся при напряжениях $0,8(2U_{\text{ном}} + 3000)$ В, что составляет для генераторов 300 МВт $1,72U_{\text{ном}}$, а для генераторов 260 МВт - $1,75U_{\text{ном}}$.

В процессе эксплуатации машин, например турбогенераторов, кроме обычного старения изоляции обмоток статоров, отмечены и другие поврежде-

ния изоляции. При неудовлетворительном закреплении стержней обмоток в пазах наблюдается их вибрация, при этом изоляция механически истирается о стенки паза или расслаивается на выходе из него. При ослаблении прессовки активной стали имеет место вибрация, которая приводит к разрушению изоляции и поломке лепестков стали в зубцовой зоне. Попавшие на поверхность изоляции ферромагнитные тела (стружка, лепестки стали) в магнитном поле вибрируют и повреждают изоляцию. Для определения наличия вибрации используются различные виброанализаторы, которые могут входить в состав технических средств вибродиагностики. Например, к ним можно отнести виброанализатор СД-12М, сборщик-анализатор вибросигналов «Диана-С», виброметр с памятью «Корсар+», виброизмерительный прибор «Янтарь», виброанализатор «Топаз» и т. д.

В машинах с непосредственным водяным охлаждением при нарушении плотности водяного тракта дистиллят может увлажнить изоляцию, что снижает ее электрическую прочность. В эксплуатации имели место также случаи обугливания покровной киперной ленты в лобовых частях обмотки в результате увлажнения непропитанной ленты и возникновения поверхностных разрядов.

В эксплуатации ведется систематический надзор за состоянием изоляции электрических машин. Для своевременного выявления слабых мест изоляция систематически подвергается профилактическим испытаниям.

Контроль состояния изоляции статорных обмоток в основном производится повышенным напряжением промышленной частоты. Оптимальное значение испытательного напряжения и длительность его приложения устанавливаются на основании анализа результатов эксплуатации и с учетом технической и экономической целесообразности. Испытательное напряжение не должно повреждать изоляцию, которая может надежно работать, но должно быть достаточным для того, чтобы выявлять стержни с изоляцией, не обеспечивающей надежной работы машины.

Испытательное напряжение промышленной частоты при периодически проводимых в энергосистемах профилактических испытаниях изоляции в процессе эксплуатации генераторов обычно принимается равным $(1,5-1,7)U_{ном}$. Длительность приложения напряжения составляет 1 мин.

В практике эксплуатации машин применяются и другие виды профилактических испытаний изоляции обмоток статоров: определение сопротивления изоляции обмотки, испытание выпрямленным повышенным напряжением.

Для некоторых типов машин определяется также тангенс угла диэлектрических потерь.

Витковая изоляция электрических машин в условиях эксплуатации испытывается повышенным напряжением возбужденной машины, равным $(1,15-1,3)U_{\text{ном}}$.

Проблемы с изоляцией статоров высоковольтных электродвигателей в основном не возникают мгновенно. Разрушению изоляции предшествует достаточно длительный период времени, когда в месте будущего дефекта изоляции возникают микроразряды, уровень которых постепенно возрастает. Для своевременного обнаружения этих разрядов и оценки скорости их увеличения применяются приборы контроля частичных разрядов. Для этих целей применяется прибор контроля состояния изоляции электродвигателей под напряжением R-500. Этот многоканальный прибор позволяет контролировать состояние изоляции электрических машин в режиме постоянного мониторинга.

Для диагностики электрической изоляции в полевых условиях может применяться система диагностики изоляции IDA-200. Система измеряет емкость и диэлектрические потери ($\text{tg } \delta$) на дискретных частотах ниже и выше промышленной частоты, от 0,1 мГц до 1,0 кГц.

§3.5. Профилактика изоляции кабелей

В эксплуатации кабели подвергаются воздействию рабочего напряжения, коммутационных перенапряжений и в случае электрической связи с воздушными линиями — импульсным перенапряжением. Уровни изоляции кабелей задаются их испытательными напряжениями. При типовых испытаниях к кабелям прикладывается напряжение промышленной частоты и импульсное напряжение.

При контрольных испытаниях электрическая прочность образцов кабеля проверяется приложением повышенного напряжения постоянного тока. Испытательное напряжение постоянного тока принимается равным $5U_{\text{ф.н}}$ (для кабелей с обедненной изоляцией и газовой пропиткой $3,5-4 U_{\text{ф.н}}$). В объем заводских испытаний кабелей входит также измерение сопротивления изоляции, угла диэлектрических потерь, в частности кривой ионизации - кривой $\text{tg } \delta = f(U)$.

Важное значение имеют профилактические испытания кабелей в эксплуатации. Особенно это касается кабелей с вязкой пропиткой, в которых возможно медленное развитие ветвистого разряда и увлажнение, вызванное дефектами монтажа. В среднем срок развития дефектов в кабелях с вязкой пропиткой составляет 1—1,5 года. Цель профилактических испытаний заключается в выявлении дефектных мест и их устранении при ремонте кабельной линии. Профилактические испытания проводятся путем приложения повышенного постоянного напряжения. Выбор постоянного, а не переменного испытательного напряжения обусловлен рядом обстоятельств. При воздействии постоянного напряжения в кабельной изоляции не возникают остаточные повреждения в виде обугливания или подсыхания, даже если приложенное напряжение близко к пробивному. Поэтому для здоровой изоляции можно выбрать очень высокие испытательные напряжения постоянного тока. Эти высокие напряжения способны вызвать электрический пробой в местах с ослабленной изоляцией. Следовательно, испытательное постоянное напряжение обладает избирательной способностью к выявлению местных сосредоточенных дефектов. Другим преимуществом постоянного испытательного напряжения является возможность применения маломощного испытательного оборудования. При большой емкости кабеля испытание на переменном напряжении потребовало бы испытательных трансформаторов относительно большой мощности.

Уровни испытательных напряжений кабелей 3—10 кВ. Выбор этого уровня основывается на величинах коммутационных перенапряжений порядка 2—2,5 U_H , которые не должны вызывать пробоя кабеля. При переходе к постоянному напряжению следует учитывать коэффициент упрочнения $k_{УПР} = U_{нр} / U_{нр\sim}$, который можно принять равным 3,5—4. Отсюда определяется уровень испытательного напряжения:

$$U_{исп} = (2 - 2,5) U_H k_{УПР} = (7 - 8) U_H. \quad (4.8)$$

Эти весьма высокие испытательные напряжения вводились в практику эксплуатации кабельных сетей в течение ряда лет. Чем выше испытательное напряжение, тем больше случаев пробоя (отбраковки) кабелей при испытаниях, но тем меньше пробоев кабеля в рабочих режимах. Очевидно, существует некоторый оптимум в значении $U_{исп}$, определяемый технико-экономическими расчетами. Этот оптимум как раз и лежит около значений $(7 - 8)U_H$. В настоящее время в большинстве энергосистем применяется испытательное напря-

жение $(6 - 7)U_H$ (35— 40 кВ для кабелей 6 кВ). Кабели 110 кВ и выше, включаемые в системы с заземленной нейтралью, испытываются согласно рекомендациям МЭК повышенным постоянным напряжением $4 U_{фН}$.

Испытанию повышенным напряжением подвергается изоляция фаз относительно земли и между собой. Длительность испытаний составляет 10 — 15 мин. Часто одновременно с испытанием повышенным напряжением производится замер токов проводимости (утечки). Сопоставление с данными предыдущих замеров позволяет в ряде случаев судить о проникновении влаги в кабель и вынести решение о повышении испытательного напряжения (в данном испытании) или о сокращении срока между испытаниями.

Место пробоя дефектной изоляции кабеля должно быть обнаружено. Для этого кабель, или точнее - канал пробоя, прожигается с помощью газотронной установки. Когда сопротивление канала пробоя снижается до десятков Ом, с помощью специальной измерительной аппаратуры определяется расстояние до места повреждения кабеля. В больших кабельных сетях испытательное оборудование и оборудование для определения мест повреждения кабеля смонтировано в передвижных лабораториях.

В настоящее время отечественной промышленностью выпускаются следующие специализированные мобильные лаборатории серии МЕГА:

- МЕГА - 1: для диагностики трансформаторов, высоковольтных вводов и испытания оборудования распределительных устройств;
- МЕГА - 2: для испытания силовых кабелей и определения мест повреждений;
- МЕГА – 3: для диагностики высоковольтных выключателей и аккумуляторных батарей;
- МЕГА – 4: полный комплекс диагностики оборудования и кабельных линий;

Все эти лаборатории предназначены для эксплуатации при температуре наружного воздуха от – 40 до 40 °С.

Кроме того, в настоящее время отечественные и зарубежные производители выпускают широкий спектр приборов и комплексов для диагностики кабельных линий, отличающихся конкретным назначением, техническими характеристиками и стоимостью. Применение микропроцессорной техники в этих устройствах позволило повысить точность измерений и, соответственно, достоверность диагноза.

Прибор "ИРК-ПРО версия 5.10.00" предназначен для определения расстояния до участка с пониженным сопротивлением изоляции всех типов симметричных кабелей, измерения сопротивления изоляции и сопротивления шлейфа, омической асимметрии, измерения электрической емкости кабеля.

Кабельный прибор "ИРК-ПРО версия 7" имеет такие же технические характеристики, как и прибор "ИРК-ПРО версия 5.10.00", но в отличие от него имеет следующие особенности:

- позволяет автоматизировать процесс измерения, записи и чтения плановых измерений сопротивления изоляции и емкости;
- возможна совместная работа с компьютером (сохранение и обработка результатов измерений);
- предусмотрена функция самонастройки;
- предусмотрена защита от напряжения на измеряемых кабелях;
- управление прибором осуществляется с помощью микрокнопок. Отсутствуют механические переключатели;
- в условиях помех производит усреднение результатов измерений.

Портативный кабельный мост ПКМ-105 предназначен для измерения параметров кабельных линий и определения мест повреждения телекоммуникационных и силовых кабелей на постоянном и переменном токе. Прибор реализует мостовые методы измерения сопротивления шлейфа, омической асимметрии, емкости кабеля, сопротивления изоляции и расстояния до обрыва или места понижения изоляции кабельной линии.

Особенности прибора:

- высокая точность измерений;
- простота и удобство использования;
- наглядность измерений за счет отображения на экране измерительных схем (текстовый, графический и символьный вид отображения информации);
- упрощение процесса измерения расстояния до места понижения изоляции;
- сохранение в памяти до 200 результатов измерений;
- возможность сравнения параметров кабельной линии с ранее измеренными;
- обмен информацией с компьютером по последовательному интерфейсу RS-232.

Поисковые комплекты КП-100, КП-100С, КП-100У, КП-500, КП-500А, КП-500Б предназначены:

- для точного определения мест повреждений подземных кабелей индукционным и акустическим методами;
- для поиска трассы и определения глубины залегания подземных кабельных линий и коммуникаций при работе в активном режиме (с применением генератора);
- для поиска трассы и определения глубины залегания подземных кабелей, находящихся под напряжением частотой 50 Гц при работе в пассивном режиме (без применения генератора).

Все комплекты работают индукционным и акустическим методами и имеют режим пассивного поиска трассы (ПТ). Комплекты могут использоваться для поиска повреждений кабелей на расстояниях до 20 км (КП-100), 50 км (КП-500) и на глубине залегания подземных кабельных линий и коммуникаций до 11 м. Точность определения повреждений до 0,1 м.

Комплекс «ИСКРА» предназначен для определения места повреждения подземных кабелей электроснабжения 6 - 10 кВ длиной до 6 км. Определение расстояния до места повреждения производится импульсным методом при всех видах повреждений без предварительного полного прожига изоляции, что позволяет непосредственно после замера применить акустический метод нахождения места повреждения. Комплекс используется совместно с дополнительным регулируемым источником постоянного напряжения 0-50 кВ, 15 мА и может комплектоваться дополнительной поисковой аппаратурой обнаружения трассы кабеля и места его повреждения.

На данный момент всё более актуальным становится вопрос испытания и отыскания повреждений кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Специфика данных кабелей заключается в том, что традиционные методы работы (испытание повышенным выпрямленным напряжением) неприемлемы, поскольку ведут к формированию остаточных зарядов в оболочке кабеля и образованию древовидных пробоев изоляции. Всё это в результате приводит к раннему выходу из строя участков кабеля.

Для испытаний изоляции таких кабелей используются СНЧ-установки, формирующие на выходе напряжение сверхнизкой частоты (0,1 Гц). Изменение полярности испытательного напряжения позволяет избежать возникновения основной причины возникновения древовидных пробоев – остаточных зарядов оболочки.

Применительно к силовым кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена гораздо более эффективным и экономичным является щадящий метод испытаний напряжением сверхнизкой частоты 0,1 Гц, которое по величине не превышает более чем в 3 раза номинальное напряжение КЛ. Испытания при очень низких частотах со сменой полярности позволяют выявлять дефекты в изоляции без формирования объемных зарядов в структуре полиэтиленовой изоляции, что приводит к резкому уменьшению ресурса такого кабеля, в отличие от того, как это происходит при приложении постоянного напряжения. Поэтому за рубежом кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена испытываются исключительно напряжением сверхнизкой частоты.

Для испытания СПЭ-кабелей можно применять установки сверхнизкой частоты (СНЧ; или VLF – Very Low Frequency). Такие испытания не влияют на состояние материала изоляции и кабель не теряет своих свойств. Установка VLF подает в кабель постоянное напряжение частотой 0,1 Гц. Испытание производится напряжением, равным $3U_0$, согласно утвержденным отраслевым стандартам (HD 620S1, VDE 0276-620, –621, –1001 и т.д.) или $6U_n$ согласно российским требованиям. С помощью применения напряжения косинусно-прямоугольной формы дефектные места в кабелях с ПЭ, ПВХ а также с бумажно-масляной изоляцией быстро приводятся в состояние пробоя, без ненужной дополнительной нагрузки на кабельную изоляцию. Основной причиной увеличения уровня частичных разрядов при эксплуатации кабелей с изоляцией из СПЭ является рост водных триингов в изоляции. В процессе старения (деструкции) сшитого полиэтилена его эксплуатационные характеристики снижаются. Основная причина этого – водные триинги – повреждения полимера, развивающиеся на технологических дефектах изоляции при совместном действии электрического поля и влаги, диффундирующей из окружающей среды. Вместе с влагой в изоляцию проникают агрессивные вещества. Они разрушают полимерные цепи, приводя к образованию микрополостей, которые в свою очередь служат резервуарами для накопления влаги. Под воздействием электрического поля полярные молекулы воды образуют древовидные структуры, направленные вдоль силовых линий электрического поля - водные триинги.

Электрическая прочность изоляции в области триингов существенно снижается, что повышает напряженность на неповрежденной части изоляции и ускоряет процесс роста триинга. С этим явлением в 70-е годы были связаны многократные отказы кабелей с изоляцией из высокомолекулярного термопластичного полиэтилена и СПЭ. Лабораторные испытания прояснили механизм

его образования и развития в изоляционных материалах, что позволило подобрать новые добавки, обеспечивающие высокую устойчивость сшитых полиэтиленов к образованию водных триингов.

В настоящее время существуют две концепции снижения негативного влияния водных триингов на свойства изоляции:

- согласно первой в полиэтилен вводятся специальные химические добавки, в итоге получается триингостойкий сшитый полиэтилен – ТСПЭ;

- в соответствии со второй создаются макромолекулы, в состав которых, помимо этилена, входит более 5% других химических соединений, в итоге получается сополимерный сшитый полиэтилен – ССПЭ (механическая смесь полиэтилена низкой плотности, сополимера – этилена и этилакрилата или бутилакрилата и антиоксиданта, снижающего скорость окислительных процессов).

Типичная картина триингов в изоляции кабеля, находившегося в эксплуатации представлена на рисунке 4.14.

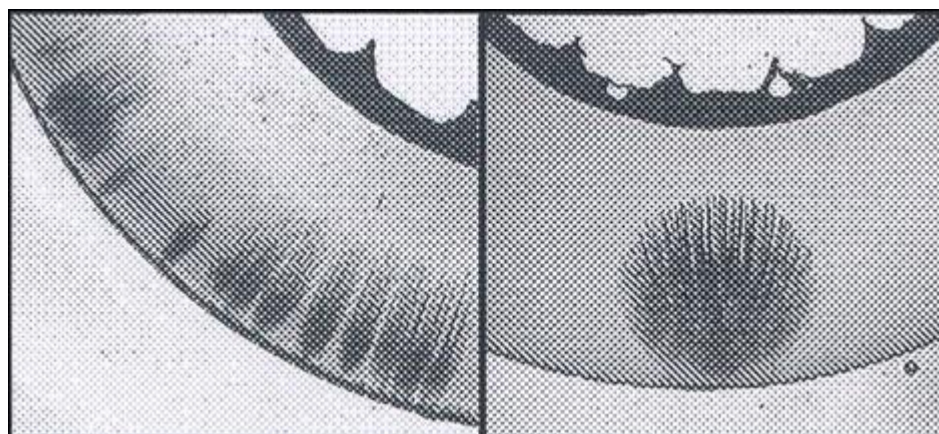


Рис. 4.14. Триинги в изоляции кабеля находившегося в эксплуатации

Испытания высоким постоянным напряжением уменьшают срок эксплуатации кабелей и значительно увеличивают рост водных триингов. В качестве альтернативных методов диагностики состояния кабелей с СПЭ изоляцией предлагаются различные методы неразрушающего контроля: измерение частичных разрядов; измерение тангенса дельта на частоте 0,1 Гц; емкость и тангенс дельта, измеренные в диапазоне частот от 0,1 до 0,02 Гц (диэлектрическая спектроскопия)

Система для проведения испытаний на сверх низких частотах (0,1 Гц) должна удовлетворять следующим требованиям:

- частота повторения должна быть такой низкой, чтобы мощность, высвобождаемая в любом частичном разряде была настолько мала, чтобы не вызывать дальнейшей эрозии и, как следствие, не приводить к росту давления газа.

- смена полярности с одной стороны должна происходить достаточно медленно, чтобы исключить любые переходные процессы, вызываемые бегущими волнами, с другой стороны, она должна быть достаточно быстрой, чтобы сохранить любой пространственный заряд в частичном разряде, откуда он нарастает в направлении противоположного электрода.

Система, удовлетворяющая этим требованиям, должна генерировать колебания частотой 0,1 Гц со сменой полярности в течение полуволны 50 Гц. Каждый цикл начинается с фазы заряда, в которой контролируемый объект, равно как и подключенный параллельно ему опорный конденсатор, заряжаются от источника постоянного тока до достижения желаемого напряжения.

Системы VLFпредназначены для испытания новых и эксплуатируемых силовых кабелей, а также плановых испытаний бумажно-масляных кабелей и кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, переменным напряжением, до 35 кВ.

Главными особенностями установок VLF являются: сверхнизкая частота испытательного напряжения, равная 0.1 Гц и сверхмалый испытательный ток. Эти аспекты являются основополагающими в случае испытания кабеля в бумажно-масляной изоляции, и решающими, при испытаниях кабеля в изоляции из сшитого полиэтилена.

Испытания кабеля напряжением на сверхнизкой частоте и сверхмалым током защищают кабель от повреждения во время испытаний. Для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена это особенно важно, так как испытания кабеля с такой изоляцией постоянным током влекут за собой поляризацию молекул полиэтилена, что в свою очередь приводит к появлению дефектов в изоляции кабеля, которые значительно снижают срок эксплуатации.

Раздел 5. Грозовые перенапряжения и защита от них

Глава 1. Молния как источник грозовых перенапряжений. Параметры молнии. Воздействие тока молнии

§1.1. Молния как источник грозовых перенапряжений

Молния представляет собой разновидность газового разряда при очень большой длине искры. Общая длина канала молнии достигает нескольких километров, причем значительная часть этого канала находится внутри грозового облака. Из-за того, что в облаке образуется несколько изолированных друг от друга скоплений зарядов (в нижней части облака скапливаются преимущественно заряды отрицательной полярности), молния бывает многократной, т.е. состоит из нескольких единичных разрядов, развивающихся по одному и тому же пути, причем каждый разряд начинается лидерным и завершается обратным (главным) разрядом.

Канал лидера, как и канал стримера, заполнен плазмой, следовательно, обладает определенной проводимостью. Верхним концом лидерный канал соединен с одним из заряженных центров в облаке, поэтому часть зарядов этого центра стекает в канал лидера.

По мере продвижения канала лидера под действием создаваемого им электрического поля в земле происходит смещение зарядов, причем заряды, противоположные по знаку зарядам лидера (обычно положительные заряды), стремятся расположиться как можно ближе к головке лидерного канала. В случае однородного грунта эти заряды скапливаются непосредственно под лидерным каналом. Если грунт неоднородный и основная его часть обладает большим удельным сопротивлением, заряды сосредотачиваются в участках с повышенной проводимостью (реки, грунтовые воды). При наличии заземленных возвышающихся объектов (молниеотводы, дымовые трубы, высокие здания, смоченные дождем деревья) заряды стягиваются к вершине объекта, создавая там значительную напряженность поля.

На первых стадиях развития лидерного канала напряженность электрического поля на его головке определяется собственными зарядами лидера и находящимися под облаком скоплениями объемных зарядов. Траектория движения лидера не связана с земными объектами. По мере опускания лидера все большее влияние начинают оказывать скопления зарядов на земле и возвышающихся

ся объектах. Начиная с определенной высоты головки лидера (высота ориентировки), напряженность поля по одному из направлений оказывается наибольшей, и происходит ориентирование лидера на один из наземных объектов. При этом преимущественно поражаются возвышающиеся объекты и участки земли с повышенной проводимостью (избирательная поражаемость). С очень высоких объектов навстречу лидеру развиваются встречные лидеры, которые способствуют ориентированию молнии на данный объект.

После того, как канал лидера достигнет земли или встречного лидера, начинается обратный разряд - быстрая нейтрализация зарядов лидера, сопровождающаяся ярким свечением и нарастанием тока до пиковых значений, варьирующихся от единиц до сотен килоампер. При этом происходит интенсивный разогрев канала (до десятков тысяч кельвин) и его ударное расширение, воспринимаемое на слух как раскат грома. На головке развивающегося вверх обратного разряда имеется область повышенной напряженности электрического поля, под действием которой происходит перестройка канала, сопровождающаяся увеличением плотности зарядов плазмы от 10^{13} - 10^{14} до 10^{15} - 10^{16} 1/м³, благодаря чему проводимость канала увеличивается. Во время развития обратного разряда через место удара проходит ток $i_m = \sigma V$, где V - скорость обратного разряда.

§1.2. Основные параметры молнии

Основной количественной характеристикой молнии является ток, протекающий через пораженный объект, который характеризуется максимальным значением I_m , средней крутизной фронта $a = (di_m/dt)_{cp}$ и длительностью импульса $\tau_{и}$, которая равна времени уменьшения тока до половины максимального значения.

Интенсивность грозовой деятельности характеризуется числом грозовых дней в году или общей годовой продолжительностью гроз в часах, которая более правильная, т.к. число ударов молнии в землю зависит не от числа гроз, а от их общей продолжительности.

Число грозовых дней или число часов в году определяется на основании многолетних наблюдений метеорологических станций, обобщение которых позволяет составить карты грозовой деятельности, на которые наносятся линии равной продолжительности гроз – изокеранические линии.

За расчетный ток молнии принимается апериодический импульс, характеризующийся максимальным значением I_m , кА, и средней крутизной фронта a_m , кА/мкс. Формула для приближенного определения вероятностей $P(I_m)$ и $P(a_m)$, рекомендованных СИГРЕ, приведены в табл. 5.1.

При расчетах молния рассматривается как источник тока. При этом значения I_m и a_m не зависят от сопротивления заземления объекта, волнового сопротивления троса или провода при ударе молнии в провод или трос.

Таблица 5.1

Формулы для приближенного определения вероятностей токов молнии $P(I_m) = P(>I_m)$ и крутизны их фронта $P(a_m) = P(>a_m)$

Параметр	Диапазон	Формула
I_m	3 – 20 кА	$P(I_m) = \exp(-0,008 I_m)$
	20 – 200 кА	$P(I_m) = \exp(-0,03 I_m)$
a_m	10 – 100 кА/мкс	$P(a_m) = \exp(-0,06 a_m)$

§1.3. Воздействие тока молнии

Воздействия молнии принято подразделять на две основные группы: первичные, вызванные прямым ударом молнии, и вторичные, индуцированные близкими ее разрядами или занесенные в объект протяженными металлическими коммуникациями. Опасность прямого удара и вторичных воздействий молнии для зданий и сооружений и находящихся в них людей или животных определяется, с одной стороны, параметрами разряда молнии, а с другой - технологическими и конструктивными характеристиками объекта (наличием взрыво- или пожароопасных зон, огнестойкостью строительных конструкций, видом вводимых коммуникаций, их расположением внутри объекта и т.д.).

Прямой удар молнии вызывает следующие воздействия на объект:

- электрические, связанные с поражением людей или животных электрическим током и появлением перенапряжений на пораженных элементах. 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 мол-

нии неконтролируемы и ее удар может создать опасность поражения током, опасные напряжения шага и прикосновения, перекрытия на другие объекты;

- термические, связанные с резким выделением теплоты при прямом контакте канала молнии с содержимым объекта и при протекании через объект тока молнии. Выделяемая в канале молнии энергия определяется переносимым зарядом, длительностью вспышки и амплитудой тока молнии; в 95% случаев разрядов молнии эта энергия (в расчете на сопротивление 1 Ом) превышает 5,5 Дж, она на два-три порядка превышает минимальную энергию воспламенения большинства газо-, паро- и пылевоздушных смесей, используемых в промышленности. Следовательно, в таких средах контакт с каналом молнии всегда создает опасность воспламенения (а в некоторых случаях взрыва), то же относится к случаям проплавления каналом молнии корпусов взрывоопасных наружных установок. При протекании тока молнии по тонким проводникам создается опасность их расплавления и разрыва;

- механические, обусловленные 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. Контакт с каналом молнии может вызвать резкое паро- или газообразование в некоторых материалах с последующим механическим разрушением, например, расщеплением древесины или образованием трещин в бетоне.

Вторичные проявления молнии связаны с действием на объект электромагнитного поля близких разрядов. Обычно это поле рассматривают в виде двух составляющих: первая обусловлена перемещением зарядов в лидере и канале молнии, вторая - изменением тока молнии во времени. Эти составляющие иногда называют электростатической и электромагнитной индукцией.

Электростатическая индукция проявляется в виде перенапряжения, возникающего на металлических конструкциях объекта и зависящего от тока молнии, расстояния до места удара и сопротивления заземлителя. При отсутствии надлежащего заземлителя перенапряжение может достигать сотен киловольт и создавать опасность поражения людей и перекрытий между разными частями объекта.

Электромагнитная индукция связана с образованием в металлических контурах ЭДС, пропорциональной крутизне тока молнии и площади, охватываемой контуром. Протяженные коммуникации в современных производственных зданиях могут образовывать охватывающие большую площадь контуры, в

которых возможно наведение ЭДС в несколько десятков киловольт. В местах сближения протяженных металлических конструкций, в разрывах незамкнутых контуров создается опасность перекрытий и искрений с возможным рассеянием энергии около десятых долей джоуля.

Еще одним видом опасного воздействия молнии является занос высокого потенциала по вводимым в объект коммуникациям (проводам воздушных линий электропередачи, кабелям, трубопроводам). Он представляет собой перенапряжение, возникающее на коммуникации при прямых и близких ударах молнии и распространяющееся в виде набегавшей на объект волны. Опасность создается за счет возможных перекрытий с коммуникации на заземленные части объекта. Подземные коммуникации также представляют опасность, так как могут принять на себя часть растекающихся в земле токов молнии и занести их в объект.

Глава 2. Защита от прямых ударов молнии.

Зоны защиты стержневых молниеотводов

§2.1. Защита от прямых ударов молнии

Молниеотводы как средство защиты от прямых ударов молнии применялись задолго до начала нашей эры, но получили всеобщее признание только в середине XVIII века в результате работ Ломоносова и Франклина.

Назначение молниеотводов — воспринять подавляющее число ударов молнии в пределах защищаемой территории и отвести ток молнии в землю.

Каждый молниеотвод состоит из молниеприемника, возвышающегося над защищаемым объектом, заземлителя и токоотвода, соединяющего молниеприемник с заземлителем. По типу молниеприемников различают стержневые и тросовые молниеотводы. Стержневые молниеотводы выполняются в виде вертикально установленных стержней (мачт), соединенных с заземлителем, а тросовые — в виде горизонтально подвешенных тросов. Металлический стержневой молниеотвод или опора одновременно выполняют функции токоотвода. Если же молниеприемник молниеотвода (стержень, трос) расположен на изолирующих опорах (дымовые трубы, деревянные опоры), то по ним прокладываются тросы, соединяющие молниеприемник с заземлителем.

Защитное действие молниеотводов основано на явлении избирательной поражаемости молнией высоких объектов. Высота над поверхностью земли, при которой лидер начинает ориентироваться по направлению к наиболее высокому наземному объекту, называется высотой ориентировки молнии (Н). Если головка лидера на высоте ориентировки находится в точке, расположенной над молниеотводом, то разряд поразит молниеотвод. По мере удаления точки ориентировки от молниеотвода повышается вероятность удара молнии в землю, а при достаточном удалении точки ориентировки от молниеотвода разряды будут поражать в основном землю.

Если вблизи молниеотвода поместить более низкий по высоте защищаемый объект, то при определенном расстоянии между молниеотводом и объектом разрядное напряжение промежутка лидер молнии — объект будет всегда больше разрядных напряжений промежутков лидер — молниеотвод и лидер — земля. Объект будет защищен от прямого удара молнии.

Необходимым условием надежной защиты является хорошее заземление молниеотвода, так как при ударе молнии в плохо заземленный молниеотвод на нем создается весьма высокое напряжение, способное вызвать пробой с молниеотвода на защищаемый объект.

§2.2. Зоны защиты молниеотводов

Зоной защиты принято называть определенное пространство вокруг молниеотвода: удары молнии в объект, полностью расположенный в этом пространстве, маловероятны. Поскольку разрядные напряжения длинных воздушных промежутков имеют значительные статистические разбросы, молниеотводы обеспечивают защиту объекта лишь с некоторой, но достаточно высокой степенью надежности (до 0,999). Зоны защиты молниеотводов определяются опытным путем на моделях. При этом принимается, что зоны защиты реальных молниеотводов геометрически подобны зонам, полученным для лабораторных моделей. В качестве «модели» молнии используется импульсный искровой разряд (рис. 5.1), который в длинных промежутках имеет две основные стадии развития — лидерную и главную - и обладает, таким образом, качественным сходством с молнией.

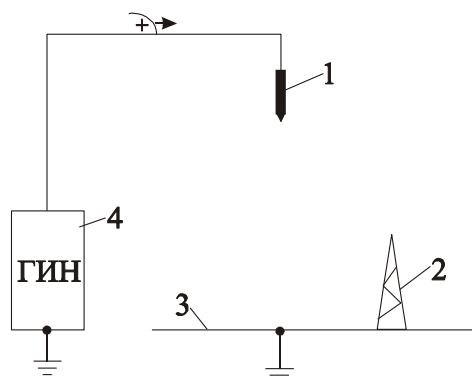


Рис. 5.1. Схема опытов по определению зон защиты:

1 - электрод имитирующий конец лидерного канала на высоте ориентировки; 2 - модель молниеотвода; 3 - заземленная металлическая плоскость; 4 - генератор импульсных напряжений

Справедливость принятой методики определения зон защиты не может быть строго доказана, поэтому полученные в лаборатории зоны защиты имеют до некоторой степени условный характер. Однако надежность разработанных на основе лабораторных экспериментов рекомендаций подтверждена многолетним опытом эксплуатации молниеотводов, и это дает возможность с уверенностью пользоваться этими рекомендациями.

Определение радиуса зоны защиты на высоте h_x производится с помощью стержня высотой h_x , имитирующего защищаемый объект (см. рис. 5.2). Верхний электрод, модель молниеотвода и модель объекта находятся в одной плоскости и перемещаются друг относительно друга. При каждом взаимном расположении электродов производится определенное число разрядов. В результате находится максимальное расстояние r_x между объектом и молниеотводом, при котором объект не поражается разрядами. Это расстояние r_x является радиусом зоны защиты молниеотводов на высоте h_x .

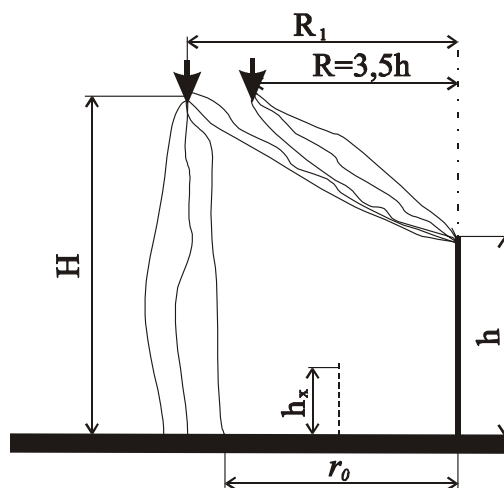


Рис. 5.2. Определение на модели зоны защиты стержневого молниеотвода

Чем больше разрядов производится при каждом расположении электродов, тем с большей надежностью определяется радиус зоны защиты и тем меньше вероятность поражения объекта, расположенного в зоне защиты молниеотвода.

Аналогично производится определение зон защиты систем стержневых молниеотводов и тросовых молниеотводов.

Зоны защиты стержневых молниеотводов. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода (рис. 5.3) представляет собой пространство вблизи молниеотвода, ограниченное поверхностью вращения в виде «шатра», образующая, которой может быть найдена по эмпирической формуле

$$r_x = p \frac{1,6}{1 + \frac{h_x}{h}} \sqrt{h - h_x}, \quad (5.1)$$

где $p=1$ при $h \leq 30$ м, $p = \sqrt{30/h} = 5,5/\sqrt{h}$ при $h=30 - 100$ м.

Остальные обозначения видны на рисунке. Превышение высоты молниеотвода над высотой защищаемого объекта называется активной высотой молниеотвода ($h - h_x = h_a$).

Вместо использования (5.1) можно применить упрощенное построение очертаний защитной зоны, заменив криволинейную образующую ломаной линией (рис. 5.3). Один из отрезков этой ломаной ab является частью прямой, соединяющей вершину молниеотвода с точкой на поверхности земли, удаленной на расстояние $0,75rh$ от оси молниеотвода, а другой отрезок bc представляет собой часть прямой, соединяющей точку молниеотвода на высоте $0,8h$ с точкой на расстоянии $1,5rh$ от молниеотвода.

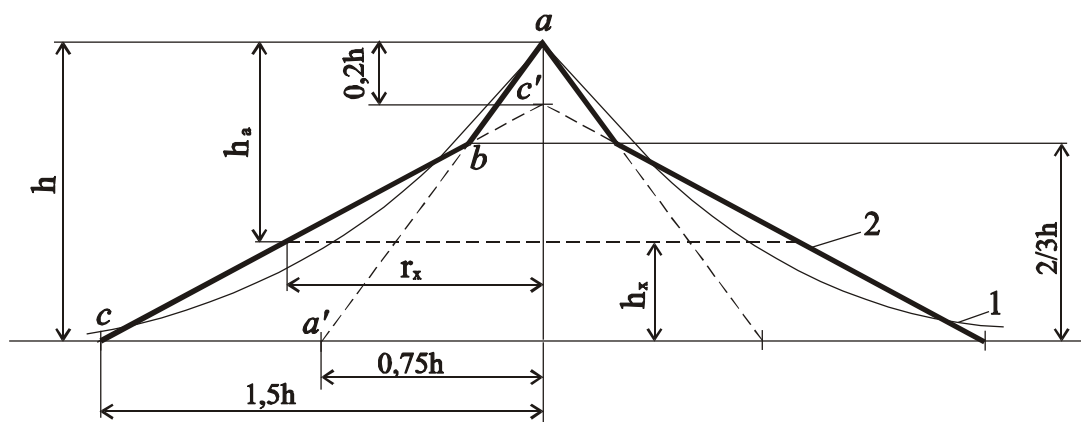


Рис. 5.3. Зона защиты стержневого молниеотвода (1) и ее упрощенное построение (2)

Зона защиты двух стержневых молниеотводов имеет значительно большие размеры, чем сумма зон защиты двух одиночных молниеотводов. Выше отмечалось, что при $R = 3,5h$ (рис. 5.2) все разряды попадают в молниеотвод (R называется радиусом зоны 100%-ного попадания). Очевидно, что если два молниеотвода находятся на расстоянии $a=2R=7h$, то точка поверхности, лежащая посередине между молниеотводами, не будет поражаться молнией. Если нужно защитить точку, находящуюся посередине между молниеотводами высотой h на высоте h_o , то расстояние между молниеотводами на высоте h_o должно составлять $a < 7p(h - h_o)$. Если известны высота и расстояние между молниеотводами, то высота защищенной точки посередине между молниеотводами находится как:

$$h_o = h - a/7p. \quad (5.2)$$

Внутренняя часть зоны защиты двух стержневых молниеотводов (рис. 5.4) в плоскости, проходящей через оба молниеотвода, ограничивается дугой окружности, которую можно построить по трем точкам: две из них — вершины молниеотводов, а третья расположена посередине между молниеотводами на высоте h_o . Внешняя часть зоны защиты строится так же, как и для одиночных стержневых молниеотводов. Построение сечений зоны защиты понятно из рис. 5.4.

Такие объекты, как открытые распределительные устройства подстанций, располагаются на достаточно большой территории и поэтому защищаются несколькими молниеотводами. В этом случае внешняя часть зоны защиты определяется так же, как и зона защиты двух молниеотводов. Объект высотой h_x , находящийся внутри остроугольного треугольника или прямоугольника, в вершинах которого установлены молниеотводы, защищен в том случае, если диаметр окружности, проходящей через вершины треугольника, в которых установлены молниеотводы, или диагональ прямоугольника (см. рис. 5.5), в углах которого находятся молниеотводы, удовлетворяют условию:

$$D \leq 8p(h - h_x) = 8ph_a. \quad (5.3)$$

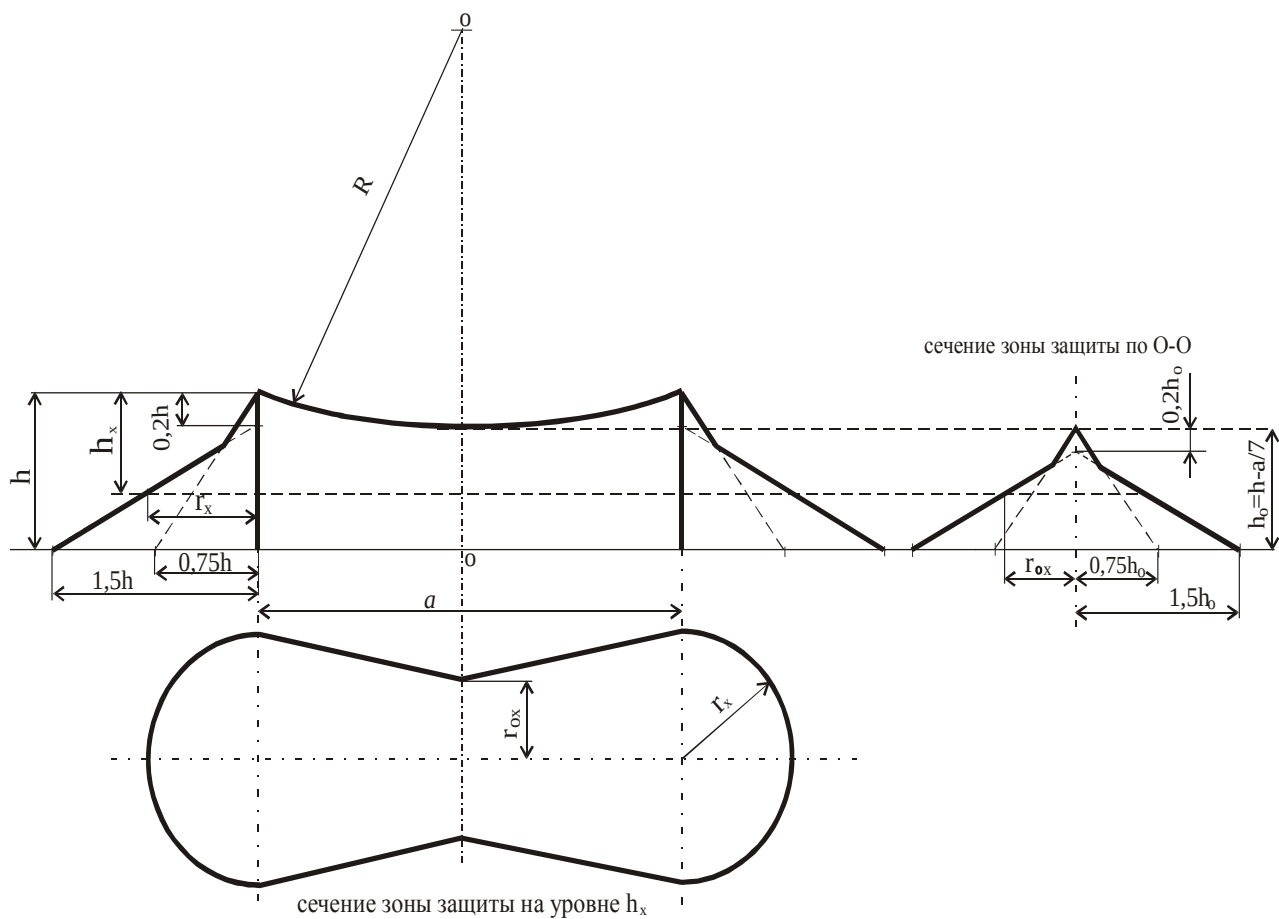


Рис. 5.4. Зона защиты двух стержневых молниеотводов

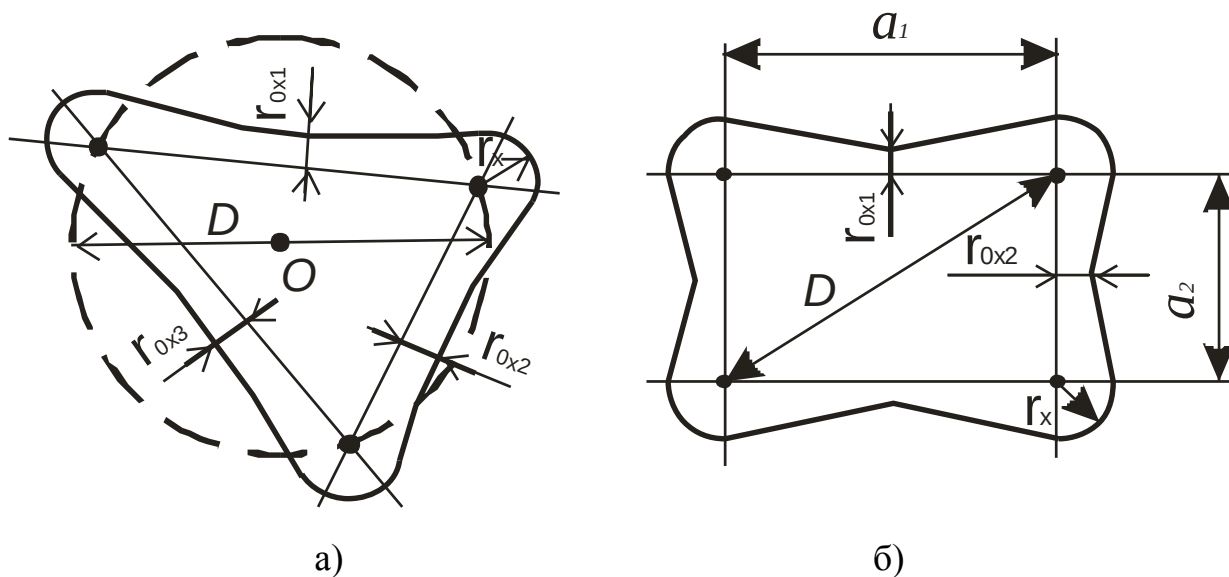


Рис. 5.5. Сечение зоны защиты на высоте h_x , образованных тремя (а) и четырьмя (б) молниеотводами высотой h

При произвольном расположении молниеотводов условие (5.3) должно быть проверено для каждых трех ближайших друг к другу молниеотводов в отдельности. При всех условиях высота h_x должна быть меньше фиктивной высоты h_o , определенной для каждой отдельно взятой пары молниеотводов.

§2.3. Конструктивное выполнение молниеотводов

В качестве несущих устройств для крепления токоведущих частей молниеотводов должны там, где это возможно, использоваться конструкции самих защищаемых объектов. Например, на подстанциях молниеприемники могут устанавливаться на металлических порталах, предназначенных для подвески ошиновки, а сами порталы могут использоваться в качестве токоотводов, соединяющих молниеприемники с заземлителем.

Для отдельно стоящих молниеотводов в качестве несущих элементов используются железобетонные или деревянные стойки (при высоте до 20 м). Для токоотвода используется металлическая арматура железобетонных стоек, по деревянным стойкам прокладывается специальный токоведущий спуск к заземлителю. При высоте более 20 м применяют стальные решетчатые конструкции. Рекомендуется молниеотводы выполнять в виде свободно стоящих конструкций без растяжек. Сечение токоведущих частей молниеотвода определяется их термической стойкостью.

Глава 3. Защита линии электропередачи от молнии.

Применение тросов для защиты линии электропередачи. Зоны защиты тросов. Рекомендуемые способы молниезащиты линий

§3.1. Защита линии электропередачи от молнии

Общие сведения. Распределительные устройства могут быть достаточно надежно защищены от прямых ударов молнии с помощью молниеотводов. Линии электропередачи с той же степенью надежности защитить невозможно. Волны перенапряжений, возникающие на линиях при ударах молнии, доходят до подстанций и могут представлять опасность для установленного там элек-

трооборудования. Такой же опасности могут подвергаться отдельные места на линии, имеющие ослабленную изоляцию, или особенно ответственные участки (транспозиционные опоры, пролеты пересечения, переходы через транспортные магистрали, населенные пункты, большие реки). В этих случаях наряду с защитой от прямых ударов применяется защита от набегающих волн. Для предупреждения перекрытия или пробоя рассматриваемой изоляционной конструкции параллельно ей следует присоединить искровой промежуток (ИП), вольт-секундная характеристика которого с учетом разброса должна в идеальном случае лежать ниже вольт-секундной характеристики защищаемой изоляции. При соблюдении этого требования набегание импульса вызывает во всех случаях пробой ИП с последующим резким падением («срезом») напряжения на ИП и на изоляции. Вслед за импульсным током через искровой промежуток по ионизированному пути устремляется ток, обусловленный напряжением промышленной частоты, — сопровождающий ток. Если установка работает с заземленной нейтралью или пробой ИП произошел в двух или трех фазах, то дуга сопровождающего тока может не погаснуть и импульсный пробой перейдет в устойчивое короткое замыкание, приводящее к отключению установки. Для того чтобы этого избежать, следует обеспечить гашение дуги сопровождающего тока через ИП.

Устройства, обеспечивающие не только защиту изоляции от перенапряжений, но и гашение дуги сопровождающего тока в течение короткого времени, меньшего, чем время действия релейной защиты, называются защитными разрядниками в отличие от обычных искровых промежутков, которые получили название защитных промежутков (ПЗ). Существуют два типа разрядников, которые отличаются принципиально различными способами гашения дуги, — трубчатые и вентильные разрядники. В трубчатых разрядниках дуга гаснет за счет интенсивного продольного дутья; в вентильных разрядниках — благодаря уменьшению сопровождающего тока с помощью сопротивления, которое включается последовательно с искровым промежутком. Далее будет показано, что вентильные разрядники, уступая в простоте устройства и дешевизне, трубчатым разрядникам, обеспечивают наиболее надежную защиту изоляции и поэтому применяются в качестве основного аппарата для защиты подстанций от набегающих волн.

Грозозащита линий электропередачи. Грозовые перенапряжения на линиях электропередачи возникают как при непосредственных поражениях линии грозowymi разрядами (перенапряжения прямого удара молнии), так и при

разрядах молнии в землю в окрестности линии (индуктированные перенапряжения). Перенапряжения прямого удара молнии представляют наибольшую опасность, и грозозащита линий должна ориентироваться именно на этот вид перенапряжений.

Ранее было показано, что удар молнии в объект может произойти в тех случаях, когда головка лидерного канала на высоте ориентировки находится в пределах некоторого расстояния от объекта (для стержневого молниеотвода оно равно $3,5h$). Для линии электропередачи соответствующее расстояние принимается равным $3h$. Таким образом, линия длиной L , км, со средней высотой подвеса h , м, принимает на себя удары с площади, км², $S = 2 \cdot 3hL10^{-3}$.

Так как число ударов на 1 км² на 1 грозовой час равно 0,067, то число поражений линии в год N при n грозовых часах в году равно:

$$N = 0,067n6hL10^{-3} = 0,4nhL10^{-3}. \quad (5.4)$$

Линия электропередачи может поражаться ударами молнии с различными максимальными значениями тока I_m и скоростями его нарастания (крутизной) a . Перекрытие изоляции линии произойдет только в том случае, если созданное ударом молнии напряжение на ее изоляции превысит импульсную прочность этой изоляции. Так как это происходит не при каждом ударе молнии, число перекрытий изоляции линии в год равно:

$$N_{\text{пер}} = NP_{\text{пер}}, \quad (5.5)$$

где $P_{\text{пер}}$ - вероятность перекрытия изоляции при ударе молнии.

Число грозовых отключений линии, вообще говоря, может быть меньше числа перекрытий изоляции. Отключение линии происходит только при переходе импульсного перекрытия изоляции в поддерживаемую рабочим напряжением силовую дугу, время существования которой равно или больше времени действия релейной защиты. Вероятность перехода импульсного перекрытия в силовую дугу зависит от ряда факторов (мощность источника, наличие ветра и т. д.). Однако определяющее значение имеет градиент рабочего напряжения вдоль пути перекрытия (т. е. напряжение на единицу длины дуги). Если этот градиент окажется недостаточным, силовая дуга может вообще не возникнуть и отключения линии не произойдет.

§3.2. Применение тросов для защиты линии электропередачи

На линиях с металлическими и железобетонными опорами применяется тросовая защита. В отсутствие тросов защитный уровень этих линий очень низкий и отключение линий вследствие грозовых поражений происходит очень часто. Многолетний опыт эксплуатации линии на металлических опорах показал, что хорошо заземленные тросы обеспечивают малое удельное число отключений линий. Подвеска тросов незначительно повышает стоимость линии.

На линиях 110 кВ и ниже с деревянными опорами подвеска тросов требует применения опор большой длины, что приводит к значительному удорожанию стоимости линии и утяжелению конструкции опор. При этом линии на деревянных опорах без троса обладают удовлетворительными грозозащитными характеристиками, а стоимость их значительно ниже стоимости линий на металлических и железобетонных опорах. Поэтому на линиях с деревянными опорами тросовая защита используется только на участках, примыкающих к подстанциям, где по условиям защиты подстанционной изоляции необходимо предотвратить прямой удар молнии в провода.

§3.3. Зоны защиты тросовых молниеотводов

Вертикальное сечение зоны защиты тросового молниеотвода строится так же, как для стержневого, но с другими числовыми коэффициентами. Упрощенное построение зоны защиты одиночного троса приведено на рис. 5.6.

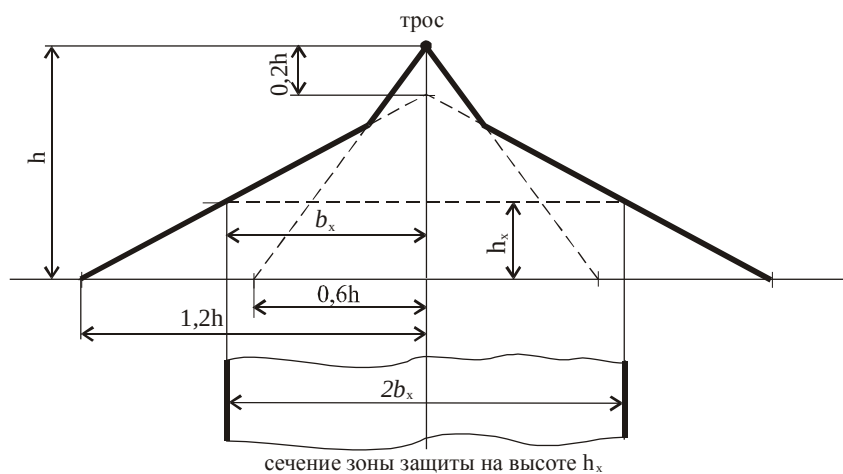


Рис. 5.6. Зона защиты тросового молниеотвода

Внешняя часть зоны защиты двух параллельных тросовых молниеотводов, расположенных на расстоянии a , определяется так же, как и для одиночного троса. Внутренняя часть ограничена поверхностью, которая в сечении плоскостью, перпендикулярной тросам, дает дугу окружности; эта дуга проходит через три точки: два троса и точку посередине между ними на высоте

$$h_o = h - a/4p. \quad (5.6)$$

Условие защиты среднего провода при горизонтальном расположении проводов и двух тросах (см. рис. 5.7) практически всегда осуществляется со значительным запасом:

$$a < 4p(h - h_x) = 4p(h_{mp} - h_{np}). \quad (5.7)$$

При рассмотрении условий защиты внешних проводов (или любого провода при одном тросе) обычно пользуются понятием не зоны защиты, а угла защиты α . Для защитной зоны на высоте более $0,7 h$ (рис. 5.6) $\alpha = \arctg 0,6 = 31^\circ$.

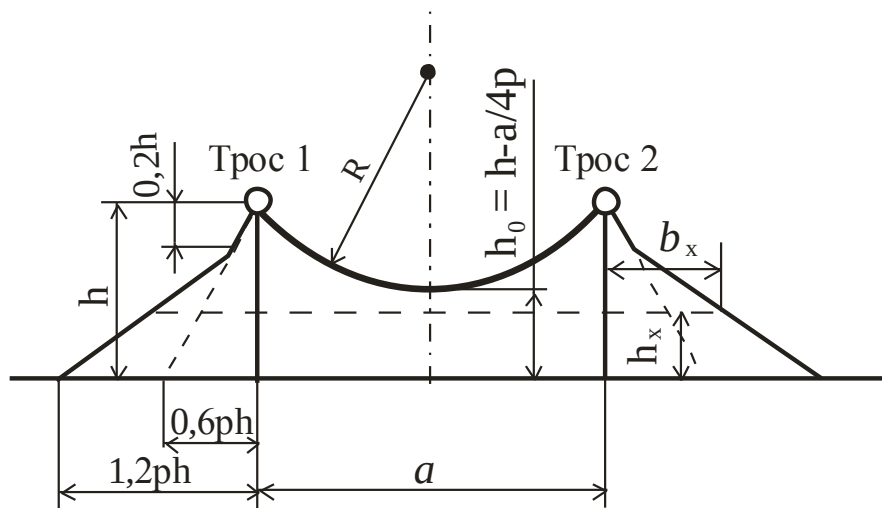


Рис. 5.7. Сечение зоны защиты двух параллельных тросовых молниеотводов

Наличие защитных тросов не гарантирует 100%-ной надежности защиты; всегда существует некоторая вероятность поражения провода — «прорыва молнии мимо тросовой защиты». В отличие от подстанций, территории которых поражаются молнией 1 раз в несколько лет, линии подвергаются прямым ударам десятки раз за грозовой сезон. Поэтому, даже весьма малая вероятность прорыва молнии имеет существенное значение. Эта вероятность подсчитывается по эмпирической формуле

$$\lg P_\alpha = (\alpha \sqrt{h_{on}} / 90) - 4, \quad (5.8)$$

где h_{on} — высота опоры.

При $\alpha = 30^\circ$ и $h_{on} = 16$ м $P_\alpha \approx 0,002$, а при $h_{on} = 36$ м $P_\alpha = 0,01$. Для снижения вероятности прорыва молнии уменьшают защитные углы на высоких опорах путем раздвигания тросостоек к концам траверсы; условия защиты среднего провода при этом обычно сохраняются.

§3.4. Рекомендуемые способы молниезащиты линий

3.4.1. Средства молниезащиты ВЛ

Показателем грозоупорности ВЛ является удельное число грозовых отключений $n_{откл}$ линии на 100 км длины и 100 гр. ч в году. Для конкретных линий рассчитывается число грозовых отключений на полную длину и 1 год:

$$N_{откл} = n_{откл} \frac{l_{ВЛ}}{100} \frac{D_{г}}{100} \quad (5.9)$$

Для количественной оценки качества молниезащиты линий применяются следующие критерии:

1. Уровень грозоупорности – предельный (критический) ток молнии $I_{кр}$, при котором еще не происходит импульсного перекрытия изоляции.
2. Кривая опасных токов молнии. Применяется в тех случаях, когда опасность перекрытия определяется не только максимальным значением тока молнии I_m , но и его крутизной a_m . Она представляет собой нижнюю границу области опасных сочетаний этих двух параметров молнии.
3. Показатель надежности молниезащиты – ожидаемое среднее число лет между грозовыми отключениями T_g , приходящееся обычно на 100 км и 100 гр.ч.

Молниезащита ВЛ имеет целью уменьшение до экономически обоснованного числа грозовых отключений линий.

К основным средствам молниезащиты ВЛ относят:

1. Защиту от прямых ударов молнии с помощью тросовых молниеотводов, подвешенных на линиях напряжением 110 кВ и более на металлических и железобетонных опорах. Сооружение воздушных линий 110 кВ и выше без тросов допускается:

- в районах с числом грозовых часов в году менее 20;
- на отдельных участках линии в районах с плохо проводящими грунтами ($\rho \geq 10^3$ Ом·м);

- на участках трассы с расчетной толщиной стенки гололеда более 25 мм.

Линии на деревянных опорах имеют достаточную грозоупорность, поэтому тросы на таких линиях применяются только на подходах к подстанциям.

Применение тросов на линии 35 кВ малоэффективно вследствие невысокой импульсной прочности линейной изоляции и большой вероятности перекрытия с троса на провод при ударе молнии в трос. На линиях 3 – 10 кВ тем более применение тросов бесполезно.

2. Выполнение сопротивления заземления опор в соответствии с требованиями /1/. Снижение сопротивления заземления опор обеспечивает уменьшение вероятности обратного перекрытия с опоры на провод при прямых ударах молнии в опору.

3. Автоматическое повторное включение (АПВ), предотвращающее перерыв в передаче энергии при грозовом перекрытии линейной изоляции, рассматриваемое как эффективное средство молниезащиты. Поскольку частая работа АПВ (при большом числе грозовых перекрытий) усложняет эксплуатацию и сокращает межремонтный период выключателей, то его целесообразно применять в комплексе с другими средствами молниезащиты.

4. Увеличение числа изоляторов в гирлянде часто поражаемых опор, в частности очень высоких переходных опор, что повышает импульсную прочность линейной изоляции.

5. Применение трубчатых разрядников или защитных промежутков (реже нелинейных ограничителей перенапряжений и вентильных разрядников) для защиты ослабленной изоляции или отдельных опор.

6. Соблюдение нормированных расстояний по воздуху (табл. 5.2) при пересечении воздушных линий между собой и с линиями связи, а в случае линий на деревянных опорах применение РТ, которые устанавливаются на опорах, ограничивающих пролет пересечения.

Подвеска заземленных тросов позволяет уменьшить в сотни раз число ударов молнии непосредственно в провода, представляющих наибольшую опасность для изоляции ВЛ: в этом случае гирлянды ВЛ 110-1150 кВ перекрываются при небольших токах молнии (от нескольких килоампер до 30 кА). Расположение тросов относительно проводов должно обеспечить наибольшую эффективность тросовой защиты при преобладающем для данной ВЛ типе грозовых отключений (прорывы или обратные перекрытия). В первом случае снижение вероятности прорыва достигается уменьшением угла защиты троса (тро-

сов), в том числе подвеской тросов с отрицательным углом защиты, и увеличением расстояния между тросом и проводом по вертикали. Во втором случае вероятность обратного перекрытия уменьшается при увеличении числа тросов, разнесении их на большее расстояние, в том числе при подвеске части тросов под проводами. Перечисленные мероприятия способствуют уменьшению импульсного тока через опору и усиливают электростатическое экранирование проводов тросами.

Таблица 5.2

Наименьшее расстояние, м, между проводами и тросами пересекающихся ВЛ

Пересечение	Длина пролета не более, м	Наименьшее расстояние от места пересечения до ближайшей опоры, м					
		30	50	70	110	120	150
ВЛ 500-330 кВ между собой и с ВЛ более низкого напряжения	200	5	5	5	5,5	-	-
	300	5	5	5,5	6	6,5	7
	450	5	5,5	6	7	7,5	8
ВЛ 220-150 кВ между собой и с ВЛ более низкого напряжения	200	4	4	4	4	-	-
	300	4	4	4	4,5	5	5,5
	450	4	4	5	6	6,5	7
ВЛ 110-20 кВ между собой и с ВЛ более низкого напряжения	200	3	3	3	4	-	-
	300	3	3	4	4,5	5	-
ВЛ 10 кВ между собой и с ВЛ более низкого напряжения	100	2	2	-	-	-	-
	150	2	2,5	2,5	-	-	-

Для снижения потерь энергии от индуктированных в тросах токов, а также для использования тросов в качестве канала высокочастотной связи или в целях емкостного отбора мощности грозозащитный трос крепится к опоре на изоляторах, снабженных шунтирующими искровыми промежутками. При разряде молнии искровые промежутки пробиваются уже во время развития лидерного канала, и в стадии главного разряда трос работает как заземленный наглухо.

Снижение сопротивлений заземления опор ВЛ с тросом является одним из основных средств уменьшения вероятности импульсного перекрытия изоля-

ции при ударе молнии в трос или опору. Исключением являются ВЛ или участки на очень высоких опорах (переходы через реки и т.п.), грозоупорность которых в значительной мере определяется индуктивностью опор.

В тех случаях, когда не удастся обеспечить требуемое низкое сопротивление заземления опор, тросовая защита может оказаться малоэффективной, так как большинство ударов молнии в трос или опору будет приводить к перекрытиям изоляции.

Сопротивление заземления металлических и железобетонных опор на ВЛ без троса должно быть по возможности низким. Это способствует уменьшению вероятности перекрытия изоляции при ударах в опору и уменьшению вероятности перехода однофазных перекрытий в многофазные при ударах молнии в опоры и провода.

В обычных грунтах с удельным сопротивлением не более 100-300 Ом·м выполнение заземлений опор с достаточно низким сопротивлением не вызывает больших трудностей и их стоимость невысока. В сухих песчаных и скальных грунтах для этого приходится применять глубинные вертикальные заземлители, достигающие хорошо проводящих слоев грунта, или горизонтальные (лучевые) заземлители длиной до 60 м. Применение сплошных противовесов, проложенных в земле от опоры к опоре, часто неэкономично, так как даже в грунтах высокого удельного сопротивления большая часть импульсного тока стекает с противовеса в землю на участке 60 - 100 м от опоры. Прокладка параллельных лучей нецелесообразна из-за снижения коэффициента их использования вследствие взаимного экранирования. При применении двух лучей их следует направлять в противоположные стороны вдоль оси ВЛ. Электромагнитная связь между проводами ВЛ и лучами в земле не оказывает существенного влияния на эффективность заземлителя.

Для повышения грозоупорности ВЛ, проходящих в районах с высоким удельным сопротивлением грунта, по совокупности факторов (трудности прокладки, повреждаемость в эксплуатации, низкая эффективность при стекании тока молнии) можно увеличить число тросов (с подвеской одного или двух из них под проводами).

Импульсная прочность изоляции ВЛ с тросом определяется типом изоляторов, длиной гирлянды, длиной воздушных промежутков на опоре и промежутка трос-провод в пролете. Тип изоляторов и длина гирлянды для ВЛ всех классов напряжения выбираются не по соображениям грозозащиты, а по рабочему напряжению. Увеличение длины гирлянды и скоординированных с ней

воздушных промежутков на опоре повышает капитальные затраты и практически не используется как средство грозозащиты.

Изоляцию очень высоких переходных опор, выбранную по рабочему напряжению, рекомендуется усиливать на 15%. Эта мера позволяет компенсировать накапливаемые в эксплуатации поврежденные изоляторы и исключить проведение труднодоступных профилактических и ремонтных работ по замене изоляторов на переходных опорах в течение 25 лет.

Грозоупорность ВЛ 6-35 кВ на железобетонных и металлических опорах существенно повышается при использовании для подвески нижних проводов изоляционных траверс из пластических материалов. Кроме того, на ВЛ 6-10 кВ для повышения грозоупорности в настоящее время могут использоваться разрядники длинно-искровые (РДИ), принцип действия которых, характеристики и конструкция приведены в /9,20/.

Особое внимание уделяется защите опор с ослабленной изоляцией. На ранее построенных ВЛ с деревянными опорами без троса к ним относятся:

- отдельные металлические или железобетонные опоры;
- опоры, ограничивающие тросовый подход к ПС;
- опоры отпаек, подключенных через трехполюсные разъединители, скомплектованные на металлической раме;
- транспозиционные опоры.

К ослабленной изоляции относятся также воздушные промежутки, образующиеся при пересечении воздушных линий между собой.

При наличии на трассе опор с ослабленной изоляцией грозоупорность ВЛ снижается вследствие увеличения вероятности перекрытия ослабленной изоляции при ударе молнии в такую опору и от волн атмосферных перенапряжений, набегających на нее с прилегающих участков трассы с нормальной изоляцией.

Защита опор с ослабленной изоляцией ранее осуществлялась с помощью трубчатых разрядников, обеспечивающих гашение дуги после импульсного перекрытия. Недостатком трубчатых разрядников является нестабильность их характеристик, что нередко приводит к развитию аварий при отказе и разрушении разрядников. Обслуживание трубчатых разрядников трудоемко. Более перспективно использование ОПН. Опоры с ослабленной изоляцией могут защищаться также специально предусмотренными искровыми промежутками.

Грозозащита пересечений ВЛ между собой и с линиями электрифицированного транспорта и связи обеспечивается соблюдением нормированных расстояний по воздуху. Кроме того, на ВЛ с деревянными опорами и АПВ для ог-

раничения амплитуды перенапряжений применялись разрядники или искровые промежутки, установленные на опорах, ограничивающих пролет пересечения.

Средством повышения грозоупорности ВЛ могут служить ОПН, устанавливаемые непосредственно на опорах ВЛ. Применение ОПН на ВЛ наиболее эффективно в следующих случаях:

- на одной из цепей двухцепной ВЛ, что практически полностью предотвращает грозовые отключения одновременно двух цепей;
- при высоком сопротивлении заземления опор;
- на высоких опорах, например, на переходах через водные преграды.

При этом ОПН могут устанавливаться либо на всех фазах каждой опоры, либо на части опор или только на одной или двух фазах.

Резервным средством повышения надежности и бесперебойности работы ВЛ является автоматическое повторное включение (АПВ), в особенности быстродействующее (БАПВ) и однофазное (ОАПВ). Коэффициент успешности АПВ при грозовых отключениях, по данным опыта эксплуатации, для ВЛ 110-500 кВ составляет в среднем 0,6-0,8, а для ВЛ 750 и 1150 кВ - 0,8-0,9. АПВ позволяет частично компенсировать низкую грозоупорность ВЛ при трудностях устройства хороших заземлений и т.п. Однако применение АПВ не должно исключать использование основных средств грозозащиты.

3.4.2. Грозовые отключения ВЛ

Грозовое перекрытие изоляции ВЛ может наступить (рис. 5.8):

А. При ударе молнии в вершину металлической или железобетонной опоры или в трос вблизи опоры. Вследствие высокого потенциала в точке подвеса гирлянды изоляторов, возникающего из-за падения напряжения на индуктивном сопротивлении тела опоры и заземлителя опоры, при определенных токах молнии происходит обратное перекрытие с тела опоры на провод.

Б. При ударе молнии в трос в пролете между опорами.

В. При ударе молнии в провод с последующим перекрытием с провода на ближайшую опору или между фазами. Это возможно на ВЛ с тросовой защитой при прорыве молнии через эту защиту, на ВЛ без тросовой защиты при непосредственном ударе молнии в провод.

Г. При ударе молнии в землю вблизи линии (на расстоянии не менее $3h_{\text{ср}}$) вследствие индуктированных перенапряжений и низкой импульсной прочности гирлянд изоляторов воздушных линий 6, 10, 35 кВ. Вероятность перекрытия

линейной изоляции линии 110 кВ и выше при таких разрядах весьма мала, и ею можно пренебречь.

Грозовое перекрытие линейной изоляции не является достаточным условием для отключения линии. Отключение линии произойдет только в том случае, если импульсное перекрытие перейдет в устойчивую дугу переменного тока. Коэффициент такого перехода для воздушных промежутков и изоляции линий на деревянных опорах определяется по формуле

$$\eta_{\text{в}} = \left(1,6 \frac{U}{l_{\text{раз}}} - 6 \right) 10^{-2}, \quad (5.10)$$

где U – наибольшее действующее значение рабочего напряжения: фазного $U_{\text{раб. наиб}}$ при однофазных перекрытиях и линейного при двухфазных перекрытиях, кВ; $l_{\text{раз}}$ – длина пути разряда, м.

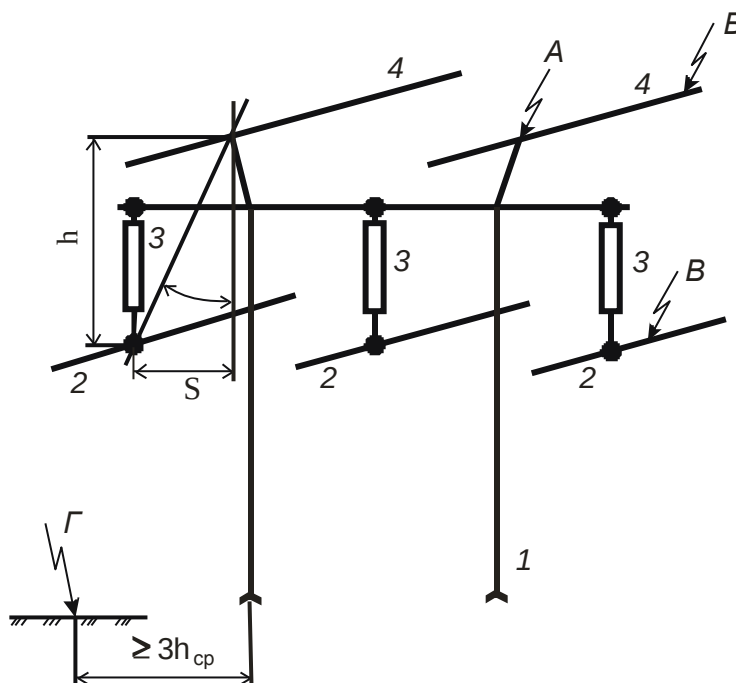


Рис. 5.8. Расчетные случаи грозового поражения ВЛ:

А – удар молнии в вершину опоры; Б – удар молнии в трос в пролете; В – удар молнии в провод; Г – удар молнии в землю вблизи ВЛ на расстоянии не менее трех средних высот ВЛ ($3h_{\text{ср}}$); Δh – превышение троса над проводом, м; ΔS – горизонтальное смещение троса относительно провода, м; 1 – опора ВЛ; 2 – фазные провода; 3 – изоляционная подвеска фазных проводов; 4 – тросовые молниеотводы с защитным углом α

Если при расчете получается $\eta_{\text{в}} \leq 0,1$ или $\eta_{\text{в}} \geq 0,9$, то принимают соответственно $\eta_{\text{в}} = 0,1$ или $\eta_{\text{в}} = 0,9$.

Для гирлянд изоляторов линий на металлических и железобетонных опорах коэффициент перехода η_r принимается:

$$\eta_r = 0,7 \text{ для линий } U_{\text{ном}} \leq 220 \text{ кВ};$$

$$\eta_r = 1,0 \text{ для линий } U_{\text{ном}} \geq 330 \text{ кВ}.$$

При расчетах грозоупорности ВЛ необходимо знать 50%-ные импульсные разрядные напряжения $U_{50\%}$ поддерживающих провода гирлянд изоляторов при грозовых импульсах, значения которых в зависимости от длины гирлянды l_r и полярности напряжения, приложенного к проводу, приведены на рис. 5.9.

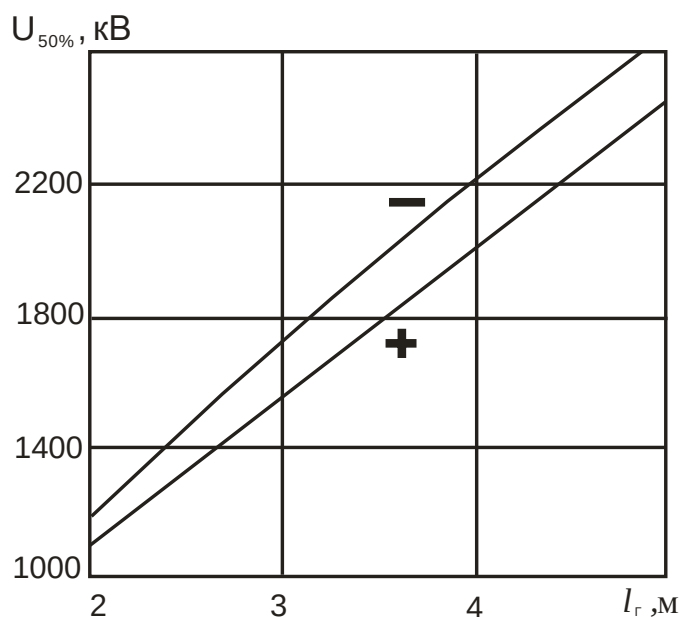


Рис. 5.9. 50%-ные разрядные напряжения гирлянд изоляторов с защитной арматурой при грозовых импульсах

При определении 50%-ных разрядных напряжений для линий на деревянных опорах нужно учитывать импульсную прочность части деревянной траверсы, которая определяется как $70 l_d$, кВ, где l_d — длина части пути разряда по дереву в метрах.

Рассмотрим методы расчета удельного числа отключений ВЛ $n_{\text{откл}}$.

ВЛ, защищенные тросовыми молниеотводами, имеют $U_{\text{ном}} \geq 110$ кВ и работают в системах с заземленной нейтралью.

Удельное число грозовых отключений таких ВЛ

$$n_{\text{откл}} = 4 \cdot h_{\text{тр.ср}} \cdot P_{\alpha} \cdot P_{\text{пр}} \cdot \eta_r + (1 - P_{\alpha}) \left[\Delta_{\text{оп}} \cdot P_{\text{оп}} \cdot \eta_r + \Delta_{\text{тр}} \cdot P_{\text{тр}} \cdot \eta_v \right], \quad (5.11)$$

где $P_{\alpha} \cdot P_{\text{пр}}$ — вероятность перекрытия гирлянды изоляторов в результате прорыва молнии через тросовую защиту к проводам;

$\Delta_{\text{оп}} \cdot P_{\text{оп}}$ – вероятность перекрытия гирлянды при ударе молнии в опору и в трос вблизи опоры;

$\Delta_{\text{тр}} \cdot P_{\text{тр}}$ – вероятность перекрытия при ударе молнии в трос в середине пролета;

$\Delta_{\text{оп}} \approx 4h_{\text{оп}}/r_{\text{п}}$ – доля ударов молнии в опору;

$l_{\text{п}}$ – длина пролета;

$\Delta_{\text{тр}} \approx 1 - 4h_{\text{оп}}/r_{\text{п}}$ – доля ударов, приходящихся в середину пролета.

Вероятность прорыва молнии через тросовую защиту к проводам P_{α} определяется по формуле

$$P_{\alpha} = \exp \left[\frac{1}{D} \left(\frac{0,55}{\Delta h} \sqrt{\alpha h_{\text{тр.ср}} \Delta S} - \frac{9}{D} \right) \right], \quad (5.12)$$

в которой

$$D = 1 + U_{\text{ном}} \frac{h_{\text{тр.ср}}}{\Delta h} \left(\frac{117 U_{\text{ном}}^2}{\Delta h \Delta S l_{\text{п}} \frac{2h_{\text{тр.ср}}}{r_{\text{пр}}}} \right), \quad (5.13)$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение ВЛ, кВ;

Δh – превышение троса над проводом, м (см. рис. 5.8);

ΔS – горизонтальное смещение троса относительно провода, м;

$r_{\text{пр}}$ – радиус провода (в случае расщепления фазы $r_{\text{экв}}$), м;

$h_{\text{тр.ср}}$ и $h_{\text{пр.ср}}$ – средняя высота подвеса троса и провода, м;

α – защитный угол, град.

Вероятность перекрытия гирлянды изоляторов при ударе молнии в провод $P_{\text{пр}}$ определяется по критическому току молнии $I_{\text{кр1}}$, рассчитанному из условия равенства падения напряжения на волновом сопротивлении провода с учетом короны $Z_{\text{к}}$ (табл. 5.3) разрядному напряжению гирлянды изоляторов $U_{50\%}$:

$$I_{\text{кр1}} = 2 U_{50\%} / Z_{\text{к}}. \quad (5.14)$$

В расчетах $I_{\text{кр1}}$ часто используют наименьшее значение $U_{50\%}$, соответствующее положительной полярности напряжения (см. рис. 5.9). При этом разрядный градиент напряжения составляет примерно 500 кВ/м, а на 50%-ное разрядное напряжение в зависимости от $l_{\text{г}}$, м, представляется как

$$U_{50\%} \approx 500 \cdot l_{\text{г}}. \quad (5.15)$$

Для определения вероятности перекрытия гирлянды изоляторов при ударе молнии в опору и в трос вблизи опоры $R_{оп}$ необходимо знать напряжение, приложенное к гирлянде изоляторов $U_{из}$, равное разности напряжений на опоре $U_{оп}$ и на проводе $U_{пр}$.

Напряжение опоры в точке подвеса гирлянды изоляторов имеет три составляющие: напряжение на сопротивлении заземления опоры $R_{и}$ от тока в опоре $i_{оп}$, напряжение на индуктивности опоры $L_{оп}(di_{оп}/dt)$, напряжение на опоре вследствие взаимоиндукции между каналом молнии и опорой на высоте подвеса провода $M_{пр}(di_{м}/dt)$:

$$U_{оп} = R_{и} i_{оп} + L_{оп} \frac{di_{оп}}{dt} + M_{пр} \frac{di_{м}}{dt}, \quad (5.16)$$

где $M_{пр} \approx 0,2 h_{пр.ср}$, мкГн; $L_{оп} = L_0 h_{оп}$, мкГн; L_0 – удельная индуктивность опоры, мкГн/м (табл. 5.4); $h_{оп}$, м; $U_{оп}$, кВ; $i_{оп}$, кА; $di_{оп}/dt$ и $di_{м}/dt$, кА/мкс.

Таблица 5.3

Волновые сопротивления проводов воздушных линий и коэффициенты электромагнитной связи провода и троса (или другого провода)

Тип опоры	Материал опоры	$U_{ном}$, кВ	Число проводов в фазе	Волновое сопротивление, Ом		Коэффициенты связи	
				Z (расчетное)	Z_k (с учетом короны)	K (расчетный)	K_k (с учетом короны)
Однотростная, одноцепная, с тросом	Железобетон	110	1	505	455	0,215	0,240
		220	1	475	420	0,200	0,210
Однотростная, двухцепная, с тросом	Металл	35	1	510	475	0,215	0,240
	Железобетон	110	1	520	470	0,210	0,250
	Металл	220	1	505	455	0,200	0,245
		330	2	400	375	0,175	0,215
Портальная, с двумя тросами, горизонтальное расположение проводов	Дерево	35	1	490	450	0,285	0,310
		110	1	465	420	0,260	0,305
		220	1	445	385	0,245	0,300
	Металл	330	2	360	330	0,200	0,245
	Железобетон	500	3	320	305	0,180	0,225

Таблица 5.4

Удельная индуктивность L_0 опор

Тип опоры	L_0 , мкГн/м
Одностоечная, металлическая	0,6
Одностоечная, железобетонная	0,7
Двустоечная, металлическая, на оттяжках	0,4
Портальная, металлическая	0,5
Двустоечная, деревянная, с двумя заземляющими токоотводами	0,7
Отдельно стоящая опора для молниеотвода	1,3 - 1,7

При косоугольной форме тока молнии в пределах его фронта $i_m = a_m t$ ток в опоре в пределах фронта определяется как

$$i_{оп} = a_m t \left[\frac{0,5L_{тр} - M_{тр}}{0,5L_{тр} + L_{оп}} \right] \frac{1 - e^{-\alpha_1 t}}{\alpha_1 t}, \quad (5.17)$$

а производная тока в опоре как

$$\frac{di_{оп}}{dt} = a_m \left[\frac{0,5L_{тр} - M_{тр}}{0,5L_{тр} + L_{оп}} \right] e^{-\alpha_1 t}, \quad (5.18)$$

где $\alpha_1 = \frac{R_{и}}{0,5L_{тр} + L_{оп}}$;

$L_{тр} = Z_{тр} \frac{l_{п}}{c}$ - индуктивность троса, мкГн;

$Z_{тр} \approx 350$ Ом; $l_{п}$ - длина пролета, м;

$c = 300$ м/мкс - скорость света;

$M_{тр} \approx 0,5 h_{тр.ср}$ - взаимная индуктивность между каналом молнии и петель опоры - трос - земля, мкГн.

Напряжение на проводе имеет три составляющие:

- рабочее напряжение на проводе $U_{раб} \approx 0,5U_{ном}$, кВ, имеющее полярность, противоположную полярности напряжения опоры;

- напряжение $U_{инд} \approx 10 h_{пр.ср}(1 - K_k)$, кВ, индуцируемое на проводе зарядом лидера молнии и имеющее полярность, противоположную полярности напряжения на опоре; коэффициенты электромагнитной связи между тросом и проводом K_k приведены в табл. 5.3;

- напряжение $U_{\text{инд1}} = K_{\text{к}} U_{\text{оп}}$, кВ, индуктированное на проводе в результате распространения по тросу импульса напряжения с максимальным значением $U_{\text{оп}}$.

Максимальное напряжение на изоляции $U_{\text{из. макс}} = U_{\text{оп}} - U_{\text{пр}}$ определяется в момент времени, равный длительности фронта тока молнии $\tau_{\text{ф}}$, т.е. при максимальном значении тока молнии $I_{\text{м}} = a_{\text{м}} \tau_{\text{ф}}$ и соответственно при максимальном значении тока в опоре $I_{\text{оп}}$:

$$U_{\text{из. макс}} = U_{\text{оп}}(1 - K_{\text{к}}) + U_{\text{инд}} + U_{\text{раб}}. \quad (5.19)$$

Напряжение $U_{\text{из. макс}}$ может иметь множество значений, определяемых сочетанием случайных величин $a_{\text{м}}$ и $I_{\text{м}}$; $U_{\text{из. макс}}$ превысит разрядное напряжение гирлянды $U_{\text{р}}$, заданное вольт-секундной характеристикой,

$$U_{\text{р}} = A \sqrt{1 + \frac{T}{t_{\text{р}}}}, \quad (5.20)$$

где $t_{\text{р}}$ – время разряда. Коэффициенты A и T определяются по двум значениям: $U_{\text{р}} = U_{50\%}$ при $t_{\text{р}} = 10$ мкс и $U_{\text{р}} = U_{2\text{мкс}}$ при $t_{\text{р}} = 2 - 3$ мкс; можно принять $U_{2\text{мкс}} \approx 1,25 U_{50\%}$.

На рис. 5.10 показаны построения для определения сочетаний $a_{\text{м}}$ и $I_{\text{м}}$ при перекрытии гирлянды изоляторов. По (5.20) построена вольт-секундная характеристика 1. Задаваясь значениями крутизны тока молнии $a_{\text{м}}$ по (5.19) рассчитывается $U_{\text{из. макс}}(t_{\text{р}})$ – кривые 2. Точки пересечения кривых 1 и 2 позволяют определить для каждого случая время разряда $t_{\text{р}} = \tau_{\text{ф}}$ и соответствующее значение тока молнии $I_{\text{м}} = a_{\text{м}} t_{\text{р}}$. В результате получается зависимость $a_{\text{м}} = f(I_{\text{м}})$, называемая кривой опасных параметров и показанная на рис. 5.11, а. Эта кривая делит зону сочетаний $a_{\text{м}}$ и $I_{\text{м}}$ на две области: область опасного сочетания $a_{\text{м}}$ и $I_{\text{м}}$ (заштриховано), в которой сочетания $a_{\text{м}}$ и $I_{\text{м}}$ таковы, что $U_{\text{из. макс}} > U_{\text{р}}$, и область безопасного сочетания $a_{\text{м}}$ и $I_{\text{м}}$, в которой $U_{\text{из. макс}} < U_{\text{р}}$.

Используя формулы табл. 5.1, осуществляем переход к зависимости $P(a_{\text{м}}) = f_1[P(I_{\text{м}})]$ (рис. 5.11, б).

Поскольку $a_{\text{м}}$ и $I_{\text{м}}$ считаются независимыми случайными величинами, то

$$P_{\text{оп}} = \int_0^1 P(I_{\text{м}}) dP(a_{\text{м}}), \quad (5.21)$$

что определяется заштрихованной областью на рис. 5.11, б.

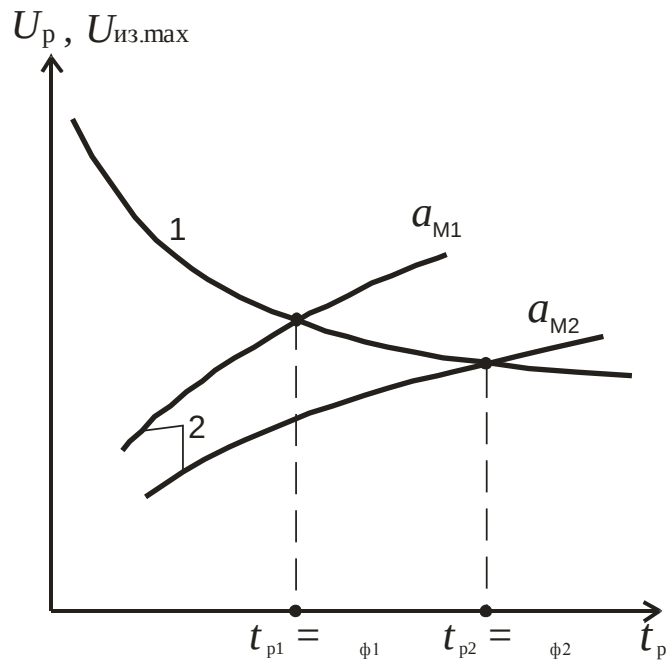
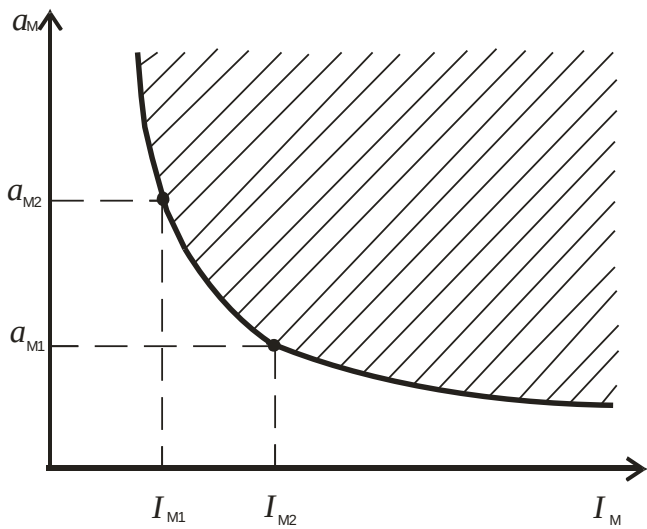
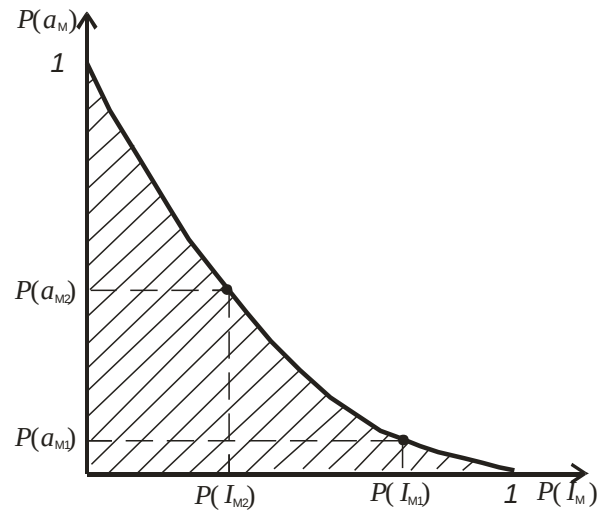


Рис. 5.10. Определение времени разряда линейной изоляции при разной крутизне фронта тока молнии ($a_{M1} > a_{M2}$):

1 – вольт-секундная характеристика изоляции; 2 – напряжения изоляции



а)



б)

Рис. 5.11. Определение вероятности перекрытия гирлянды изоляторов при ударе молнии в опору:

а – кривая опасных параметров; б – кривая для определения вероятности $P_{оп}$

Расчеты по изложенной методике достаточно громоздки. Упрощенно значение $P_{\text{оп}}$ можно оценить, используя некоторый условный критический ток молнии

$$I_{\text{кр.усл}} = \frac{U_{50\%}}{R_{\text{и}} + \delta h_{\text{оп}}}, \quad (5.22)$$

где $U_{50\%}$, кВ; $R_{\text{и}}$, Ом; $h_{\text{оп}}$, м; $I_{\text{кр2}}$, кА; $\delta = 0,15$ для ВЛ с двумя тросами и $\delta = 0,3$ для ВЛ с одним тросом. Расчетным случаем для определения $P_{\text{тр}}$ является удар молнии в трос в середине пролета. При этом возможно перекрытие воздушного промежутка трос – провод в середине пролета практически всегда на фронте тока молнии, чему соответствует вероятность $P_{\text{тр1}}$. Вторым случаем является перекрытие гирлянды изоляторов на опоре при протекании тока троса по опоре, что определяется вероятностью $P_{\text{тр2}}$.

Вероятность $P_{\text{тр}}$ рассчитывается по формуле

$$P_{\text{тр}} \approx P_{\text{тр1}} + P_{\text{тр2}} - P_{\text{тр1}} P_{\text{тр2}}. \quad (5.23)$$

При этом принимается, что $P_{\text{тр1}}$ и $P_{\text{тр2}}$ – вероятности двух независимых и совместимых событий.

Вероятность $P_{\text{тр1}}$ определяется по критической крутизне тока молнии, кА/мкс, которая рассчитывается по формуле

$$a_{\text{кр}} = \frac{2E_{\text{р.ср}} l_{\text{тр.пр}}}{Z_{\text{тр}} \tau_{\text{тр}} (1 - K_{\text{к}})}, \quad (5.24)$$

где $E_{\text{р.ср}} = 500 \left(1 + \frac{2,4}{\tau_{\text{тр}}} \right)$ – средний разрядный градиент промежутка трос – провод, кВ/м;

$\tau_{\text{тр}} = l_{\text{п}} / v_{\text{тр}}$ – время распространения волны по коронирующему тросу в пределах пролета ВЛ, мкс;

$l_{\text{п}}$ – длина пролета, м;

$v \approx 250$ м/мкс – скорость распространения волны;

$l_{\text{тр.пр}}$ – расстояние между тросом и проводом в середине пролета, м, которое вычисляется по нормированному ПУЭ наименьшему расстоянию между проводом и тросом по вертикали $h_{\text{тр.пр}}$, м (см. табл. 5.5), и защитному углу α : $l_{\text{тр.пр}} = h_{\text{тр.пр}} / \cos \alpha$; значения $Z_{\text{тр}}$ и $K_{\text{к}}$ указаны выше.

При $a_{\text{м}} > a_{\text{кр}}$ происходит пробой промежутка трос – провод. Это условие позволяет рассчитать $P_{\text{тр1}}$ по соответствующей формуле табл. 5.1.

Вероятность $P_{\text{тр2}}$ определяется по критическому току молнии $I_{\text{кр2}}$. При расчете $I_{\text{кр2}}$, кА, учитывается $U_{50\%}$, $U_{\text{раб}} \approx 0,5U_{\text{ном}}$, кВ, импульсное сопротивление опоры $R_{\text{и}}$, Ом, коэффициент связи трос – провод $K_{\text{к}}$, (см. табл. 5.3):

$$I_{\text{кр2}} = \frac{2(U_{50\%} - U_{\text{раб}})}{R_{\text{и}}(1 - K_{\text{к}})} \quad (5.25).$$

Таблица 5.5

Наименьшее расстояние между тросом и проводом в середине пролета

Длина пролета, м	Наименьшее расстояние между тросом и проводом по вертикали, м	Длина пролета, м	Наименьшее расстояние между тросом и проводом по вертикали, м
100	2,0	700	11,5
150	3,2	800	13,0
200	4,0	900	14,5
300	5,5	1000	16,0
400	7,0	1200	18,0
500	8,5	1500	21,0
600	10,0		

По формуле (5.11) определяется число грозových отключений, приводящих к работе выключателей. Для ВЛ с АПВ число устойчивых отключений при успешном АПВ определяется по формуле:

$$n_{\text{откл. уст}} = n_{\text{откл}}(1 - \beta_{\text{АПВ}}), \quad (5.26)$$

где $\beta_{\text{АПВ}}$ – коэффициент успешности АПВ, который по данным опыта эксплуатации для ВЛ 110 – 330кВ составляет в среднем 0,8, а для ВЛ 500 – 750 кВ – 0,9.

ВЛ без тросовой молниезащиты. Удельное число отключений ВЛ на металлических и железобетонных опорах

$$n_{\text{откл2}} = 4h_{\text{пр.ср}}(\Delta_{\text{пр}}P_{\text{пр}} + \Delta_{\text{оп}}P_{\text{оп}})\eta_{\text{Г}}. \quad (5.27)$$

Считается, что удары молнии между проводами и опорами распределены примерно поровну, т.е. $\Delta_{\text{пр}} \approx \Delta_{\text{оп}} = 0,5$.

Вероятность $P_{\text{пр}}$ для ВЛ в системах с заземленной нейтралью ($U_{\text{ном}} \geq 110$ кВ) определяется по критическому току $I_{\text{кр1}}$, который рассчитывается по (5.14). У ВЛ в системах с изолированной нейтралью ($U_{\text{ном}} \leq 35$ кВ) для определения $P_{\text{пр}}$ используется критический ток $I_{\text{кр3}}$, кА:

$$I_{\text{кр3}} = \frac{U_{50\%}}{R_{\text{и}}(1 - K_{\text{к}})}, \quad (5.28)$$

рассчитанный по условию образования двухфазного перекрытия на землю.

Для определения вероятности $P_{\text{оп}}$ для ВЛ в системах с заземленной нейтралью необходимо рассчитать максимальное напряжение $U_{\text{оп. макс}}$, кВ, в точке крепления гирлянды изоляторов, т.е. на вершине опоры. Упрощенно это напряжение вычисляется по соотношению

$$U_{\text{оп. макс}} = R_{\text{и}} I_{\text{м}} + a_{\text{м}} L_0 h_{\text{оп}}. \quad (5.29)$$

Считая, что импульсное напряжение перекрытия гирлянды равно $U_{50\%}$, из равенства $U_{\text{оп. макс}} = U_{50\%}$ получаем соотношение

$$a_{\text{м}} = \frac{U_{50\%} - R_{\text{и}} I_{\text{м}}}{L_0 h_{\text{оп}}}. \quad (5.30)$$

По соотношению (5.30) строится кривая опасных параметров $a_{\text{м}} = f(I_{\text{м}})$, аналогичная кривой на рис. 5.11, а, и далее зависимость $P(a_{\text{м}}) = f_1[P(I_{\text{м}})]$, аналогичная зависимости, приведенной на рис. 5.11, б. С помощью последней зависимости вычисляется $P_{\text{оп}}$.

У ВЛ в системах с изолированной нейтралью при ударе молнии в опору отключение возможно только при перекрытии изоляции по крайней мере двух гирлянд и образовании двухфазного замыкания на землю. Расчеты с использованием (5.30) позволяют определить вероятность перекрытия изоляции одной гирлянды $P_{\text{оп1}}$. Считая, что наиболее вероятным случаем, являются перекрытия изоляции двух гирлянд, которые можно рассматривать как совместные, независимые, случайные события, получим, что

$$P_{\text{оп}} = P_{\text{оп1}} \cdot P_{\text{оп1}} = P_{\text{оп1}}^2. \quad (5.31)$$

Удельное число отключений ВЛ на деревянных опорах определяется только ударами молнии в фазные провода и условием перекрытия изоляции между фазами по пути гирлянда – деревянная траверса – гирлянда:

$$n_{\text{откл3}} = 4 \cdot h_{\text{пр.ср}} \cdot P_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{в}}. \quad (5.32)$$

Критический ток, необходимый для расчета $P_{\text{пер}}$, вычисляется по соотношению

$$I_{\text{кр4}} = \frac{2 \cdot U_{50\%1}}{Z_{\text{к}} \cdot (1 - K_{\text{к}})}, \quad (5.33)$$

причем $U_{50\%1} = 2 \cdot U_{50\%} + 70 \cdot l_{\text{д}}$, где $l_{\text{д}}$ – длина деревянной траверсы между точками крепления гирлянд изоляторов, м.

Коэффициент η_v рассчитывается по (5.10) при $U_{\text{раб. наиб}}$, кВ, и длине пути разряда $l_{\text{раз}} = 2l_{\Gamma} + l_{\text{д}}$, м. Учет влияния АПВ производится по (5.26).

Отключения ВЛ при индуцированных перенапряжениях. При ударах молнии в землю вблизи ВЛ удельное число отключений за счет индуцированных перенапряжений определяется как

$$n_{\text{инд. откл}} = n_{\text{инд}} \cdot \eta_{\Gamma}, \quad (5.34)$$

где $n_{\text{инд. откл}}$ - число отключений в год на 100 км длины ВЛ и 100 грозových ч;

$n_{\text{инд}}$ - годовое число индуцированных перенапряжений на 100 км длины ВЛ и 100 грозových ч, приводящих к перекрытию изоляции ВЛ;

η_{Γ} определяется по (5.11).

Расчет $n_{\text{инд}}$ - довольно сложная задача. Известны некоторые значения $n_{\text{инд}}$ для ВЛ 10; 35 и 110 кВ на металлических и железобетонных опорах:

$U_{\text{ном}}$, кВ	10	35	110
$U_{50\%}$, кВ	100	350	700
$h_{\text{пр. ср}}$, м	10	15	20
$n_{\text{инд}}$	25	5	1

В табл. 5.6 приведены некоторые данные по удельному числу грозových отключений для ВЛ различных классов напряжения.

Таблица 5.6

Характеристики молниезащиты ВЛ 110 – 750 кВ

Параметр	Напряжение ВЛ, кВ						
	110		220		330	500	750
1	2	3	4		5	6	7
Материал опор	Железо-бетон	металл	металл		металл	металл	металл
Марка провода	АС-120	АС-150	АСО-330	АСО-330	2АСО-400	3АСО-400	4АСУ-400
Количество и тип изолятора на опоре	8ПС6-Б	8ПС6-Б	14ПС6-Б	14ПС6-Б	22ПС6-Б	28ПС12-А	2х41ПС12-А
Защитный угол троса α , град	31,2	20,7	29,0	24,2	22,6	22,7	24,7

Продолжение табл. 5.6

1	2	3	4		5	6	7
Импульсное сопротивление заземления опор, Ом	20	15	15	10	10	10	10
Удельное число прямых ударов молнии в линию за год $n_{уд. ВЛ}$, уд/(100 км·100гр.ч)	100	165	182	227	153	174	207
Удельное число отключений линии при ударе молнии в провод $n_{пр}$, 1/год	0,06	0,06	0,23	0,18	0,22	0,11	0,063
Удельное число отключений линии при ударе в опору $n_{оп}$, 1/год	0,81	1,73	0,41	0,45	0,002	<0,001	<0,001
Удельное число отключений линии при ударе в трос $n_{тр}$, 1/год	0,43	0,89	0,13	<0,01	<0,001	<0,001	<0,001
Удельное число отключений линии вследствие индуктированных перенапряжений $n_{инд}$, 1/год	0,25	0,38	0,03	0,04	0,003	<0,001	<0,001
Удельное суммарное число грозových отключений линии $n_{откл\Sigma}$, 1/год	1,55	3,06	0,80	0,68	0,23	0,11	0,066

3.4.3. Мероприятия по повышению грозоупорности ВЛ 6-35 кВ

ВЛ 6 и 10 кВ на железобетонных опорах имеют очень низкий уровень грозоупорности из-за малой электрической прочности штыревых изоляторов и высокой вероятности возникновения к.з. после импульсного перекрытия. Кроме того, с большой вероятностью изоляция этих ВЛ перекрывается от индуктированных перенапряжений при близких ударах молнии в землю. Небольшое улучшение эксплуатационных показателей этих ВЛ достигается при повышении электрической прочности изоляции и снижении сопротивления заземле-

ний. Улучшение характеристик также достигается в результате применения разрядников длинно-искровых (РДИ).

ВЛ 6 и 10 кВ на деревянных опорах с креплением изоляторов с помощью крюков на стойках также имеют низкий уровень грозоупорности: междуфазное перекрытие изоляции происходит практически при каждом прямом ударе молнии в провод. Число грозовых отключений этих ВЛ меньше по сравнению с ВЛ на железобетонных опорах: меньше вероятность возникновения к.з. после импульсного перекрытия; индуктированные перенапряжения не вызывают перекрытия линейной изоляции. Близкие, но несколько худшие показатели имеют линии на деревянных опорах с металлическими траверсами за счет уменьшения импульсной прочности изоляции между фазами и увеличения вероятности перехода импульсного перекрытия в силовую дугу. Основным мероприятием для повышения эксплуатационных показателей этих ВЛ является АПВ. На этих ВЛ целесообразно использование АПВ двухкратного действия. Учитывая небольшую длину ВЛ 10 кВ, при соблюдении этих мероприятий удастся обеспечить приемлемые эксплуатационные показатели в районах с умеренной грозовой деятельностью. Кроме того, средством повышения грозоупорности таких ВЛ являются разрядники длинно-искровые (РДИ).

В качестве мероприятий по повышению грозоупорности ВЛ основных сетей 10 кВ могут использоваться изоляционные траверсы (из сухой и пропитанной древесины или пластических масс) для крепления нижних проводов. Верхний провод крепится на изоляторе, устанавливаемом на вершине железобетонной или деревянной стойки, и работает как трос. На деревянных опорах от штыря изолятора верхнего провода вдоль стойки прокладывается стальной спуск с разрывом 15 см на высоте 4 м от земли. Заземляющий спуск погружается в грунт на глубину заложения стойки. Такая конструкция ВЛ за счет повышения импульсной прочности изоляции и снижения вероятности возникновения к.з. после импульсного перекрытия позволяет снизить число грозовых отключений по сравнению с ВЛ на железобетонных и деревянных опорах с металлическими траверсами и креплениями изоляторов на крюках.

Уровень грозоупорности ВЛ 35 кВ на железобетонных опорах существенно зависит от сопротивления заземлений опор. Для обеспечения эксплуатационной надежности этих ВЛ необходимо ограничить сопротивление заземлений в соответствии с рекомендациями /1/.

Повышенная (примерно на порядок) грозоупорность ВЛ 35 кВ на железобетонных опорах может быть достигнута при использовании изоляционных траверс для подвески нижних проводов.

ВЛ 35 кВ на деревянных порталных опорах с расстоянием между проводами 3 м при выполнении сопротивлений заземления опор в соответствии с рекомендациями /1/ более грозоупорны. Для повышения надежности таких ВЛ от траверсы вдоль стоек опор следует проложить заземляющие спуски, которые закладываются в грунт на глубину 0,5 м и соединяются между собой в земле. При этом уровень грозоупорности ВЛ повышается и предотвращается расщепление стоек.

На ВЛ 6-35 кВ с деревянными опорами отдельные железобетонные (металлические) опоры с ослабленной изоляцией и крайние опоры участка с железобетонными опорами (или участка с чередующимися железобетонными и деревянными опорами) должны защищаться подвесными ОПН.

На ВЛ 35 кВ с деревянными опорами защиту единичных железобетонных или металлических опор следует выполнять либо с помощью ОПН, либо за счет усиления изоляции (до 10-12 изоляторов) в гирлянде, при этом должен быть обеспечен габарит до земли в соответствии с /1/ и импульсная прочность воздушного промежутка не ниже импульсной прочности гирлянды.

На отпайках от ВЛ 6-35 кВ на деревянных опорах за отпаечным разъединителем со стороны питания устанавливается ОПН.

Грозозащита ВЛ 6-20 кВ с защищенными (изолированными) проводами должна выполняться в соответствии с рекомендациями "Правил устройства воздушных линий электропередачи напряжением 6-20 кВ с защищенными проводами".

Тросовые молниеотводы, защищающие подходы ВЛ 35 кВ, разрешается присоединять к заземленным конструкциям ОРУ при эквивалентном удельном сопротивлении земли в грозовой сезон: до 750 Ом·м - независимо от площади заземляющего контура ПС; более 750 Ом·м - при площади заземляющего контура ПС 10000 м² и более.

Тросовые молниеотводы на подходах ВЛ 35 кВ к тем ОРУ, к которым не допускается их присоединение, должно заканчиваться на ближайшей к ОРУ опоре. Первый от ОРУ бестросовый пролет этих ВЛ должен быть защищен стержневыми молниеотводами, устанавливаемыми на ПС, опорах ВЛ или около ВЛ.

Гирлянды подвесной изоляции на порталах ОРУ 20 и 35 кВ с тросовыми или стержневыми молниеотводами, а также на концевых опорах ВЛ 35 кВ должны иметь следующее количество изоляторов:

1) на порталах ОРУ с молниеотводами:

- не менее шести изоляторов при расположении вентильных разрядников или соответствующих им по уровню остающихся напряжений ОПН не далее 15 м по магистралям заземляющего устройства от места присоединения к нему;
- не менее семи изоляторов в остальных случаях;

2) на концевых опорах:

- не менее семи изоляторов при подсоединении к порталам троса ПС;
- не менее восьми изоляторов, если трос не заходит на конструкции ПС и при установке на концевой опоре стержневого молниеотвода.

Установка молниеотводов на концевых опорах ВЛ 3-20 кВ не допускается.

Защита ВЛ 35 кВ и выше от прямых ударов молнии на подходах к РУ (ПС) должна быть выполнена тросовыми молниеотводами в соответствии с табл. 5.7.

Таблица 5.7

Защита ВЛ от прямых ударов молнии на подходах к РУ и ПС

Номинальное напряжение ВЛ, кВ	Подходы ВЛ на опорах с горизонтальным расположением проводов			Подходы ВЛ на опорах с негоризонтальным расположением проводов			Наибольшее допустимое сопротивление заземляющего устройства опор, Ом, при эквивалентном удельном сопротивлении земли, Ом·м*		
	Длина защищенного подхода, км	Число тросов, шт.	Защитный угол троса, град.	Длина защищенного подхода, км	Кол-во тросов, шт.	Защитный угол троса, град.	До 100	Более 100 до 500	Более 500
35	1-2	2	30	1-2	1-2	30	10	15	20
110	1-3	2	20**	1-3	1-2	20**	10	15	20***
150	2-3	2	20**	2-3	1-2	20**	10	15	20***
220	2-3	2	20	2-3	2	20**	10	15	20***
330	2-4	2	20	2-4	2	20	10	15	20***
500	3-4	2	25	-	-	-	10	15	20***
750	4-5	2	20-22	-	-	-	10	15	20***

* На подходах ВЛ 110-330 кВ с двухцепными опорами заземляющие устройства опор рекомендуется выполнять с сопротивлением вдвое меньшим указанного в табл. 5.7.

** На железобетонных опорах допускается угол защиты до 30°.

*** Для опор с горизонтальным расположением проводов, устанавливаемых в земле с эквивалентным удельным сопротивлением более 1000 Ом·м, допускается сопротивление заземляющего устройства 30 Ом.

Допускается увеличение по сравнению с приведенными в табл. 5.7 сопротивлений заземляющих устройств опор на подходах ВЛ 35 кВ и выше к ПС при числе грозových часов в году не менее 20 - в 1,5 раза; менее 10 - в 3 раза.

Если выполнение заземлителей с требуемыми сопротивлениями заземления оказывается невозможным, должны быть применены горизонтальные заземлители, прокладываемые вдоль оси ВЛ от опоры к опоре (заземлители-противовесы) и соединяемые с заземлителями опор.

В особо гололедных районах и в районах с эквивалентным удельным сопротивлением земли более 1000 Ом·м допускается выполнение защиты подходов ВЛ к РУ (ПС) отдельно стоящими стержневыми молниеотводами, сопротивление заземлителей которых не нормируется.

В районах, имеющих не более 60 грозových часов в году, допускается не выполнять защиту тросом подхода ВЛ 35 кВ к ПС 35 кВ с двумя трансформаторами мощностью до 1,6 МВ·А каждый или с одним трансформатором мощностью до 1,6 МВ·А и наличием резервного питания. При этом опоры подхода ВЛ к ПС на длине не менее 0,5 км должны иметь заземлители с сопротивлением, указанным в табл. 5.7. При выполнении ВЛ на деревянных опорах, кроме того, требуется на подходе длиной 0,5 км присоединять крепления изоляторов к заземлителю опор и устанавливать комплект трубчатых разрядников на первой опоре подхода со стороны ВЛ. Расстояние между РВ или соответствующими ОПН и трансформатором должно быть не более 10 м.

При отсутствии резервного питания на ПС с одним трансформатором мощностью до 1,6 МВ·А подходы ВЛ 35 кВ к ПС должны быть защищены тросом на длине не менее 0,5 км.

На ВЛ с деревянными опорами 3-35 кВ в заземляющих спусках защитных промежутков следует выполнять дополнительные защитные промежутки, установленные на высоте не менее 2,5 м от земли.

Глава 4. Молниезащита электрических станций и подстанций.

Вентильные разрядники. Нелинейные ограничители перенапряжений

§4.1. Общие положения

Опасные грозовые воздействия на подстанционном оборудовании возникают при ударах молнии непосредственно в подстанцию (ПС), а также при поражениях ВЛ и приходе по ним на распределительное устройство (РУ) и ПС грозových волн. Кроме того, для РУ 6 и 10 кВ опасны перенапряжения, индуцированные на токоведущих частях при ударах молнии в землю или другие объекты вблизи ВЛ или ПС.

Эффективность защиты от грозových перенапряжений внутренней изоляции подстанционного оборудования должна быть значительно более высокой по сравнению с воздушной и линейной изоляцией ВЛ, так как внутренняя изоляция оборудования подстанций имеет небольшие запасы по отношению к импульсным испытательным напряжениям и не обладает свойством самовосстановления после грозового перекрытия.

Защита оборудования подстанций от прямых ударов молнии обеспечивается системой стержневых и тросовых молниеотводов. Для оценки эффективности грозозащиты изоляции оборудования, подвесной и воздушной изоляции на ПС от прямых ударов молнии применяется такой же качественный, но более жесткий количественный критерий, что и для ВЛ, т.е. ожидаемое число обратных перекрытий при ударах молнии в молниеотводы, а также от прорывов через систему молниезащиты. В качестве критерия используется среднее ожидаемое число лет безаварийной работы ПС при этих воздействиях $T_{п.у}$. Считается, что если $T_{п.у}$ расчетно оценивается 500-3000 годами соответственно для ПС 35-1150 кВ, то грозозащита оборудования, подвесной и воздушной изоляции ПС надежно защищена от обратных перекрытий и прорывов на территории РУ.

Защита ПС от набегающих с ВЛ волн грозových перенапряжений основана на выборе соответствующих защитных аппаратов (ОПН, разрядников), числа и места их установки на ПС с тем, чтобы обеспечить такое снижение воздействующих волн грозových перенапряжений по амплитуде и крутизне, при котором в течение нормированного срока безаварийной эксплуатации $T_{н.в}$ не будут превышены допустимые значения перенапряжений для наиболее ответственного и дорогостоящего оборудования (трансформаторов, автотрансформа-

торов, шунтирующих реакторов и т.д.). Показатель надежности грозозащиты ПС 35-1150 кВ от набегающих волн $T_{н.в}$ должен быть соответственно не менее 200-1500 лет.

§4.2. Защита станций и подстанций от прямых ударов молнии

Для защиты подстанционного оборудования от прямых ударов молнии используется система молниеотводов. Требуемое количество и высота молниеотводов выбирается в соответствии с рекомендациями приложения А. При этом должны быть приняты меры по предотвращению обратных перекрытий с молниеотводов на токоведущие части РУ по воздуху и выноса высокого потенциала по земле.

Расчетное значение надежности защиты станций и ПС от прямых ударов молнии выбирают в зависимости от степени ответственности защищаемого объекта, от тяжести ущербов, возникающих при его поражении, интенсивности грозовой деятельности и пр. Наибольшая надежность грозозащиты должна обеспечиваться следующим объектам: ОРУ вместе с его шинными мостами и гибкими связями, зданиям машинного зала и ЗРУ; зданиям трансформаторной башни, маслохозяйства, нефтехозяйства, электролизной и ацетиленогенераторной станции; угледробилке, вагоноопрокидывателям, резервуарам с горючими жидкостями или газами; местам хранения баллонов с водородом; градирням и дымовым трубам. Электрические цепи 6 и 10 кВ, имеющие гальванические связи с генераторным напряжением, также защищаются от прямых ударов молнии.

Согласно требованиям /1/ для защиты от прямых ударов молнии выполняются мероприятия, указанные в табл. 5.8.

Допускается не защищать от прямых ударов молнии:

- ОРУ 20 - 35 кВ с трансформаторами единичной мощностью 1600 кВ·А и менее независимо от значения D_r ;
- ОРУ 20 - 35 кВ в районах с $D_r < 20$;
- подстанции напряжением 220 кВ и ниже на площадках с $\rho \geq 2000$ Ом·м при $D_r < 20$;
- здания ЗРУ в районе с $D_r < 20$.

Места и условия установки стержневых молниеотводов указаны в табл. 5.9.

Таблица 5.8

Мероприятия защиты электростанций и подстанций от прямых ударов молнии

Защищаемый объект	Защитные устройства
ОРУ, в том числе гибкие мосты и шинные связи	Стержневые молниеотводы
Здания машинного зала, ЗРУ при $D_r > 20$	1. Заземление металлических и железобетонных конструкций кровли и металлической кровли 2. Стержневые молниеотводы или заземленные молниеприемные сетки на крыше зданий
Дымовые трубы: - металлические; - кирпичные, бетонные и железобетонные.	Заземления Стальные полосы-молниеприемники на вершине и заземляющие спуски, присоединенные к заземлителю
Здания трансформаторной башни, маслохозяйства, нефтехозяйства, электролизной станции	1. Отдельно стоящий стержневой или тросовый молниеотвод. Импульсное сопротивление каждого заземления не более 100 Ом при $\rho < 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и не более 40 Ом при $\rho > 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ 2. Заземление металлических корпусов
Угледробилки, вагоноопрокидыватели, резервуары с горючими жидкостями или газами, места хранения баллонов с водородом	1. Стержневые молниеотводы, устанавливаемые отдельно или на самом сооружении при толщине крыши или стенки не менее 4 мм 2. Заземление корпуса установки при толщине металлической крыши или стенки 4 мм и более; при объеме менее 200 м^3 независимо от толщины металла

При установке стержневых молниеотводов на конструкциях ОРУ следует использовать защитные действия высоких объектов (опор ВЛ, прожекторных мачт и т.п.).

Порталы трансформаторов, связанных с вращающимися машинами, открытыми токопроводами или гибкими связями, должны входить в зону защиты отдельно стоящих или установленных на других порталах молниеотводов. Не допускается установка молниеотводов на конструкциях ОРУ, находящихся ближе 15 м от указанных выше объектов, связанных с вращающимися машинами.

Места и условия установки стержневых молниеотводов

Места	Условия
1	2
Конструкции ОРУ	1. На конструкциях ОРУ напряжением 35-150 кВ стержневые молниеотводы могут устанавливаться: а) при эквивалентном удельном сопротивлении грунта в грозовой сезон: до 500 Ом·м (35кВ) и до 1000 Ом·м (110 и 150 кВ) - независимо от площади заземляющего устройства подстанции; от 500 до 750 Ом·м (35кВ) и от 1000 до 2000 Ом·м (110 и 150 кВ) - при площади заземляющего устройства подстанции (ПС) 10000 м² и более; б) от стоек конструкций ОРУ молниеотводами должно быть обеспечено растекание тока молнии по магистралям заземления не менее чем в трех-четырех направлениях для ОРУ 35 кВ и не менее чем в двух-трех для ОРУ 110 и 150 кВ, с углом не менее 90° между соседними. в) должно быть установлено не менее одного вертикального электрода длиной 3-5 м на каждом направлении, на расстоянии не менее длины электрода от места присоединения к магистрали заземления стойки с молниеотводом. г) гирлянды подвесной изоляции на порталах ОРУ 35 кВ должны иметь следующее количество изоляторов: - не менее шести изоляторов при расположении вентильных разрядников или соответствующих им по уровню остающихся напряжений ОПН не далее 15 м по магистралям заземляющего устройства от места присоединения к нему; - не менее семи изоляторов в остальных случаях; д) расстояние по воздуху от конструкций ОРУ, на которых установлены молниеотводы, до токоведущих частей должно быть не менее длины гирлянды. 2. В ОРУ 220 кВ и выше.

1	2
Трансформаторные порталы, порталы шунтирующих реакторов и конструкции ОРУ, удаленные от трансформаторов или реакторов по магистралям заземления менее, чем на 15 м	1. В пределах контура заземления в грозовой сезон, $\rho < 350$ Ом·м. 2. Непосредственно на выводах обмоток трансформаторов 3 - 35 кВ или на расстоянии не более 5 м от них по ошиновке (включая ответвления к защитным аппаратам) должны быть установлены защитные аппараты: ограничители напряжения нелинейные - ОПН или вентильные разрядники – РВ. 3. От портала с молниеотводом должно обеспечиваться растекание тока молнии по магистралям заземления в трех-четырёх направлениях. 4. На расстоянии 3 - 5 м от портала с молниеотводом на каждой магистрали заземления должны быть установлены по два-три вертикальных электрода длиной 3 - 5 м. 5. На подстанциях с высоким напряжением 20 - 35 кВ при установке молниеотвода на трансформаторном портале у заземляющего контура должно быть сопротивление $R \leq 4$ Ом (без учета выносного заземления). 6. Заземляющие проводники защитных аппаратов и трансформаторов рекомендуется присоединять к заземляющему устройству подстанции поблизости один от другого.
Отдельно стоящие молниеотводы с обособленными заземлителями	1. Если не могут быть выполнены условия установки молниеотвода на конструкциях ОРУ. 2. Расстояние по земле l_3 между обособленным заземлителем молниеотвода и заземляющим контуром ОРУ должно быть таким, чтобы исключать перекрытие по земле между заземлителями с вероятностью не более 0,1. При этом должно выполняться условие (5.39). 3. Расстояние по воздуху l_v от отдельно стоящего молниеотвода с обособленным заземлителем до токоведущих частей, заземленных конструкций и оборудования ОРУ должно быть таким, чтобы исключать перекрытия по воздуху с вероятностью не более 0,1. При этом должно выполняться условие (5.38). 4. Сопротивление заземлителя должно быть не более 80 Ом.

Установка молниеотводов на зданиях ЗРУ не является обязательной. В случае выполнения кровли здания полностью из металла или применения металлических несущих конструкций достаточно заземлить металлические части кровли. Плоскую неметаллическую или железобетонную кровлю защищают наложением молниеприемной сварной сетки из стальной проволоки непосредственно на кровлю или под слой негорючего утеплителя или гидроизоляции. При этом для предотвращения нежелательной разности потенциалов между различными металлическими элементами здания (трубы, вентиляционные устройства, заземляющие спуски и пр.) они должны быть соединены между собой.

При использовании в качестве молниеприемной сетки стальной арматуры железобетонных плит кровли возможно расщепление бетона. Этот способ грозозащиты зданий не рекомендуется в сильногрозовых районах. Защита зданий ЗРУ от прямых ударов экономически оправдана при интенсивности грозовой деятельности 20 грозовых часов в год и более. Число грозовых разрядов в сооружение N определяется по формуле

$$N = n_0 (a_c + 2R_{\text{экв}})(b_c + 2R_{\text{экв}})10^{-6}, \quad (5.35)$$

где n_0 - плотность разрядов молнии на 1 км^2 земной поверхности (принимается по рекомендациям приложения В);

a_c, b_c, h_c - длина, ширина и высота сооружения, м;

$R_{\text{экв}}$ - эквивалентная ширина, с которой сооружение собирает боковые разряды молнии, м:

$$\begin{aligned} \text{при } h_c \leq 30 \text{ м} \quad R_{\text{экв}} &= 5h_c - \frac{2h_c^2}{30}; \\ \text{при } h_c > 30 \text{ м} \quad R_{\text{экв}} &= 0,75(h_c + 90). \end{aligned}$$

Здания с неметаллической или железобетонной кровлей допускается не защищать, если $N < 0,05$ в год.

Для предотвращения обратных перекрытий с заземляющих спусков и металлических конструкций здания на ошиновку и оборудование ЗРУ, а также на токоведущие части наружных вводов должны быть приняты меры по улучшению экранировки здания за счет увеличения числа заземляющих спусков, их объединения (на крыше и у фундамента) и уменьшения сопротивления заземляющего контура.

Для защиты ОРУ от прямых ударов молнии применяются стержневые и тросовые молниеотводы. Последние в основном используются для защиты ошиновки большой протяженности. Наиболее простым и дешевым решением

является расположение молниеотводов на металлических конструкциях ОРУ и других высоких объектах. При такой схеме молниезащиты для ОРУ 35-150 кВ следует предусмотреть меры по предотвращению обратных перекрытий путем устройства дополнительного сосредоточенного заземлителя в месте входа тока молнии в землю. Для ОРУ 220 кВ и выше обратные перекрытия практически исключены.

При расчете вероятности обратного перекрытия следует учитывать, что портал с молниеотводами имеет более сложную конструкцию, чем отдельно стоящий молниеотвод (несколько стоек и молниеотводов) и располагается вблизи элементов ОРУ с различными уровнями изоляции. Контур заземления такого портала имеет сетчатую конструкцию с вертикальными заземляющими электродами.

Большую опасность для изоляции трансформаторов представляет установка молниеотводов на трансформаторных порталах, так как при поражении молнией молниеотвода, находящегося вблизи трансформатора, кожух трансформатора приобретает потенциал молниеотвода, который может привести к обратному перекрытию изоляции трансформатора. Допускается установка молниеотводов на трансформаторных порталах при выполнении условий, указанных в табл. 5.9.

Надежность защиты ОРУ станций и подстанций от прямых ударов молнии характеризуется числом случаев перекрытия изоляции при прорывах молнии через зону защиты молниеотводов и обратных перекрытий при ударах молнии в молниеотводы (для ОРУ 35-150 кВ) в год. Это число может быть определено по формуле

$$N_{п.у} = n_0 (a_T + 2R_{экв})(b_T + 2R_{экв})(\eta_{пр} P_{\alpha} P_{пр} + \eta_{оп} P_{оп}) 10^{-6}, \quad (5.36)$$

где a_T, b_T - длина и ширина территории ОРУ, м;

$R_{экв}$, и n_0 - как в формуле (5.35);

$\eta_{пр}, \eta_{оп}$ - вероятность перехода импульсного перекрытия изоляции в силовую дугу, соответственно, при разрядах молнии в ОРУ, минуя молниеотводы, и при обратных перекрытиях (в расчетах принимается равной 0,9);

P_{α} - вероятность грозового поражения ошиновки ОРУ, минуя молниеотводы (при использовании для выбора системы молниезащиты рекомендаций указанная вероятность имеет значение 0,05 или 0,005);

$P_{оп}$ - вероятность обратного перекрытия (может быть определена с помощью методов расчета обратных перекрытий, используемых для ВЛ);

$P_{\text{пр}}$ - доля опасных грозových перенапряжений, возникающих при непосредственном грозovém разряде в ошиновку ОРУ, минуя молниеотводы.

Наряду со значением $N_{\text{п.у}}$ в качестве показателя надежности ПС используется обратная величина

$$T_{\text{п.у}} = 1 / N_{\text{п.у}}, \quad (5.37)$$

которая характеризует среднюю повторяемость (в годах) опасных перенапряжений на ПС из-за грозových разрядов непосредственно в ЗРУ или ОРУ.

Система молниезащиты ПС должна обеспечить в зависимости от класса ее номинального напряжения $T_{\text{п.у}}$ не ниже следующих значений:

$U_{\text{н}}, \text{кВ}$	35	110	220	330	500	750	1150
$T_{\text{п.у}}$	500	700	1000	1500	2000	2500	3000

Если при установке молниеотводов на конструкциях ОРУ необходимая грозоупорность не может быть достигнута или порталы не рассчитаны на установку молниеотводов, грозозащиту следует выполнять отдельно стоящими молниеотводами с обособленными заземлителями, которые при хороших грунтах допускается подключать к контуру заземления подстанции. Сопротивление заземления молниеотвода при этом определяется сопротивлением заземления части контура подстанции в радиусе 20 м от места присоединения к нему заземляющего спуска молниеотвода.

Расстояние по воздуху $l_{\text{в}}$ от отдельно стоящего молниеотвода с обособленным заземлителем до токоведущих частей ОРУ, а также до ЗРУ, зданий и сооружений должно удовлетворять условиям:

$$l_{\text{в}} \geq (0,12R_{\text{и}} + H_{\text{с}}) \text{ и } l_{\text{в}} \geq 5 \text{ м}, \quad (5.38)$$

где $H_{\text{с}}$ - высота до точки возможного перекрытия над уровнем земли, м.

В грунтах с низкой проводимостью соединение заземлителя отдельно стоящего молниеотвода с контуром подстанции не допускается. Для предотвращения выноса высокого потенциала расстояние l_3 между обособленным заземлителем отдельно стоящего молниеотвода и ближайшей к нему точкой заземляющего контура подстанции, ЗРУ, зданий и сооружений следует определять из условий:

$$l_3 \geq 0,2R_{\text{и}} \text{ и } l_3 \geq 3 \text{ м}, \quad (5.39)$$

где $R_{\text{и}}$ - сопротивление заземления отдельно стоящего молниеотвода, значение которого должно быть не более 40 Ом.

При этом тросовая защита ВЛ не должна соединяться с порталами ОРУ: последний пролет ВЛ следует защищать отдельно стоящими молниеотводами.

При установке на конструкциях с молниеотводами, имеющими обособленные заземлители, светильников, радиоантенн или электрооборудования напряжением до 1000 В необходимы мероприятия по защите цепей электропроводки от грозовых повреждений, выноса высокого потенциала на контур заземления ОРУ и в цепи вторичной коммутации. Электропроводку рекомендуется прокладывать в металлической трубе на всем протяжении от электрооборудования на конструкции с молниеотводом до места присоединения к контуру заземления ОРУ и ввода в кабельный канал. Расстояние в земле от спуска трубы в землю до места присоединения к заземляющему контуру ОРУ (L_T , м) должно удовлетворять условиям:

$$L_T \geq 0,6R_{\text{и}} \text{ и } L_T \geq 10 \text{ м}, \quad (5.40)$$

Для увеличения скорости спада грозового перенапряжения вдоль трубы на ней рекомендуется устанавливать ряд вертикальных заземляющих электродов. В месте ввода в кабельный канал трубу с кабелем следует присоединить к контуру заземления ОРУ и соединить с оболочками других кабелей. По концам кабеля, идущего от конструкции с молниеотводом, во взрывоопасных помещениях рекомендуется устанавливать защитные аппараты - ОПН.

Заземлители отдельно стоящих молниеотводов в ОРУ могут быть присоединены к заземляющему устройству ОРУ (ПС) при соблюдении условий установки молниеотводов на конструкциях ОРУ. Место присоединения заземлителя отдельно стоящего молниеотвода к заземляющему устройству ПС должно быть удалено по магистралям заземления на расстояние не менее 15 м от места присоединения к нему трансформатора (реактора). В месте присоединения заземлителя отдельно стоящего молниеотвода к заземляющему устройству ОРУ 35-150 кВ магистрали заземления должны быть выполнены по двум-трем направлениям с углом не менее 90° между ними.

Расстояние по воздуху $l_{\text{в.с}}$ от отдельно стоящего молниеотвода, заземлитель которого соединен с заземляющим устройством ОРУ (ПС), до токоведущих частей должно составлять:

$$l_{\text{в.с}} > 0,1H + m, \quad (5.41)$$

где H - высота токоведущих частей над уровнем земли, м; m - длина гирлянды изоляторов, м.

Все объекты на территории подстанции высотой $h_{\text{хi}}$ должны находиться в зонах защиты системы молниеотводов на таких высотах. При этом выбирается такой вариант расстановки молниеотводов, при котором их число и высота были бы наименьшими.

При ударах молнии в молниеотводы возможны обратные перекрытия изоляции из-за падения напряжения от тока молнии на системе молниеотвод - заземлитель. Максимальное значение этого напряжения на высоте h_x определяется суммой падения напряжения на импульсном сопротивлении заземления $R_{\text{и}}$ и на индуктивности молниеотвода $L_0 h_x$. При косоугольной форме тока молнии с $I_{\text{м}}$ и $a_{\text{м}}$ напряжение

$$U_{\text{макс}} = R_{\text{и}} I_{\text{м}} + a_{\text{м}} L_0 h_x. \quad (5.42)$$

Рассмотрим отдельно стоящий молниеотвод с обособленным заземлителем (рис. 5.12) и молниеотвод на портале ОРУ (рис. 5.13). Известны средние разрядные градиенты воздушного промежутка $l_{\text{в}}$ ($E_{\text{вв}} \approx 500$ кВ/м) и промежутка в земле $l_{\text{з}}$ ($E_{\text{з}} \approx 300$ кВ/м); $U_{50\%}$ - среднее разрядное напряжение гирлянды изоляторов и $U_{\text{доп}}$ - допустимое импульсное напряжение оборудования, кВ.

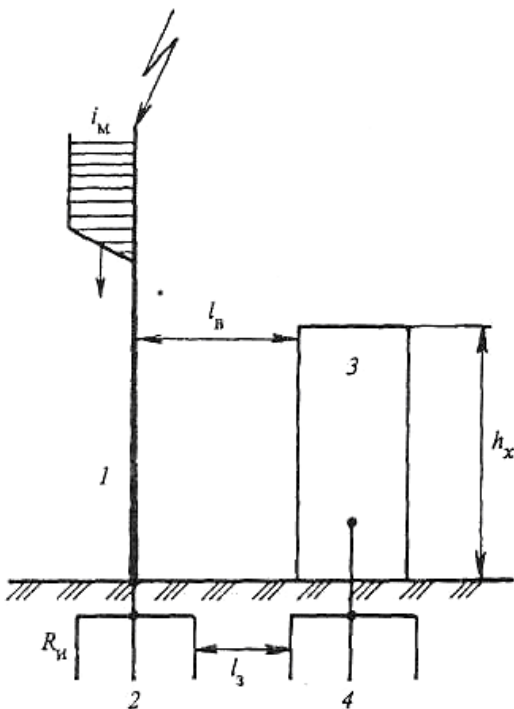


Рис. 5.12. Отдельно стоящий молниеотвод:
1 – молниеотвод; 2 – заземлитель молниеотвода; 3 – защищаемый объект; 4 – заземлитель объекта

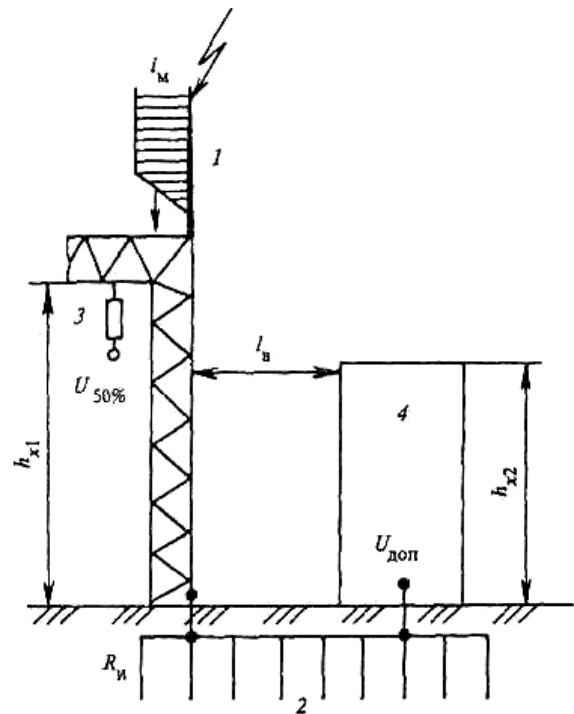


Рис. 5.13. Молниеотвод на конструкции ОРУ:
1 – молниеотвод; 2 – заземляющий контур; 3 – гирлянда изоляторов; 4 - защищаемый объект

Условия безопасного протекания тока молнии по молниеотводу имеют следующий вид:

для отдельно стоящего молниеотвода

$$\begin{aligned} E_B l_B &> I_M R_{и} + a_M L_0 h_x; \\ E_3 l_3 &> I_M R_{и}; \end{aligned} \quad (5.43)$$

для молниеотвода на портале ОРУ

$$\begin{aligned} U_{50\%} &> I_M R_{и} + a_M L_0 h_{x1}; \\ E_B l_B &> a_M L_0 h_{x2}; \\ U_{доп} &> I_M R_{и}. \end{aligned} \quad (5.44)$$

Эти соотношения позволяют решить задачи оценки надежности молние-защиты при прямом ударе молнии в подстанцию: по известным значениям l_B , l_3 , $U_{50\%}$, $U_{доп}$ определить параметры I_M , a_M , а по ним соответствующие вероятности повреждения изоляции $P_{иi}$ либо решить обратную задачу.

Годовое число повреждений оборудования при прямом ударе молнии в подстанцию определяется соотношением

$$\beta_1 = n_{уд.н/см} \left[P_{\alpha 1} + (1 - P_{\alpha 1}) \sum_i P_{иi} \right], \quad (5.45)$$

где $n_{уд.н/см}$ - число ударов молнии за D_r грозовых часов в год в сооружение, например открытое распределительное устройство (ОРУ) подстанции длиной A , м, шириной B , м, рассчитывается по формуле:

$$n_{уд.п/ст} = 6,7(A + 7h)(B + 7h) \frac{D_r}{100} 10^{-6}. \quad (5.46)$$

$P_{\alpha 1} = 0,01$; $P_{иi}$ определяются с использованием методов, изложенных в §3.4.

§4.3. Защита от импульсов грозовых перенапряжений, набегających с линии

На подходе к ПС грозовые волны возникают при прорыве молнии на провода или при обратных перекрытиях линейной изоляции при ударах молнии в опоры (тросы). Амплитуда грозовых волн в точке удара при прорывах молнии на провода ограничена импульсной прочностью линейной изоляции, а при обратных перекрытиях зависит от момента перекрытия (на фронте или хвосте волны) и падения напряжения на сопротивлении заземления и индуктивности опоры. При прорывах на проводах могут появляться срезанные и

полные волны. Полные волны более опасны, так как срезанные быстрее затухают за счет потерь энергии на импульсную корону. При обратных перекрытиях на проводах возникают волны с отвесным фронтом, опасные для междувитковой внутренней изоляции трансформаторов (автотрансформаторов) и реакторов.

При воздействии набегающих с ВЛ волн атмосферных перенапряжений схема РУ ведет себя, как сложный колебательный контур, в котором подстанционное оборудование участвует своими входными емкостями, а ошиновка - отрезками длинной линии с распределенными параметрами. В отдельных случаях, например, при расчете грозоупорности схем с вращающимися машинами, последние более правильно представлять не только входной емкостью, но и моделировать обмотку машины входным сопротивлением или отрезком длинной линии с распределенными параметрами. Волновые сопротивления обмоток, особенно мощных вращающихся машин, невелики (50-100 Ом), что существенно снижает воздействующие перенапряжения. Силовые трансформаторы представляются входной емкостью и отрезком длинной линии, замещающим обмотку. Однако волновое сопротивление обмотки обычно составляет несколько тысяч Ом и поэтому слабо снижает амплитуду колебательного импульса. Представление силового трансформатора входной емкостью несколько увеличивает расчетные грозовые перенапряжения на нем. При анализе схем грозозащиты мощных силовых трансформаторов должны быть учтены волновые свойства обмотки путем использования частотно-зависимых характеристик обмоток, предварительно полученных расчетным или экспериментальным путем.

При переходном процессе в сложном колебательном контуре ПС в отдельных ее точках могут появляться перенапряжения, превышающие импульсную прочность изоляции оборудования. Задача грозозащиты ПС состоит в снижении значений перенапряжений на ПС за счет использования защитных аппаратов с нелинейными вольт-амперными характеристиками (ограничителей перенапряжений или вентильных разрядников) и уменьшения числа опасных набегающих волн путем повышения грозоупорности ВЛ на подходе к ПС.

Старые методики и рекомендации по выбору типа, количества и места установки защитных аппаратов, а также длины защищенного подхода основывались на понятии "опасной зоны". Длина "опасной зоны" соответствовала предельной длине участка ВЛ на подходе к ПС, после пробега которого полная

волна с отвесным фронтом максимальной возможной амплитуды в результате деформации из-за потерь энергии на импульсную корону становилась безопасной для изоляции подстанционного оборудования. Описание этого метода дано далее.

Современные методы расчета грозозащиты ПС основаны на учете статистических распределений параметров импульсов атмосферных перенапряжений в точке их возникновения и вероятности поражения разрядами молнии отдельных участков ВЛ на подходе к ПС. Критерием выбора схемы грозозащиты ПС является повторяемость опасных перенапряжений в точках присоединения наиболее ответственного оборудования ПС (трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов).

Средства защиты РУ от набегающих грозовых волн. С воздушных линий электропередачи в результате поражения их молнией на подстанцию по проводам ВЛ набегают импульсы перенапряжений, которые могут иметь различную форму.

Средства грозозащиты и требуемая длина защищенного тросом подхода, определяемая затуханием волн при распространении по проводам за счет импульсной короны и потерь в земле, зависят от класса номинального напряжения ВЛ и схемы ПС. Наиболее опасные воздействия на изоляции ПС возникают при ударах молнии в ближайшие опоры и прорывах на провода в первых пролетах.

Комплекс средств грозозащиты ВЛ на подходе к ПС в зависимости от класса номинального напряжения должен выбираться с учетом рекомендаций в части влияния конструктивных параметров ВЛ 110-750 кВ на показатели их грозоупорности и с использованием справочных кривых по удельному числу грозовых отключений ВЛ 110-750 кВ на унифицированных опорах (приложение 23), а для ВЛ 6-35 кВ с учетом рекомендаций приложения 22 /8/.

Для оценочных расчетов защиты от набегающих импульсов перенапряжений используется расчетный импульс, который в месте удара молнии в ВЛ является бесконечно длинным прямоугольным с максимальным значением U_0 равным среднему разрядному напряжению изоляции ВЛ $U_{50\%}$. Импульс такой формы позволяет получить при расчетах наибольшие возможные значения перенапряжений на изоляции оборудования подстанции. Напряжение U_0 импульса не может превышать $U_{50\%}$ (при возможном $U_0 > U_{50\%}$ происходит перекрытие

изоляции на опорах ВЛ). Таким образом, изоляция ВЛ обеспечивает первый уровень ограничения перенапряжений.

Однако этот уровень оказывается недостаточным, так как не снижает воздействующее на изоляцию напряжение до безопасных значений. Организуется второй уровень ограничения перенапряжений путем установки в схеме подстанции защитных аппаратов ОПН и РВ в сочетании с выполнением защищенных подходов на ВЛ непосредственно у шин подстанции. Отметим, что в современных решениях применяются только ОПН, РВ установлены в схемах, разработанных в начале и середине XX в.

Необходимое количество и схема расстановки ОПН определяются на основании расчета грозозащиты ПС.

Все силовые трансформаторы, автотрансформаторы и шунтирующие реакторы 330 кВ и более высокого напряжения должны защищаться ОПН от грозовых и коммутационных перенапряжений.

§4.4. Защита подстанции номинальным напряжением 35 кВ и выше

Типовая схема защиты показана на рис. 5.14. В схему подстанции включены защитные аппараты F_1 (ОПН или РВ). На некоторых расстояниях по ошиновке от защитного аппарата находятся защищаемые объекты, например, силовой трансформатор Т (расстояние l_1); линейные выключатели Q (расстояние l_2). Участки ВЛ непосредственно у шин подстанции защищены тросами. Это защищенные подходы (ЗП) длиной $l_{з.п.}$

На ВЛ с тросовой защитой по всей длине (ВЛ₁ на рис. 5.14) участки $l_{з.п.}$ часто называют условными защищенными подходами, на которых применяют уменьшенные защитные углы α и выполняют опоры с более низкими значениями $R_{и.}$

На ВЛ без тросовой защиты (ВЛ₂ на рис. 5.14) на длине $l_{з.п.}$ установлены тросы. В начале ЗП у ВЛ на деревянных опорах на опоре монтируется разрядник (ОПН) F_2 , так как первая подтросовая опора является местом с ослабленной изоляцией. Разрядник (ОПН) F_3 , устанавливаемый в конце ЗП, ограничивает перенапряжения при отражении волны напряжения от отключенного выключателя Q. Разрядник (ОПН) F_3 может устанавливаться и на подходах ВЛ с тросами по всей длине.

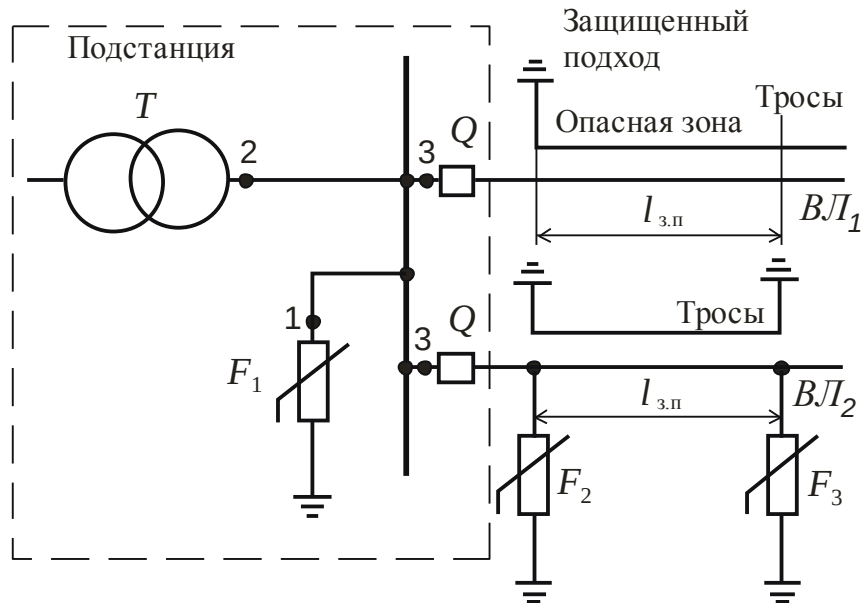


Рис . 5.14. Типовая схема молниезащиты подстанций напряжением 35 кВ и выше

При воздействии импульса напряжения U_0 на подстанцию защитный аппарат при протекании импульсного тока по его нелинейному резистору ограничивает на своих зажимах импульсное напряжение до значения остающегося напряжения $U_{ост}$. Однако в схеме развивается сложный волновой процесс: на изоляцию объектов, удаленных от защитного аппарата, воздействует напряжение, превышающее $U_{ост}$. Его максимальное значение, кВ, связано с $U_{ост}$ соотношением:

$$U_{из. макс} = U_{ост} + \Delta U_k, \quad (5.47)$$

где ΔU_k - координационный интервал напряжения, значение которого зависит от взаимного удаления защитного аппарата и защищаемого объекта l , м, а также от крутизны фронта воздействующего импульса напряжения a , кВ/мкс. Точный расчет ΔU_k осуществляется путем математического или физического моделирования волновых процессов в схеме. Однако приближенно его можно оценить как

$$\Delta U_k = 2al/300. \quad (5.48)$$

Для изоляции электрооборудования известно допустимое импульсное напряжение $U_{доп}$, кВ. Условие защищенности изоляции определяется соотношением

$$U_{доп} \geq U_{из. макс} = U_{ост} + 2al/300. \quad (5.49)$$

Длина $l_{з.п}$ на ВЛ определяется следующим образом. Для наиболее удаленных от защитного аппарата защищаемых объектов (для схемы рис. 5.14 это

расстояние l_1 между точками 1 и 2; l_2 между точками 1 и 3) рассчитываются зависимости $U_{\text{из. макс}} = f(a)$, с помощью которых по известным значениям $U_{\text{доп}}$ определяются допустимые значения $a_{\text{доп}i}$, превышение которых опасно для изоляции в различных точках схемы (для рис. 5.14 это значения $a_{\text{доп}2}$ и $a_{\text{доп}3}$ указанное на рис. 5.15). Меньшее из всех значений $a_{\text{доп}i}$ дает значение $a_{\text{доп}}$ для всей схемы.

Допустимые напряжения для изоляции определяются испытательными напряжениями грозвым импульсом по ГОСТ 1516.3-96. Для изоляции силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов допустимое напряжение, кВ, рассчитывается по соотношению

$$U_{\text{доп. т}} = 1,1(U_{\text{п.и}} - 0,5U_{\text{ном}}), \quad (5.50)$$

где $U_{\text{п.и}}$ - испытательное напряжение при полном импульсе для внутренней изоляции при испытании без возбуждения;

$U_{\text{ном}}$ - действующее значение линейного номинального напряжения.

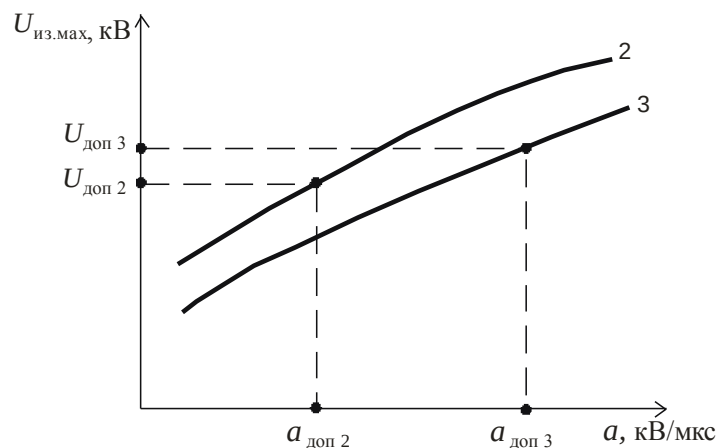


Рис. 5.15. Зависимости $U_{\text{из. макс}} = f(a)$ для точек 2 и 3 схемы рис. 5.14

Допустимое напряжение для изоляции остальных аппаратов, кВ, можно принять ориентировочно равным испытательному напряжению срезанным импульсом внешней изоляции $U_{\text{с.и}}$, кВ:

$$U_{\text{доп. ап}} \approx U_{\text{с.и}}. \quad (5.51)$$

Длина защищенного подхода $l_{\text{з.п}}$, км, рассчитывается по соотношению:

$$l_{\text{з.п}} = U_{50\%} / (a_{\text{доп}} \Delta\tau_{\text{ф}}). \quad (5.52)$$

Входящая в соотношение величина $\Delta\tau_{\text{ф}}$ определяет удлинение фронта набегающего импульса за счет его деформации под действием импульсной короны. Значение $\Delta\tau_{\text{ф}}$, мкс/км, вычисляется по эмпирическому выражению:

$$\Delta \tau_{\phi} = \left(0,5 + \frac{0,008 U_{50\%}}{h_{\text{пр.ср}}} \right) \frac{1}{k}, \quad (5.53)$$

где $h_{\text{пр.ср}}$ - средняя высота подвеса провода, м;

k - коэффициент, учитывающий влияние расщепления фазы ВЛ на $\Delta \tau_{\phi}$. При числе проводов в фазе 1; 2; 3; 4 коэффициент k соответственно равен 1,0; 1,2; 1,45; 1,55.

В соответствии с требованиями ПУЭ и других руководящих указаний при выполнении схемы защиты необходимо учитывать следующие рекомендации:

- для повышения надежности защиты использовать защитные аппараты I и II групп;
- защитные аппараты должны устанавливаться в непосредственной близости от выводов автотрансформаторов;
- в цепи между защитным аппаратом и защищаемым объектом не допускает установка коммутационных аппаратов, если аппарат предназначен для защиты автотрансформаторов и шунтирующих реакторов, а также обмоток трансформаторов напряжением 150 кВ и выше с основным уровнем изоляции по ГОСТ 1516.3-96;
- количество устанавливаемых на подстанции защитных аппаратов и места их включения должны обеспечивать выполнение условия (5.49);
- наиболее тяжелым режимом работы подстанции в отношении обеспечения защиты от импульсов грозовых перенапряжений, набегающих с ВЛ, является режим с одной ВЛ, подключенной к шинам подстанции (тупиковый режим). Наличие других ВЛ, подключенных к шинам подстанции, снижает $U_{\text{ост}}$ за счет уменьшения импульсного тока через защитный аппарат из-за параллельного подключения к его нелинейному резистору волновых сопротивлений ВЛ;
- в случае подключения волновых трансформаторов 35 кВ и выше к шинам РУ длинными кабелями их большая емкость и малая индуктивность существенно облегчают условия молниезащиты; в этом случае достаточно установить защитный аппарат на шинах возможно ближе к месту подключения к ним кабеля.

Основные характеристики защищенных подходов к подстанциям напряжением 35 кВ и выше, нормированные ПУЭ, приведены в табл. 5.10. Отметим, что на подходах ВЛ 110 – 330 кВ с очень высокими одностоечными двухцеп-

ными опорами рекомендуется выполнять сопротивление заземления $R = 5; 10; 15 \text{ Ом}$ соответственно при ρ до 100; 100 – 500; более 500 Ом·м.

Таблица 5.10

Характеристики защищенных подходов к подстанциям номинальным напряжением 35 кВ и выше

Параметр	Номинальное напряжение, кВ					
	35	110	150	220	330	500 и выше
Длина защищенного подхода $l_{з.п.}$, км	1 - 2	1 - 3	2 - 3	2 - 3	2 - 4	3 - 4
Защитный угол α , град	25 - 30	25 - 30	25 - 30	20 - 25	20 - 25	25
Сопротивление заземления R , Ом, не более, при ρ , Ом·м:						
	10	10	10	10	10	10
	15	15	15	15	15	15
	20	20	20	20	20	20
	30	30	30	30	30	30

Годовое число повреждений оборудования подстанций напряжением 35 кВ и выше от импульсов грозовых перенапряжений, набегающих с ВЛ, характеризующие надежность защиты β_2 , определяется числом таких импульсов, образующихся в пределах защищенных подходов $l_{з.п.}$, вследствие прорыва молнии сквозь тросовую защиту (вероятность P_α); удара молнии в вершину опоры (доля ударов $\Delta_{оп}$) с последующим перекрытием изоляции на опоре (вероятность $P_{оп}$); удара молнии в трос в пролете (доля ударов $\Delta_{тр}$) с последующим перекрытием воздушного промежутка трос – провод (вероятность $P_{тр}$).

При известных длинах $l_{з.п.}$, км; числе грозовых часов за год D_Γ ; числе ВЛ, подключенных к шинам подстанций, m значение β_2 рассчитывается следующим образом:

$$\beta_2 = m n_{уд.з.п} [P_\alpha + (1 - P_\alpha)(\Delta_{оп} P_{оп} + \Delta_{тр} P_{тр})], \quad (5.54)$$

где $n_{\text{уд.з.п}}$ – число ударов молнии в защищенный подход.

Для защиты нейтралей обмоток 110–150 кВ силовых трансформаторов, имеющих изоляцию, пониженную относительно изоляции линейного конца обмотки и допускающую работу с разземленной нейтралью, следует устанавливать ОПН, обеспечивающие защиту их изоляции и выдерживающие в течение нескольких часов квазиустановившиеся перенапряжения при обрыве фазы линии.

В нейтрали трансформатора, изоляция которой не допускает разземления, установка разъединителей не допускается.

§4.5. Защита РУ номинальным напряжением 3-20 кВ

Рекомендуемые схемы защиты РУ 3-20 кВ приведены на рис. 5.16.

Применение тросов для защиты подходов ВЛ 3-20 кВ неэффективно. В РУ устанавливается элемент F_1 (РВ или ОПН). Ограничение $U_{\text{макс}}$ импульса, набегающего на подстанцию с ВЛ на деревянных опорах (ВЛ₁ на рис. 5.16), осуществляется элементом F_2 (РТ), установленным на расстоянии 200-300 м от ввода на подстанцию. Сопротивление его заземления должно быть не выше 10 Ом. На ВЛ с металлическими или железобетонными опорами установки F_2 не требуется. Однако при применении на ВЛ 3-20 кВ изоляции, усиленной более чем на 30 % (например, из-за загрязнения атмосферы), на расстоянии 200-300 м от ПС и на ее вводе должны быть установлены ИП. Металлические и железобетонные опоры на протяжении 200-300 м подхода к ПС должны быть заземлены с сопротивлением согласно /1/.

Разрядник F_3 (РТ) защищает изоляцию разомкнутого выключателя ВЛ, который может быть длительно отключен. При этом расстояние по ошиновке от F_3 до отключенного выключателя должно быть не более 10 м. При мощности трансформатора до 0,63 МВ·А допускается не устанавливать трубчатые разрядники на подходах ВЛ 3-20 кВ с деревянными опорами. Если невозможно выдержать указанные расстояния или на отключенном конце ВЛ имеются трансформаторы напряжения (ТН), то вместо F_3 должны быть установлены РВ или ОПН. Расстояние от РВ до защищаемого оборудования должно быть при этом не более 10 м, а для ОПН – увеличенное пропорционально разности испытательного напряжения ТН и остающегося напряжения ОПН.

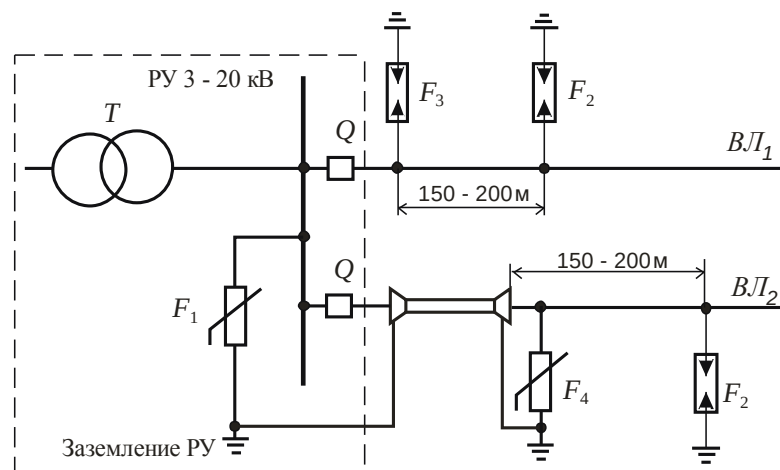


Рис. 5.16. Типовая схема молниезащиты РУ напряжением 3-20 кВ

Удовлетворительная надежность схемы достигается за счет небольшой поражаемости сравнительно коротких ВЛ 3-20 кВ, а также за счет относительно большого координационного интервала напряжения ΔU .

Защита ПС 3-20 кВ с нижним напряжением до 1 кВ, присоединенных к ВЛ 3-20 кВ, должна выполняться РВ или ОПН, устанавливаемыми со стороны высокого и низкого напряжения ПС.

Если ВЛ 3-20 кВ соединены с РУ кабельной перемычкой (ВЛ₂ на рис. 5.16), то для защиты кабельной воронки в месте перехода ВЛ в кабель устанавливается элемент F₄ (РВ или ОПН). В этом случае заземляющий зажим разрядника, металлические оболочки кабеля, а также корпус кабельной муфты должны быть соединены между собой по кратчайшему пути. Заземляющий зажим разрядника должен быть соединен с заземлителем отдельным спуском. Если ВЛ выполнена на деревянных опорах, то на расстоянии 200-300 м от конца кабеля необходимо устанавливать комплект защитных аппаратов. При длине кабельной вставки более 50 м установка РВ или ОПН на ПС не требуется. Сопротивление заземлителя аппарата должно быть в соответствии с /1/.

Длина опасной зоны на ВЛ 3-20 кВ оценивается значением $l_{0,3} = 150-200$ м. Повреждение оборудования РУ 3-20 кВ возможно при ударе молнии в провод ВЛ в пределах опасной зоны. Это определяет годовое число β_3 повреждений оборудования РУ 3-20 кВ от импульсов перенапряжений, набегающих с ВЛ.

§4.6. Вентильные разрядники

Принцип действия и основные характеристики. Основными элементами вентильного разрядника являются многократный искровой промежуток и соединенный последовательно с ним резистор с нелинейной вольт-амперной характеристикой. При воздействии на разрядник импульса грозового перенапряжения пробивается искровой промежуток и через разрядник проходит импульсный ток, создающий падение напряжения на сопротивлении разрядника. Благодаря нелинейной вольт-амперной характеристике материала, из которого выполнено сопротивление, это напряжение мало меняется при существенном изменении импульсного тока и незначительно отличается от импульсного пробивного напряжения искрового промежутка разрядника $U_{пр.и}$. Одной из основных характеристик разрядника является остающееся напряжение разрядника $U_{ост}$ т. е. напряжение при определенном токе (5–14 кА для разных $U_{ном}$), который называется током координации. Импульсное пробивное напряжение искрового промежутка разрядника и близкое к нему напряжение $U_{ост}$ должны быть на 20–25% ниже разрядного напряжения изоляции (координационный интервал).

После окончания процесса ограничения перенапряжения через разрядник продолжает проходить ток, определяемый рабочим напряжением промышленной частоты. Этот ток (так же, как и у трубчатых разрядников) называется сопровождающим током. Сопротивление нелинейного резистора разрядника резко возрастает при малых по сравнению с перенапряжениями рабочих напряжениях, сопровождающий ток существенно ограничивается, и при переходе тока через нулевое значение дуга в искровом промежутке гаснет. Наибольшее напряжение промышленной частоты на вентильном разряднике, при котором надежно обрывается проходящий через него сопровождающий ток, называется напряжением гашения $U_{гаш}$, а соответствующий ток — током гашения $I_{гаш}$. Гашение дуги сопровождающего тока должно осуществляться в условиях однофазного замыкания на землю, так как во время одной и той же грозы могут произойти перекрытие изоляции на одной фазе и срабатывание разрядника в двух других фазах. Таким образом, напряжение гашения должно быть равным напряжению на неповрежденных фазах при однофазном замыкании на землю:

$$U_{гаш} = k_3 U_{ном}, \quad (5.55)$$

где k_3 — коэффициент, зависящий от способа заземления нейтрали (ниже будет показано, что $k_3 = 0,8; 1,1$ соответственно для установок с заземленной и изолированной нейтралью); $U_{ном}$ — номинальное линейное напряжение.

Эффективность действия разрядника характеризуется так называемыми защитными отношениями:

$$k = U_{пр\sim}/U_{гаш}, \quad (5.56)$$

$$k_{защ} = U_{ост}/\sqrt{2} U_{гаш}, \quad (5.57)$$

где $U_{пр\sim}$ — пробивное напряжение искрового промежутка разрядника при 50 Гц.

Основное значение для грозозащитных разрядников имеет снижение $k_{защ}$, которое может быть достигнуто двумя путями. Первый путь — получение более пологой вольт-амперной характеристики. Второй путь — увеличение тока гашения за счет улучшения дугогасящих свойств промежутка — позволяет снизить вольт-амперную характеристику во всем диапазоне токов.

Вентильные разрядники обладают определенной пропускной способностью, т.е. предельной величиной тока, который они могут многократно пропускать без изменения своих электрических характеристик. Пропускная способность разрядника зависит от теплостойкости его нелинейного резистора. До недавнего времени вследствие недостаточной пропускной способности вентильные разрядники отстраивались от внутренних перенапряжений, т.е. имели пробивное напряжение выше возможной величины внутренних перенапряжений и предназначались только для ограничения кратковременных перенапряжений грозового происхождения. Разработка нелинейных резисторов с более высокой пропускной способностью и применение новых принципов гашения дуги сопровождающего тока позволяют в настоящее время возложить на разрядники также и функцию ограничения более длительных внутренних перенапряжений. Это обстоятельство открывает перспективу дальнейшего снижения уровней изоляции электрооборудования и повышения его экономической эффективности.

Нелинейные резисторы вентильных разрядников. Основу нелинейного резистора разрядника составляет порошок электротехнического карборунда SiC. На поверхности зерен карборунда имеется запорный слой толщиной порядка 100 мкм из окиси кремния SiO. Удельное сопротивление собственно зерен карборунда невелико — около 10^{-2} Ом·м. Сопротивление запорного слоя нелинейно зависит от напряженности электрического поля. При малых напряженностях поля (при небольших напряжениях на резисторе) удельное сопро-

тивление запорного слоя составляет 10^4 – 10^6 Ом·м, все напряжение ложится на запорный слой, и он определяет значение сопротивления нелинейного резистора. При повышении напряженности поля сопротивление запорного слоя резко падает, и значение сопротивления нелинейного резистора начинает определяться собственно карборундом.

Свойства материала резко менять свое сопротивление в зависимости от напряжения, обеспечивая пропускание очень больших токов при высоких напряжениях и весьма малых – при пониженных напряжениях, называют «вентильными». Отсюда и название аппарата: вентильный разрядник (РВ).

Нелинейные резисторы вентильных разрядников выполняются в виде дисков, состоящих из карборундового порошка и связующего материала. В настоящее время применяются диски из вилита и тервита. Для изготовления вилитовых дисков в качестве связки применяется жидкое стекло. Это позволяет спекать диски при сравнительно низкой температуре (около 300°C). Тервитовые диски при изготовлении обжигаются при температуре свыше 1000°C , при этом часть запорных пленок выгорает, что повышает пропускную способность материала, но уменьшает степень нелинейности.

Пропускная способность нелинейного элемента разрядника характеризуется предельной энергией, которая может быть выделена без разрушения дисков; она зависит и от максимального значения тока, и от его длительности.

В условиях эксплуатации для грозовых перенапряжений характерны токи с большими максимальными значениями и малой длительностью. При внутренних перенапряжениях, напротив, через разрядник могут проходить значительно меньшие токи длительностью около нескольких миллисекунд. Поэтому пропускную способность вентильных разрядников принято характеризовать максимальным значением импульса тока 20/40 мкс и током прямоугольной формы длительностью 2 мс (в некоторых случаях максимальным значением импульса тока 3/8 мс). Эти воздействия разрядники должны выдерживать не менее 20 раз.

Предельным максимальным значением импульсного тока для вилитовых и тервитовых дисков является ток $I_{\text{доп}}=5\text{--}14$ кА. Как известно, токи молнии могут достигать значительно больших значений. Ограничение токов, проходящих через разрядник, до допустимой величины возлагается на схему защитного подхода к подстанции.

При длительности 2 мс для вилитовых дисков диаметром 150 мм предельными являются токи до 400 А, поэтому вилитовые разрядники предназначены в основном для защиты от грозовых перенапряжений. Тервит обладает значительно большей пропускной способностью: до 750 А (при длительности 2 мс) для дисков диаметром 70 мм и до 1500 А для дисков диаметром 115 мм. В связи с этим разрядники с тервитовыми резисторами могут использоваться как для защиты от грозовых перенапряжений, так и для ограничения внутренних перенапряжений.

Искровые промежутки вентильных разрядников. Работа вентильного разрядника начинается с пробоя искровых промежутков (ИП) и заканчивается гашением дуги сопровождающего тока. На каждом из этих этапов работы разрядника к ИП предъявляются различные требования.

На первом этапе процесс определяется вольт-секундной характеристикой ИП. Для успешной защиты подстанционной изоляции эта характеристика должна быть достаточно пологой. Получить такую вольт-секундную характеристику удастся только с помощью многократных ИП, т. е. большого числа последовательно включенных единичных промежутков, а также с помощью активизации единичных промежутков.

Простейший единичный промежуток состоит из двух латунных электродов, разделенных миканитовой шайбой. Электрическое поле между электродами близко к однородному. При приложении к промежутку напряжения в воздушных прослойках между поверхностью электродов и миканитом из-за разницы диэлектрических проницаемостей воздуха и миканита возникает высокая напряженность поля и начинается ионизация, снабжающая начальными электронами межэлектродное пространство. Промежуток в результате этого пробивается при коэффициентах импульса, близких к единице, за десятые доли микросекунд (активизация промежутка).

Гашение сопровождающего тока простейшими искровыми промежутками основано на естественном восстановлении электрической прочности между холодными электродами. Предельная амплитуда тока гашения составляет $I_{\text{гаш}} = 80 - 100 \text{ А}$.

Использование единичного искрового промежутка с интенсификацией процесса гашения дуги позволяет получить $I_{\text{гаш}} = 250 \text{ А}$. Промежуток представляет собой кольцевую щель между двумя медными концентрически расположенными электродами. Щель пронизывается магнитным полем, создаваемым

постоянными магнитами. Активизация искрового промежутка осуществляется за счет ионизации в месте контакта специальных электродов с диэлектрической прокладкой. Возникающая в результате пробоя промежутка дуга под действием магнитного поля начинает с большой скоростью вращаться по кольцевой щели, интенсивно охлаждаясь. При обрыве дуги в промежутке восстанавливаемая прочность нарастает значительно быстрее, чем в обычном промежутке с неподвижной дугой. В результате в искровом промежутке с вращающейся дугой могут гаситься значительно большие сопровождающие токи, что позволяет уменьшить число дисков, а, следовательно, и остающееся напряжение. Для разрядников с простейшими искровыми промежутками защитное отношение составляет 2,6, а для разрядников с магнитным гашением дуги—2,2, т.е. при том же напряжении гашения остающееся напряжение на 25% ниже. Дальнейшее снижение защитного отношения до 1,7 может быть достигнуто путем применения так называемых токоограничивающих искровых промежутков. В этих промежутках дуга сопровождающего тока с помощью магнитного поля вводится в узкую щель и интенсивно деионизируется. Сопротивление дуги растет, и на искровых промежутках создается достаточно большое падение напряжения ΔU . В этих условиях нелинейный резистор должен ограничивать сопровождающий ток до значения $I_{\text{гаш}}$ при напряжении $U_{\text{гаш}} - \Delta U$.

Сопровождающий ток находится в фазе с рабочим напряжением на разряднике. Поэтому после гашения тока, которое происходит при его прохождении через нулевое значение, напряжение на промежутках восстанавливается приблизительно по синусоиде промышленной частоты и медленнее, чем электрическая прочность промежутков. Важную роль в процессе гашения сопровождающего тока играет равномерное распределение восстанавливающегося напряжения между последовательно соединенными единичными промежутками, которое достигается с помощью шунтирования промежутков резисторами с большим сопротивлением.

В импульсном режиме распределение напряжения между промежутками определяется их собственными емкостями и емкостями по отношению к земле, нелинейному элементу и вводу, т. е. многократный искровой промежуток разрядника представляет собой емкостную цепочку, подобную, например, схеме замещения гирлянды изоляторов. Импульсное напряжение по такой цепочке распределяется очень неравномерно, что обеспечивает быстрый каскадный пробой всех промежутков разрядника. Таким образом, сочетание неравномер-

ного распределения напряжения по промежуткам с предварительной ионизацией (активизацией) единичного промежутка с однородным полем обеспечивает низкие коэффициенты импульса и пологий характер вольт-секундной характеристики вентильного разрядника.

В разрядниках на напряжения 110 кВ и выше число единичных промежутков очень велико и неравномерность распределения напряжения приводит при крутых фронтах волн к коэффициентам импульса меньше единицы. Для того чтобы удержать коэффициент импульса близким к единице, разрядники на эти напряжения снабжаются экранирующими кольцами, которые способствуют выравниванию распределения напряжения по промежуткам.

Разрядники всех классов напряжений разделены на четыре группы. Наилучшими защитными свойствами обладают разрядники I группы, имеющие наименьшие значения остающегося напряжения. Далее идут разрядники II, III и IV групп. Выпускаемые промышленностью серии разрядников распределены по группам: I группа - серии РВТ и РВРД; II группа - серии РВМ, III группа - серии РВС, IV группа - серии РВП.

§4.7. Нелинейные ограничители перенапряжений

Основной недостаток вентильных разрядников связан с тем, что резисторы на основе карборунда обладают сравнительно невысокой нелинейностью. Снижение защитного отношения вентильных разрядников достигается ценой значительного усложнения искровых промежутков, которые в разрядниках I группы принимают часть напряжения гашения.

Разработанные резисторы на основе окиси цинка обладают значительно большей нелинейностью, чем резисторы на основе карборунда. Это позволило создать новый тип защитного аппарата – нелинейный ограничитель перенапряжения (ОПН).

Преимуществами ОПН являются: возможность глубокого ограничения перенапряжения, в том числе междупазных, малые габариты, позволяющие использовать их в качестве опорных изоляционных колонн, большая пропускная способность.

Уровень ограничения коммутационных перенапряжений с помощью ОПН составляет $(1,65-1,80)U_{\phi}$. Уровень ограничения грозовых перенапряжений составляет $(2,2-2,4)U_{\phi}$ в сетях 110 кВ и снижается до $2U_{\phi}$ для ЛЭП 750 кВ.

ОПН комплектуются в виде параллельно соединенных колонок из дисков диаметром 28 и высотой 8 мм. Торцы дисков металлизированы и обеспечивают контакт между дисками. В соответствии с пропускной способностью число параллельных колонок резисторов в ОПН варьируется от 4 в ограничителе перенапряжений на 110 кВ до 30 в ограничителе перенапряжений на 750 кВ. На рис.5.17 а,б приведен внешний вид ОПН.

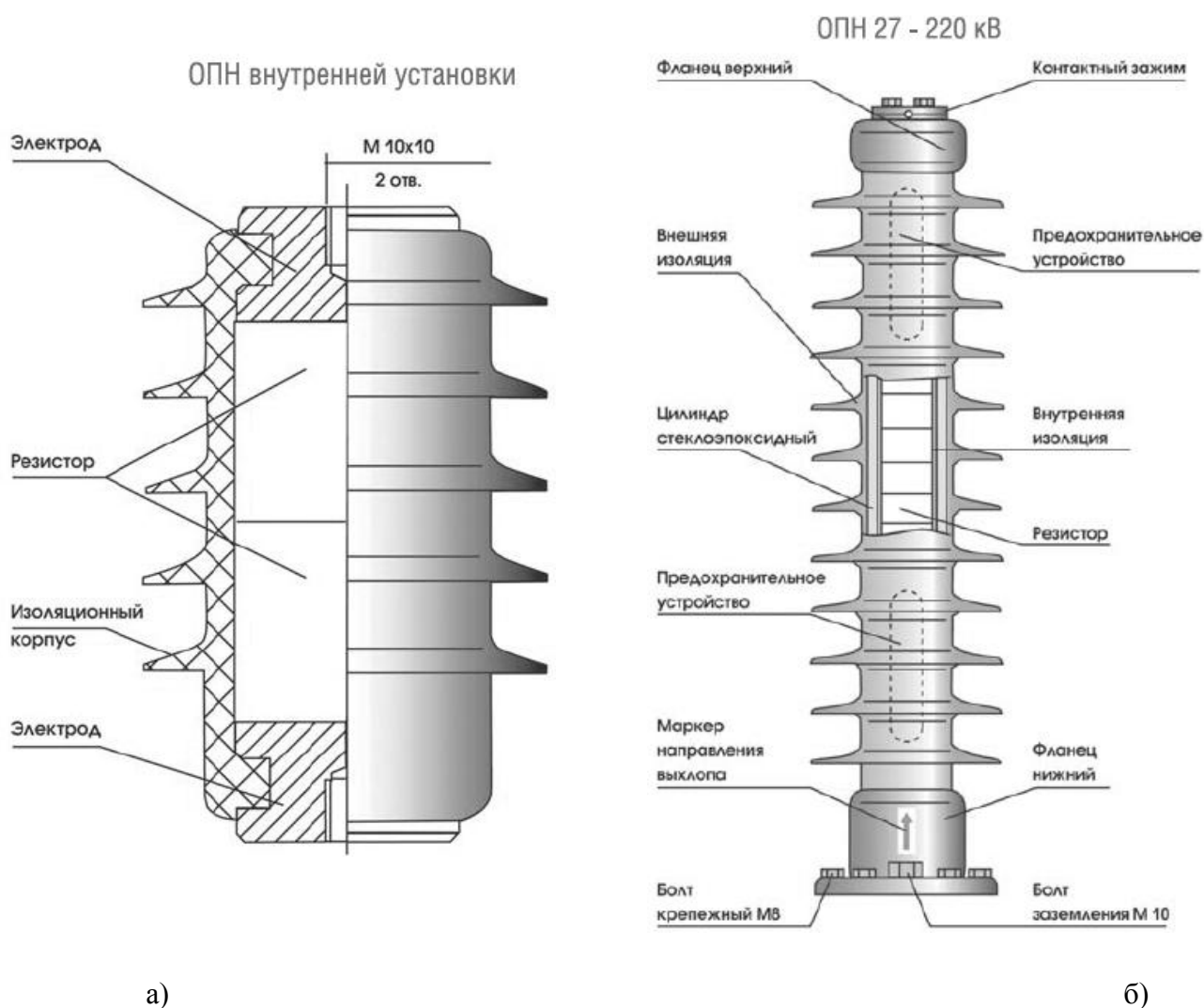


Рис.5.17. Внешний вид ОПН

Коэффициент нелинейности резисторов в области ограничения коммутационных перенапряжений имеет значения 0,03-0,05. При ограничении грозовых перенапряжений, когда токи, протекающие через ОПН, достигают значений нескольких килоампер, коэффициент нелинейности увеличивается до 0,07-

0,10. Такая высокая нелинейность обуславливает прохождение при рабочем напряжении или резонансных перенапряжениях через нелинейные резисторы тока порядка долей миллиампер на одну параллельную колонку. Это позволяет исключить искровой промежуток и подключить резистор ОПН непосредственно к сети.

Применительно к ОПН отсутствует понятие напряжения гашения. Однако длительное воздействие резонансных перенапряжений, связанных с прохождением через ОПН больших токов, может нарушить тепловую устойчивость аппарата и привести к аварии. В связи с этим для ОПН установлены допустимые длительности приложения повышенных напряжений, которые должны быть скоординированы с действием релейной защиты.

Применение ОПН позволяет глубоко ограничивать также и междуфазные перенапряжения. Для этого может быть использована схема с искровыми промежутками (рис. 5.18). В нормальном режиме каждый резистор НР1 – НР2 включен на фазное напряжение. При коммутационных перенапряжениях, которые всегда несимметричны, пробиваются искровые промежутки. Вследствие этого резисторы НР2 соединяются параллельно, а резисторы НР1 включаются попарно на междуфазное напряжение. С восстановлением нормального режима ток в искровых промежутках уменьшается до миллиампер и дуга в них гаснет.

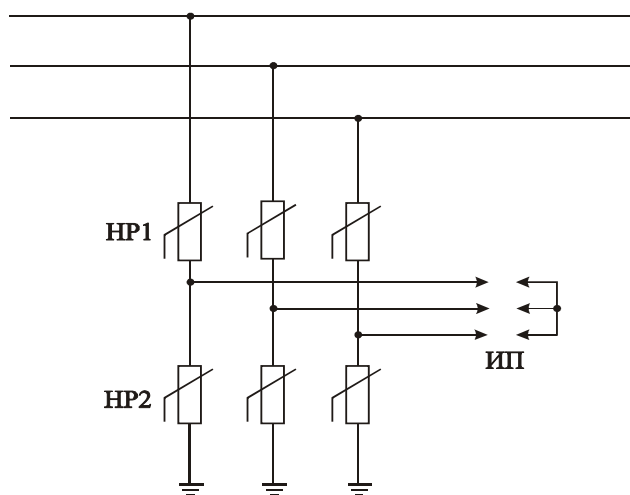


Рис. 5.18. Схема включения ОПН для ограничения перенапряжений междуфазных и относительно земли

ОПН целесообразно подключать на вводах, сборных шинах, отходящих присоединениях и непосредственно у электроприемников; схема соединения - звезда с выведенным на землю нулем. В случае, если не ограничивается дли-

тельность однофазных замыканий на землю, для обеспечения термической стойкости ОПН значение наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения следует принимать равным 7,2 кВ для класса напряжения 6 кВ, 12 кВ для класса напряжения 10 кВ и 40,5 кВ для класса напряжения 35 кВ. Пропускная способность ОПН должна быть не менее 20 импульсов на прямоугольной волне 2000 мкс с амплитудой тока 300-500 А, и следует исключить возможность возникновения длительных резонансных и феррорезонансных перенапряжений в точке установки ОПН.

ОПН выпускаются в фарфоровых и полимерных корпусах (в виде стеклопластикового цилиндра с металлическими оконцевателями), несущих механическую нагрузку от собственной массы, внешних воздействий (гололеда, ветра, подводящих проводов) и защитного ребристого покрытия из кремнийорганической резины, соединенной со стеклопластиком специальным составом, обеспечивающим высокую механическую прочность соединения.

В стеклопластиковых цилиндрах выполняется перфорация - отверстия для выхода газов в случае повреждения варисторов. Число и диаметр отверстий подбираются таким образом, чтобы исключить повреждение корпуса при прохождении расчетного тока КЗ (20 - 40 кА) через ОПН. Эти отверстия заполняются резиной при формовании защитного покрытия, поэтому корпуса ОПН герметичны.

Узкая полость между варисторами и корпусом (примерно 2 - 2,5 мм) как и пустоты в нижней и верхней частях ОПН заполняются эластичным герметиком на основе кремнийорганической резины. Поэтому ограничитель полностью герметичен, проникновение влаги внутрь ОПН не происходит, что исключает искровые перекрытия по внутренней поверхности стеклопластиковой трубы и поверхности варисторов. Это обстоятельство значительно повышает надежность работы ОПН, а также увеличивает пропускную способность колонок варисторов.

Толщина стенки стеклопластиковых цилиндров не превышает 10 мм, обеспечивая необходимую механическую прочность ОПН. Толщина сплошного покрытия ОПН из кремнийорганической резины - 5 мм, поэтому диаметр ОПН (без ребер) немного превышает диаметр варисторов (до 35 мм). Малый диаметр корпуса определяет относительно низкую его стоимость.

Высокая механическая прочность стеклопластиковых цилиндров обеспечивает как опорного, так и подвесного исполнения ограничителей на все клас-

сы напряжения. Наиболее благоприятные условия работы для таких ограничителей при подвесном исполнении в том случае, когда корпус ОПН подвергается воздействию только растягивающих усилий, к которым полимерные материалы чрезвычайно устойчивы. Ограничители с полимерным корпусом обозначаются ОПНп.

Все ОПН до 110 кВ выпускаются в цельном корпусе высотой до 1050 мм, свыше 110 кВ - собранными из отдельных модулей. Каждый модуль высотой до 1050 мм полностью герметизирован, транспортируется и складывается отдельно друг от друга. Сборка ОПНп из отдельных модулей производится на месте установки. При этом соединительным элементом является цилиндрическая муфта с внутренней резьбой, которая наворачивается на стыкуемые оконцеватели модулей. Для обеспечения электрического соединения модулей предусмотрен розеточный контакт, надежно изолированный от металлического оконцевателя. Поэтому токи утечки по поверхности корпусов ОПНп при её увлажнении не могут попасть в столб варисторов, что опасно в связи с возможным перегревом варисторов и преждевременным их повреждением.

Распределение напряжения вдоль столба варисторов в рабочем режиме выравнивается с помощью тороидальных экранов двух диаметров: большого (со стороны высокого напряжения) и малого (со стороны заземленного конца). Этот способ значительно дешевле, чем выравнивание распределения напряжения с помощью шунтирующих варисторов и керамических конденсаторов, применяемых в ряде конструкций ОПН. Вместе с тем он обеспечивает значительно большую надежность работы ОПН, поскольку полностью исключает использование ненадежных конденсаторов.

Следует отметить, что размеры экранов зависят от высоты ОПН и не зависят от класса напряжения ОПН. При большой неравномерности распределения напряжения вдоль колонки ОПН через варисторы протекает дополнительный емкостный ток, который может вызвать перегрев варисторов и преждевременное их повреждение. Поэтому распределение напряжения вдоль ОПН обязательно следует выравнивать.

Ограничители перенапряжений выпускаются нескольких типоразмеров на каждый класс напряжения, которые отличаются длительно допустимым рабочим напряжением и расчетным током коммутационных перенапряжений. Основной тип ОПНп имеет наибольшее длительно допустимое напряжение, равное наибольшему рабочему напряжению сети. Дополнительный тип ОПН

допускает на 5% большее длительное воздействие напряжения, определяемое особенностями условий эксплуатации участков сети.

Полимерная покрышка ОПНп позволяет не только значительно снизить его массу, но и облегчить условия работы варисторов, что в конечном счете повышает надежность работы ОПНп. Дело в том, что кремнийорганическая резина по своим технологическим и прочностным свойствам (как механическим так и электрическим) дает возможность создавать ребра малой толщины (примерно 7 мм в основании и 2 мм у конца). Поэтому необходимую длину пути тока утечки можно обеспечить числом ребер с небольшим вылетом.

Основные электрические характеристики ОПН 6-35 кВ приведены в табл.5.11, а в табл. 5.12 приведены параметры ОПНп.

Таблица 5.11

Основные электрические характеристики ОПН 6-35 кВ

Параметр	Тип ограничителя					
	ОПН-П-6/7,2/10/1	ОПН-П-6/7,2/10/2	ОПН-П-10/12/10/1	ОПН-П-10/12/10/2	ОПН-П-35/40,5/10/2	
1	2	3	4	5	6	
Класс напряжения сети, кВ	6,0	6,0	10,0	10,0	35,0	
Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение, кВ	7,2	7,2	12,0	12,0	40,5	
Номинальный разрядный ток 8/20 мкс, кА	10,0	20,0	10,0	20,0	10,0	
Напряжения, кВ, на ОПН при импульсе тока 30/60 мкс с амплитудой не более, А:						
	-250	17,0	17,0	28,4	28,4	96,0
	-500	17,5	17,3	29,0	29,0	98,0
	-1000	18,0	17,9	30,0	30,0	101,0
Напряжения, кВ, на ОПН при импульсе тока 8/20 мкс с амплитудой не более, А:						
	-5	23,5	21,5	38,0	36,0	118,0
	-10	24,5	23,0	40,0	38,0	127,0
	-20	27,0	25,3	45,0	42,0	141,0
Амплитуда импульса большого тока 4/10 мкс, кА	80,0	100,0	80,0	100,0	100,0	
Напряжение на ОПН, кВ, при импульсе 1/4 мкс с амплитудой номинального разрядного тока не более	27,0	25,2	45,0	42,0	144,0	
Амплитуда прямоугольного импульса тока пропускной способности, А	300,0	450,0	300,0	450,0	420,0	

Таблица 5.12

Параметры ОПНп

Параметры ОПНп	Класс напряжения, кВ												
	110		150		220		330		500		750		1150
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Наибольшее длительно допустимое напряжение, кВ	73	77	100	106	146	152	210	220	303	318	455	478	693
Номинальный разрядный ток, кА	10	10	10	10	10	10	10	10	15	15	20	20	20
Остающееся напряжение при грозовых импульсах тока 10 кА, не более, кВ	260	274	357	375	518	539	735	766	958	1005	1396	1466	2215
Расчётный ток коммутационных перенапряжений, А	400	420	400	420	550	700	700	1000	1000	1500	1800	2500	2500
Остающееся напряжение при расчётном токе коммутационных перенапряжений, кВ	192	204	253	265	357	370	540	565	797	836	1192	1275	1797
Длина пути тока утечки, м	3,2	3,3	4,3	4,5	6,3	6,6	8,2	8,58	12	12,6	17,7	18,6	24,2
Высота, м	1,1	1,1	1,7	1,7	2,1	2,1	3,3	3,25	4,28	4,28	6,4	6,4	8,4
Масса, кг	14	14	28	28	80	100	150	200	300	400	500	600	1000

Глава 5. Молниезащита зданий и сооружений. Молниезащита зданий и сооружений I категории, II категории, III категории

§5.1. Молниезащита зданий и сооружений

Зданий и сооружений или их части в зависимости от назначения, интенсивности грозовой деятельности в районе их местонахождения, а также от ожидаемого количества поражений молнией в год должны быть защищены в соответствии с категориями устройства молниезащиты и типом зоны защиты.

В соответствии с назначением зданий и сооружений необходимость выполнения молниезащиты и ее категория, а при использовании стержневых и

тросовых молниеотводов – тип зоны защиты определяются по табл. 5.13 в зависимости от среднегодовой продолжительности гроз в месте нахождения здания или сооружения, а также от ожидаемого количества поражений его молнией в год. Устройство молниезащиты обязательно при одновременном выполнении условий, записанных в графах 3 и 4 табл. 5.13.

Таблица 5.13

№ п/п	Здания и сооружения	Местоположение	Тип зоны защиты при использовании стержневых и тросовых молниеотводов	Категория молниезащиты
1	2	3	4	5
1	Здания и сооружения или их части, помещения которых согласно ПУЭ относятся к зонам классов В-I и В-II	На всей территории	Зона А	I
2	То же классов В-Ia, В-Iб, В-IIa	В местностях со средней продолжительностью гроз 10 ч в год и более	При ожидаемом количестве поражений молнией в год здания или сооружения $N > 1$ - зона А; при $N \leq 1$ - зона Б	II
3	Наружные установки, создающие согласно ПУЭ зону класса В-Iг	На всей территории	Зона Б	II
4	Здания и сооружения или их части, помещения которых согласно ПУЭ относятся к зонам классов П-I, П-II, П-IIa	В местностях со средней продолжительностью гроз 20 ч в год и более	Для зданий и сооружений I и II степеней огнестойкости при $0,1 < N \leq 2$ и для III-V степеней огнестойкости при $0,02 < N \leq 2$ - зона Б; при $N > 2$ - зона А	III

Продолжение табл. 5.13

1	2	3	4	5
5	Расположенные в сельской местности небольшие строения III-V степеней огнестойкости, помещения которых согласно ПУЭ относятся к зонам классов П-I, П-II, П-IIa	В местностях со средней продолжительностью гроз 20 ч в год и более при $N < 0,02$	-	III
6	Наружные установки и открытые склады, создающие согласно ПУЭ зону класса П-III	В местностях со средней продолжительностью гроз 20 ч в год и более	При $0,1 < N \leq 2$ - зона Б, при $N > 2$ - зона А	III
7	Здания и сооружения III, IIIa, IIIб, IV, V степеней огнестойкости, в которых отсутствуют помещения, относимые по ПУЭ к зонам взрыво- и пожароопасных классов	То же	При $0,1 < N \leq 2$ - зона Б, при $N > 2$ - зона А	III
8	Здания и сооружения из легких металлических конструкций со стораемым утеплителем (IVa степени огнестойкости), в которых отсутствуют помещения, относимые по ПУЭ к зонам взрыво- и пожароопасных классов	В местностях со средней продолжительностью гроз 10 ч в год и более	При $0,02 < N \leq 2$ - зона Б, при $N > 2$ - зона А	III

1	2	3	4	5
9	Небольшие строения III-V степеней огнестойкости, расположенные в сельской местности, в которых отсутствуют помещения, относимые по ПУЭ к зонам взрыво- и пожароопасных классов	В местностях со средней продолжительностью гроз 20 ч в год и более для III, IIIа, IIIб, IV, V степеней огнестойкости при $N < 0,1$, для IVа степени огнестойкости при $N < 0,2$	-	III
10	Здания вычислительных центров, в том числе расположенные в городской застройке	В местностях со средней продолжительностью гроз 20 ч в год и более	Зона Б	II
11	Животноводческие и птицеводческие здания и сооружения III-V степеней огнестойкости: для крупного рогатого скота и свиней на 100 голов и более, для овец на 500 голов и более, для птицы на 1000 голов и более, для лошадей на 40 голов и более	В местностях со средней продолжительностью гроз 40 ч в год и более	Зона Б	III
12	Дымовые и прочие трубы предприятий и котельных, башни и вышки всех назначений высотой 15 м и более	В местностях со средней продолжительностью гроз 10 ч в год и более	Зона Б	III
13	Жилые и общественные здания, высота которых более чем на 25 м превышает среднюю высоту окружающих зданий в радиусе 400 м, а также отдельно стоящие здания высотой более 30 м, удаленные от других зданий более чем на 400 м	В местностях со средней продолжительностью гроз 20 часов в год и более	Зона Б	III

1	2	3	4	5
14	Отдельно стоящие жилые и общественные здания в сельской местности высотой более 30 м	То же	Зона Б	III
15	Общественные здания III-V степеней огнестойкости следующего назначения: детские дошкольные учреждения, школы и школы-интернаты, стационары лечебных учреждений, спальные корпуса и столовые учреждений здравоохранения и отдыха, культурно-просветительные и зрелищные учреждения, административные здания, вокзалы, гостиницы, мотели и кемпинги	"	Зона Б	III
16	Открытые зрелищные учреждения (зрительные залы открытых театров, трибуны открытых стадионов и т.п.)	"	Зона Б	III
17	Здания и сооружения, являющиеся памятниками истории, архитектуры и культуры (скульптуры,obelisks и т.п.)	"	Зона Б	III

Здания и сооружения, отнесенные по устройству молниезащиты к I и II категориям, должны быть защищены от прямых ударов молнии, вторичных ее проявлений и заноса высокого потенциала через наземные (надземные) и подземные металлические коммуникации.

Здания и сооружения, отнесенные по устройству молниезащиты к III категории, должны быть защищены от прямых ударов молнии и заноса высокого потенциала через наземные (надземные) металлические коммуникации.

Наружные установки, отнесенные по устройству молниезащиты ко II категории, должны быть защищены от прямых ударов и вторичных проявлений молнии.

Наружные установки, отнесенные по устройству молниезащиты к III категории, должны быть защищены от прямых ударов молнии.

Внутри зданий большой площади (шириной более 100 м) необходимо выполнять мероприятия по выравниванию потенциалов.

В целях защиты зданий и сооружений любой категории от прямых ударов молнии следует максимально использовать в качестве естественных молниеотводов существующие высокие сооружения (дымовые трубы, водонапорные башни, прожекторные мачты, воздушные линии электропередачи и т.п.), а также молниеотводы других близ расположенных сооружений.

Если здание или сооружение частично вписывается в зону защиты естественных молниеотводов или соседних объектов, защита от прямых ударов молнии должна предусматриваться только для остальной, незащищенной его части. Если в ходе эксплуатации здания или сооружения реконструкция или демонтаж соседних объектов приведет к увеличению этой незащищенной части, соответствующие изменения защиты от прямых ударов молнии должны быть выполнены до начала ближайшего грозового сезона; если демонтаж или реконструкция соседних объектов проводятся в течение грозового сезона, на это время должны быть предусмотрены временные мероприятия, обеспечивающие защиту от прямых ударов молнии незащищенной части здания или сооружения.

Выравнивание потенциала внутри зданий и сооружений шириной более 100 м должно происходить за счет непрерывной электрической связи между несущими внутрицевыми конструкциями и железобетонными фундаментами, если последние могут быть использованы в качестве заземлителей.

В противном случае должна быть обеспечена прокладка внутри здания в земле на глубине не менее 0,5 м протяженных горизонтальных электродов сечением не менее 100 мм². Электроды следует прокладывать не реже чем через 60 м по ширине здания и присоединять по его торцам с двух сторон к наружному контуру заземления.

Проверка состояния устройств молниезащиты должна производиться для зданий и сооружений I и II категорий 1 раз в год перед началом грозового сезона, для зданий и сооружений III категории - не реже 1 раза в 3 года.

§5.2. Молниезащита зданий и сооружений I категории, II категории, III категории

5.2.1. Молниезащита зданий и сооружений I категории

Защита от прямых ударов молнии зданий и сооружений, относимых по устройству молниезащиты к I категории, должна выполняться отдельно стоящими стержневыми (рис. 5.19) или тросовыми (рис. 5.20) молниеотводами.

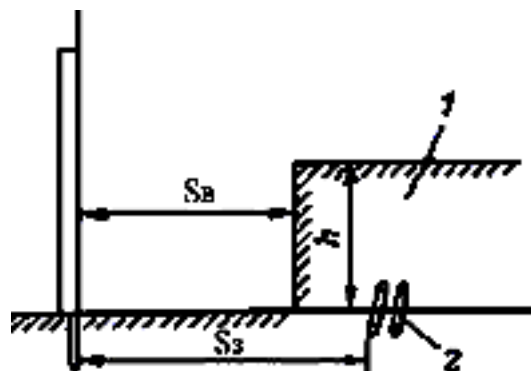


Рис. 5.19. Отдельно стоящий стержневой молниеотвод:
1 - защищаемый объект; 2 - металлические коммуникации

Указанные молниеотводы должны обеспечивать зону защиты типа А. При этом обеспечивается удаление элементов молниеотводов от защищаемого объекта и подземных металлических коммуникаций.

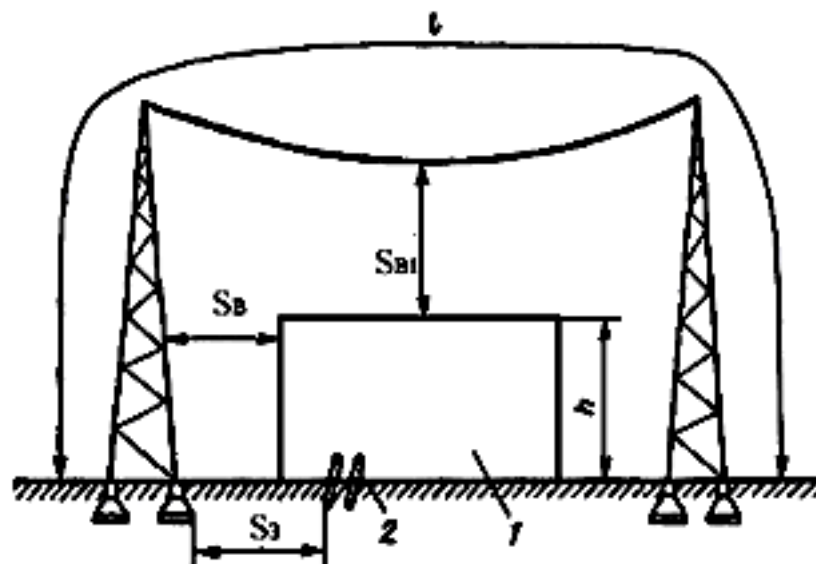


Рис. 5.20. Отдельно стоящий тросовый молниеотвод
Обозначения те же, что и на рис. 5.19.

Наименьшее допустимое расстояние S_B по воздуху от защищаемого объекта до опоры (токоотвода) стержневого или тросового молниеотвода (рис. 5.19 и 5.20) определяется в зависимости от высоты здания, конструкции заземлителя и эквивалентного удельного электрического сопротивления грунта ρ , Ом·м.

Наименьшее допустимое расстояние S_{B1} от защищаемого объекта до троса в середине пролета (рис. 5.20) определяется в зависимости от конструкции заземлителя, эквивалентного удельного сопротивления грунта ρ , Ом·м и суммарной длины l молниеприемников и токоотводов.

Для исключения заноса высокого потенциала в защищаемое здание или сооружение по подземным металлическим коммуникациям (в том числе по электрическим кабелям любого назначения) заземлители защиты от прямых ударов молнии должны быть по возможности удалены от этих коммуникаций на максимальные расстояния, допустимые по технологическим требованиям. Наименьшие допустимые расстояния S_3 (рис. 5.19 и 5.20) в земле между заземлителями защиты от прямых ударов молнии и коммуникациями, вводимыми в здания и сооружения I категории, должны составлять $S_3 = S_B + 2$ (м).

Для защиты от вторичных проявлений молнии должны быть предусмотрены следующие мероприятия:

а) металлические конструкции и корпуса всего оборудования и аппаратов, находящиеся в защищаемом здании, должны быть присоединены к заземляющему устройству электроустановок или к железобетонному фундаменту здания.

б) внутри зданий и сооружений между трубопроводами и другими протяженными металлическими конструкциями в местах их взаимного сближения на расстояние менее 10 см через каждые 20 м следует приваривать или припаивать перемычки из стальной проволоки диаметром не менее 5 мм или стальной ленты сечением не менее 24 мм²; для кабелей с металлическими оболочками или броней перемычки должны выполняться из гибкого медного проводника в соответствии с указаниями СНиП 3.05.06-85;

в) в соединениях элементов трубопроводов или других протяженных металлических предметов должны быть обеспечены переходные сопротивления не более 0,03 Ом на каждый контакт. При невозможности обеспечения контакта с указанным переходным сопротивлением с помощью болтовых соединений

необходимо устройство стальных перемычек, размеры которых указаны в подпункте "б".

Защита от заноса высокого потенциала по подземным металлическим коммуникациям (трубопроводам, кабелям в наружных металлических оболочках или трубах) должна осуществляться путем их присоединения на вводе в здание или сооружение к арматуре его железобетонного фундамента, а при невозможности использования последнего в качестве заземлителя – к искусственному заземлителю.

Защита от заноса высокого потенциала по внешним наземным (надземным) металлическим коммуникациям должна осуществляться путем их заземления на вводе в здание или сооружение и на двух ближайших к этому вводу опорах коммуникации. В качестве заземлителей следует использовать железобетонные фундаменты здания или сооружения и каждой из опор, а при невозможности такого использования - искусственные заземлители.

Ввод в здания воздушных линий электропередачи напряжением до 1 кВ, сетей телефона, радио, сигнализации 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.

В месте перехода воздушной линии электропередачи в кабель металлические броня и оболочка кабеля, а также штыри или крючья изоляторов воздушной линии должны быть присоединены к заземлителю. К такому же заземлителю должны быть присоединены штыри или крючья изоляторов на опоре воздушной линии электропередачи, ближайшей к месту перехода в кабель.

Кроме того, в месте перехода воздушной линии электропередачи в кабель между каждой жилой кабеля и заземленными элементами должны быть обеспечены закрытые воздушные искровые промежутки длиной 2-3 мм или установлен вентильный разрядник низкого напряжения, например, РВН-0,5.

Защита от заноса высоких потенциалов по воздушным линиям электропередачи напряжением свыше 1 кВ, вводимым в подстанции, размещенные в защищаемом здании (внутрицеховые или пристроенные), должна выполняться в соответствии с ПУЭ.

5.2.2. Молниезащита II категории

Защита от прямых ударов молнии зданий и сооружений II категории с неметаллической кровлей должна быть выполнена отдельно стоящими или установленными на защищаемом объекте стержневыми или тросовыми молниеотводами, обеспечивающими зону защиты в соответствии с требованиями. При установке молниеотводов на объекте от каждого стержневого молниеприемника или каждой стойки тросового молниеприемника должно быть обеспечено не менее двух токоотводов. При уклоне кровли не более 1:8 может быть использована также молниеприемная сетка при обязательном выполнении требований РД.

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 6х6 м. Узлы сетки должны быть соединены сваркой. Выступающие над крышей металлические элементы (трубы, шахты, вентиляционные устройства) должны быть присоединены к молниеприемной сетке, а выступающие неметаллические элементы - оборудованы дополнительными молниеприемниками, также присоединенными к молниеприемной сетке.

Установка молниеприемников или наложение молниеприемной сетки не требуется для зданий и сооружений с металлическими фермами при условии, что в их кровлях используются несгораемые или трудносгораемые утеплители и гидроизоляция.

На зданиях и сооружениях с металлической кровлей в качестве молниеприемника должна использоваться сама кровля. При этом все выступающие неметаллические элементы должны быть оборудованы молниеприемниками, присоединенными к металлу кровли.

Токоотводы от металлической кровли или молниеприемной сетки должны быть проложены к заземлителям не реже чем через 25 м по периметру здания.

При прокладке молниеприемной сетки и установке молниеотводов на защищаемом объекте всюду, где это возможно, в качестве токоотводов следует использовать металлические конструкции зданий и сооружений (колонны, фермы, рамы, пожарные лестницы 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.

Токоотводы, прокладываемые по наружным стенам зданий, следует располагать не ближе, чем в 3 м от входов или в местах, не доступных для прикосновения людей.

В качестве заземлителей защиты от прямых ударов молнии во всех возможных случаях следует использовать железобетонные фундаменты зданий и сооружений.

При невозможности использования фундаментов предусматриваются искусственные заземлители.

Наружные установки, содержащие горючие и сжиженные газы и легко воспламеняющиеся жидкости, следует защищать от прямых ударов молнии следующим образом:

а) корпуса установок из железобетона, металлические корпуса установок и отдельных резервуаров при толщине металла крыши менее 4 мм должны быть оборудованы молниеотводами, установленными на защищаемом объекте или отдельно стоящими,

б) металлические корпуса установок и отдельных резервуаров при толщине металла крыши 4 мм и более, а также отдельные резервуары менее 200 м³ независимо от толщины металла крыши, а также металлические кожухи теплоизолированных установок достаточно присоединить к заземлителю.

Для резервуарных парков, содержащих сжиженные газы, общей вместимостью более 8000 м³, а также для резервуарных парков с корпусами из металла и железобетона, содержащих горючие газы и легковоспламеняющиеся жидкости, при общей вместимости группы резервуаров более 100 тыс. м³ защиту от прямых ударов молнии следует, как правило, выполнять отдельно стоящими молниеотводами.

Для защиты зданий и сооружений от вторичных проявлений молнии должны быть предусмотрены следующие мероприятия:

а) металлические корпуса всего оборудования и аппаратов, установленных в защищаемом здании (сооружении), должны быть присоединены к заземляющему устройству электроустановок или к железобетонному фундаменту здания;

б) внутри здания между трубопроводами и другими протяженными металлическими конструкциями в местах их сближения на расстояние менее 10 см через каждые 30 м должны быть выполнены перемычки;

в) во фланцевых соединениях трубопроводов внутри здания следует обеспечить нормальную затяжку не менее четырех болтов на каждый фланец.

Для защиты наружных установок от вторичных проявлений молнии металлические корпуса установленных на них аппаратов должны быть присоединены к заземляющему устройству электрооборудования или к заземлителю защиты от прямых ударов молнии.

На резервуарах с плавающими крышами или понтонами необходимо устанавливать не менее двух гибких стальных перемычек между плавающими крышами или понтонами и металлическим корпусом резервуара или токоотводами установленных на резервуаре молниеотводов.

Защита от заноса высокого потенциала по подземным коммуникациям осуществляется присоединением их на вводе в здание или сооружение к заземлителю электроустановок или защиты от прямых ударов молнии.

Защита от заноса высокого потенциала по внешним наземным (надземным) коммуникациям выполняется путем их присоединения на вводе в здание или сооружение к заземлителю электроустановок или защиты от прямых ударов молнии, а на ближайшей к вводу опоре коммуникации - 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.

5.2.3. Молниезащита III категории

Защита от прямых ударов молнии зданий и сооружений, относимых по устройству молниезащиты к III категории, должна выполняться одним из способов, используемых для II категории. При этом в случае использования молниеприемной сетки шаг ее ячеек должен быть не более 12х12 м.

Во всех возможных случаях 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 быть присоединен к заземлителю, состоящему минимум из двух вертикальных электродов длиной не менее 3 м, объединенных горизонтальным электродом длиной не менее 5 м;

- при использовании в качестве молниеприемников сетки или металлической кровли по периметру здания в земле на глубине не менее 0,5 м должен быть проложен наружный контур, состоящий из горизонтальных электродов. В грунтах с эквивалентным удельным сопротивлением $500 < \rho \leq 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ 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 большой площади (шириной более 100 м) наружный контур заземления может также использоваться для выравнивания потенциалов внутри здания.

При установке молниеприемников или укладке сетки на защищаемом строении в качестве заземлителей следует использовать железобетонный фундамент или наружный контур, проложенный по периметру строения под асфальтовой или бетонной отмосткой.

К заземлителям защиты от прямых ударов молнии должны быть присоединены находящиеся внутри строения металлические конструкции, оборудование и трубопроводы, а также устройства выравнивания электрических потенциалов.

Молниезащита наружных установок, содержащих горючие жидкости с температурой вспышки паров выше 61°C и т.д., должна быть выполнена следующим образом:

а) корпуса установок из железобетона, а также металлические корпуса установок и резервуаров при толщине крыши менее 4 мм должны быть оборудованы молниеотводами, установленными на защищаемом сооружении или отдельно стоящими;

б) металлические корпуса установок и резервуаров при толщине крыши 4 мм и более следует присоединять к заземлителю.

Для защиты от заноса высокого потенциала по внешним наземным (надземным) металлическим коммуникациям их необходимо на вводе в здание или сооружение присоединить к заземлителю электроустановок или защиты от прямых ударов молнии.

Защита от заноса высокого потенциала по воздушным линиям электропередачи напряжением до 1 кВ и линиям связи и сигнализации должна выполняться в соответствии с ПУЭ и ведомственными нормативными документами.

Контрольные вопросы

1. Уровни рабочего напряжения, ограничения.
2. Понятие о внешней, внутренней изоляции. Характеристики внешней изоляции.
3. Виды электрических полей.
4. Виды ионизаций.
5. Лавина электронов.
6. Самостоятельный разряд.
7. Коронный разряд в газе.
8. Методы уменьшения потерь на корону.
9. Основные особенности минерального масла как диэлектрика.
10. Механизм пробоя жидких диэлектриков.
11. Маслобарьерная изоляция. Примеры применения маслобарьерной изоляции.
12. Твердая изоляция.
13. Виды пробоя твердой изоляции.
14. Общая характеристика испытаний изоляции.
15. Испытательные трансформаторы. Каскадные схемы.
16. Генераторы импульсных напряжений (ГИН).
17. Генераторы импульсных токов (ГИТ).
18. Контроль изоляции с помощью индикатора частичных разрядов (ИЧР).
19. Методы измерений высоких напряжений.
20. Высоковольтные изоляторы. Классификация.
21. Изоляция силовых трансформаторов. Профилактика изоляции силовых трансформаторов.
22. Изоляция вращающихся электрических машин. Профилактика изоляции вращающихся электрических машин.
23. Изоляция кабелей, силовых конденсаторов. Профилактика изоляции кабелей.
24. Основные методы профилактики изоляции.
25. Молния как источник грозовых перенапряжений. Параметры молнии. Воздействие тока молнии.
26. Защита от прямых ударов молнии. Стержневые, тросовые молниеотводы.

- 27. Разрядники. Характеристики и область применения.
- 28. Молниезащита ВЛ.
- 29. Вентильные разрядники.
- 30. Нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН).
- 31. Схемы молниезащиты подстанций.
- 32. Молниезащита зданий и сооружений I категории.
- 33. Молниезащита зданий и сооружений II категории.
- 34. Молниезащита зданий и сооружений III категории.

Библиографический список

1. Правила устройств электроустановок [Текст]. - М.: Изд-во НЦ ЭНАЦ, 2002. – 928 с.
2. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей [Текст]: Утверждены Приказом Минэнэрго РФ от 13.01.2003 N6. - М.: Изд-во НЦЭНАС, 2005. - 304с.
3. Техника высоких напряжений [Текст]: учебник / Под ред. Д. В. Разевига. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергия, 1976. - 488с.
4. Долгинов, А. И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике [Текст]: учеб. пособие. / А. И. Долгинов. - М.: Энергия, 1968. - 464с.: ил.
5. Базуткин, В. В. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах [Текст]: учебник / В. В. Базуткин, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 464с.
6. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения [Текст] / Пер. с нем. И. П. Кужекина; Под ред. В. П. Ларионова. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 554с.: ил.
7. РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений [Текст] / Минэнэрго СССР. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 56с.: ил.
8. РД 153-34.3-35.125-99 Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений (Приложения к части 3) / РАО "ЕЭС России". - 2-ое издание. - Санкт-Петербург: ПЭИПК Минтопэнэрго РФ, 1999 год, 143с.
9. Басманов, В.Г. Заземление и молниезащита: учеб. Пособие для вузов в двух частях. Часть 2 Молниезащита / В.Г. Басманов – Киров:ПРИП ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2012. – 246 с.
10. ГОСТ 1516.3-96. Межгосударственный стандарт. Электрооборудование переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. М.: Издательство стандартов, 1998. – 59 с.
11. СО 153-34.21.122-2003 Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций [Текст]: Утверждено

- Приказом Минэнэрго РФ от 30.06.2003 N280. - М.: Изд-во ЦПТИ ОРГРЭС, 2004. – 36 с.
12. СТО 56947007-35.240.01.023-2009 Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ (НТП ПС) [Текст]: Приложение к приказу ОАО «ФСК ЕЭС» от 13.04.09 № 136.- М.: Изд-во ЦПТИ ОРГРЭС, 2009 – 978 с.
 13. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / Под ред. И.М. Баумштейна и С.А. Бажанова. —3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 768 с.
 14. Ларионов В.П. Основы молниезащиты / Под ред. И.М. Бортника. М.: Знак, 1999. – 104 с.
 15. Техника высоких напряжений / И.М. Богатенков, Г.И. Иманов, В.Е. Кизеветтер и др.; Под ред. ГС. Кучинского. СПб.: Изд-во ПЭИПК, 1998. – 699 с.
 16. Перенапряжения в электрических системах и защита от них / В.В. Базуткин, К.П. Кадомская, М.В. Костенко, Ю.А. Михайлов. СПб.: Энергоатомиздат, 1995. – 320 с.
 17. equipment.bigli.ru
 18. www.elektroinfo.ru
 19. www.fenix88.nsk.su
 20. www.streamer.ru
 21. www.tavrida.ru

Содержание

Введение	3
Раздел 1. Разряд в газах и общие характеристики внешней изоляции	6
Глава 1. Напряжения, воздействующие на изоляцию, координация изоляции. Общая характеристика внешней изоляции электроустановок.	
Основные виды электрического разряда в газах	6
§1.1. Напряжения, воздействующие на изоляцию.....	6
§1.2. Координация изоляции.....	9
§1.3. Общая характеристика внешней изоляции электроустановок.	
Основные виды электрического разряда в газах.....	11
Глава 2. Физические процессы при ионизации в газе	13
§2.1. Возбуждение и ионизация атомов и молекул. Лавина электронов. Несамостоятельный и самостоятельный разряды. Плазма ..	13
§2.2. Переход от лавинной формы самостоятельного разряда к искровому разряду в малых искровых промежутках с равномерным полем. Образование стримеров	18
§2.3. Закон Пашена.....	20
§2.4. Самостоятельный разряд в неравномерном поле.	
Лавинная корона.	22
§2.5. Стримерная корона.	25
§2.6. Переход стримера в искровой разряд в промежутках с неравномерным полем	26
§2.7. Переход стримера в искровой разряд в длинных воздушных промежутках. Лидерная стадия разряда	27
§2.8. Главный разряд в длинных промежутках	28
§2.9. Искра	29
§2.10. Длинная дуга в воздухе	29
§2.11. Последовательность стадий газового разряда.	30
§2.12. Барьерный эффект.....	31
§2.13. Влияние времени приложения напряжения на электрическую прочность газовой изоляции (вольт-секундная характеристика - ВСХ)....	33
Глава 3. Коронный разряд на линиях электропередач. Корона на проводах при постоянном напряжении. Корона на проводах при переменном напряжении. Потери на корону. Методы уменьшения потерь на корону.	37

§3.1. Коронный разряд на линиях электропередач	37
§3.2. Корона на проводах при постоянном напряжении	40
§3.3. Корона на проводах при переменном напряжении.	42
Раздел 2. Разряды в жидких и твердых диэлектриках. Электрические ха- рактеристики внутренней изоляции электроустановок.	46
Глава 1. Основные особенности изоляционных жидкостей. Механизм пробоя жидких диэлектриков	46
§1.1. Основные особенности минерального масла как диэлектрика . . .	46
§1.2. Синтетические изоляционные жидкости. Чистые углеводороды.	48
§1.3. Подготовка изоляционных жидкостей	51
§1.4. Механизм пробоя в жидких диэлектриках	52
Глава 2. Маслобарьерная изоляция. Примеры применения маслобарьерной изоляции: силовые трансформаторы, вводы	55
Глава 3. Твердая изоляция. Тепловой, электрический и ионизационный пробой твердой изоляции	59
§3.1. Твердая изоляция	59
§3.2. Виды твердых изоляционных материалов	61
§3.3. Тепловой, электрический и ионизационный пробой твердой изоляции	66
Глава 4. Газовая и вакуумная изоляция.	76
Раздел 3. Испытательные установки и измерения высоких напряжений . .	82
Глава 1. Испытательные установки высокого напряжения	82
§1.1. Испытательные трансформаторы	82
§1.2. Генераторы импульсных напряжений и токов	84
Глава 2. Измерения на высоком напряжении. Электростатические ки- ловольтметры. Измерение максимальных значений напряжения с помо- щью шаровых разрядников. Измерение напряжения с помощью дели- телей	88
§2.1. Электростатические вольтметры	88
§2.2. Измерительные разрядники	90
§2.3. Делители для измерений высоких постоянных, переменных и импульсных напряжений	91
Раздел 4. Линейная и станционная изоляция. Профилактика изоляции установок высокого напряжения	95
Глава 1. Изоляторы высокого напряжения. Линейные изоляторы, стан-	

ционно-аппаратные изоляторы	95
§1.1. Изоляторы высокого напряжения	95
§1.2. Линейные изоляторы	97
§1.3. Станционно-аппаратные изоляторы.	104
Глава 2. Изоляция силовых электроустановок напряжением	
выше 1000 В	112
§2.1. Общие положения	112
§2.2. Изоляция вращающихся электрических машин	113
§2.3. Изоляция силовых трансформаторов.	116
§2.4. Изоляция кабелей	118
Глава 3. Профилактика изоляции. Основные методы профилактики	
изоляции. Профилактика изоляции силовых трансформаторов, линейной	
изоляции, вращающихся машин, кабелей	127
§3.1. Профилактика изоляции. Основные методы профилактики	
изоляции	127
§3.2. Профилактика изоляции силовых трансформаторов	141
§3.3. Профилактика линейной изоляции.	145
§3.4. Профилактика изоляции вращающихся машин	146
§3.5. Профилактика изоляции кабелей	148
Раздел 5. Грозовые перенапряжения и защита от них	156
Глава 1. Молния как источник грозовых перенапряжений. Параметры	
молнии. Воздействие тока молнии	156
§1.1. Молния как источник грозовых перенапряжений	156
§1.2. Основные параметры молнии	157
§1.3. Воздействие тока молнии	158
Глава 2. Защита от прямых ударов молнии. Зоны защиты стержневых	
молниеотводов	159
§2.1. Защита от прямых ударов молнии	160
§2.2. Зоны защиты молниеотводов	161
§2.3. Конструктивное выполнение молниеотводов	166
Глава 3. Защита линии электропередачи от молнии. Применение тросов	
для защиты линии электропередачи. Зоны защиты тросов. Рекомен-	
дуемые способы молниезащиты линий	166
§3.1. Защита линии электропередачи от молнии	166
§3.2. Применение тросов для защиты линии электропередачи	169

§3.3. Зоны защиты тросовых молниеотводов	169
§3.4. Рекомендуемые способы молниезащиты линий	171
Глава 4. Молниезащита электрических станций и подстанций. Вен-	
тильные разрядники. Нелинейные ограничители перенапряжений ..	193
§4.1. Общие положения	193
§4.2. Защита станций и подстанций от прямых ударов молнии.....	194
§4.3. Защита от импульсов грозовых перенапряжений, набегających с	
линии	203
§4.4. Защита подстанции номинальным напряжением 35 кВ и выше...	206
§4.5. Защита РУ номинальным напряжением 3-20 кВ.....	211
§4.6. Вентильные разрядники.....	213
§4.7. Нелинейные ограничители перенапряжений	218
Глава 5. Молниезащита зданий и сооружений. Молниезащита зданий	
и сооружений I категории, II категории, III категории	224
§5.1. Молниезащита зданий и сооружений	224
§5.2. Молниезащита зданий и сооружений I категории, II категории,	
III категории	230
Контрольные вопросы	238
Библиографический список	240