

К. Ф. СТЕПАНЧУК
Н. А. ТИНЯКОВ

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

**К. Ф. СТЕПАНЧУК,
Н. А. ТИНЯКОВ**

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

**Издание второе,
переработанное и дополненное**

Допущено Министерством высшего и
среднего специального образования
БССР в качестве учебного пособия
для студентов электроэнергетических
специальностей вузов

**МИНСК
«ВЫСШЕЙШАЯ ШКОЛА»
1982**

Рецензенты: кафедра техники высоких напряжений Уральского политехнического института и Ю. А. Митькин, кандидат технических наук, доцент кафедры техники высоких напряжений Ивановского энергетического института.

Степанчук К. Ф., Тиняков Н. А.

С79 Техника высоких напряжений: [Учеб. пособие для электро-энерг. спец. вузов].— 2-е изд., перераб. и доп.— Мн.: Выш. школа, 1982.— 367 с., ил.

В пер.: 1 руб.

Рассматриваются проблемы, возникающие при проектировании, конструировании и эксплуатации высоковольтных и защитных устройств, в связи с общими проблемами энергетики; электрические разряды в изоляции; атмосферные и внутренние перенапряжения в электрических установках, а также схемы защиты от них линий электропередачи и оборудования станций и подстанций.

1-е издание вышло в 1971 г.

Предназначено для студентов электроэнергетических специальностей вузов, может быть полезным специалистам, связанным с техникой высоких напряжений.

С 30311—026
М 304(05)—82 55—82

2302000000

ББК 31.24 я 73
6П2.1

ПРЕДИСЛОВИЕ

Директивами, принятыми на XXVI съезде КПСС, предусматривается рост производства и потребления электрической энергии с 1300 млрд. кВт·ч в 1980 г. до 1550—1600 млрд. кВт·ч в 1985 г. Достижение такого роста требует решения сложных научных и инженерных задач, которые концентрируются вокруг двух основных проблем: снижения стоимости электрической энергии и обеспечения высокой надежности электроснабжения.

Для увеличения производства электрической энергии и уменьшения ее стоимости повышается мощность районных тепловых и атомных электрических станций до 4000—6000 МВт и строятся ГЭС мощностью до 6000 МВт. Особенно интенсивный рост производства электрической энергии и сосредоточение мощностей наблюдается в восточных районах страны.

Дальнейшая концентрация производства электрической энергии и необходимость обеспечения надежного электроснабжения потребителей требуют увеличения количества и протяженности магистральных и распределительных линий электропередачи, объединенных в Единую энергетическую систему Советского Союза.

Передача электрической энергии на дальние расстояния связана с применением высоких напряжений. Чем больше передаваемые мощности и длиннее расстояния, тем более высокие напряжения экономически выгодно применять. Поэтому в СССР с 60-х годов эксплуатируются линии электропередач 330 и 500 кВ, в 70-х годах введен в работу ряд межсистемных связей на напряжение 750 кВ и началось строительство воздушных линий (ВЛ) 1150 кВ на переменном и 1500 кВ на постоянном напряжении. Создание, освоение и эксплуатация аппаратуры линий и подстанций на такие сверхвысокие напряжения, а также совершенствование и правильная эксплуатация электрических установок с номинальными напряжениями 3—220 кВ требуют от инженеров и исследователей глубокого знания комплекса вопросов, связанных с изоляцией высоковольтных устройств, которые можно объединить под общим названием «техника высоких напряжений» (ТВН).

Данное учебное пособие представляет переработанный и расширенный курс лекций, который авторы в течение ряда лет читают в Белорусском политехническом институте. Поэтому в него входят основные вопросы, предусмотренные программами курса «Техника высоких напряжений» для электроэнергетических специальностей втузов (0301, 0302 и 0303).

Поскольку со времени выхода первого издания учебного пособия в 1971 г. высоковольтная техника и соответствующие программы заметно обновились, материал книги расширен и почти полностью переработан, при этом авторы постарались учесть все полученные замечания и пожелания.

Введение, главы 2, 3, 4, 5, 15, 16, 17, 22 и § 8.8 написаны К. Ф. Степанчуком, остальные — Н. А. Тиняковым.

Авторы выражают глубокую признательность доценту кафедры техники высоких напряжений Ивановского энергетического института канд. техн. наук Ю. А. Митькину, а также коллективу кафедры техники высоких напряжений Уральского политехнического института за ценные замечания и советы, сделанные при рецензировании рукописи.

Авторы с благодарностью примут все предложения и замечания, направленные на улучшение пособия, которые просят присылать по адресу: 220048, Минск, проспект Машерова, 11, издательство «Высшая школа».

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Токоведущие части линий электропередач, трансформаторов, машин и других электрических аппаратов должны быть надежно изолированы от заземленных частей, фаза — от фазы или при постоянном напряжении полюс — от полюса. Для изоляции используются различного рода диэлектрики: газообразные, жидкие, твердые. Электрические и некоторые физико-химические и механические свойства диэлектриков рассматриваются в курсе «Электротехнические материалы». Однако применение их в конкретных изоляционных конструкциях вызывает ряд дополнительных проблем, которые определяются формой и функциями изоляционных конструкций, надежностью их работы в условиях воздействующих напряжений, механических и тепловых нагрузок, окружающей среды, а также экономической целесообразностью.

Изоляция может быть разделена на два основных вида, сильно отличающихся друг от друга: **внешнюю и внутреннюю**.

Внешняя изоляция ВЛ состоит из воздушных промежутков между проводами и изоляторов, на которых крепятся провода. Если для воздушных промежутков практическая задача ТВН кажется сравнительно несложной (выяснить напряжение пробоя воздушных промежутков при различной конфигурации электродов и формах воздействующих напряжений), то учет изоляторов, на которых подвешены провода, существенно ее усложняет. Поэтому в технике высоких напряжений рассматривается не только пробой воздушных промежутков при различных формах электродов (хотя и этот вопрос при глубоком подходе достаточно сложен), но и поведение внешней газовой изоляции в определенных электрических устройствах с учетом влияния твердых элементов, атмосферных условий, загрязнений, формы и длительности воздействующих напряжений, статистических закономерностей пробоя и т. д. Необходимо также принимать во внимание требования по ограничению радиопомех, потерь на корону, обеспечение безопасности работы и передвижения людей и механизмов под трассами ВЛ и на территориях подстанций.

Еще более сложные задачи возникают при рассмотрении внутренней изоляции высоковольтных кабелей, конденсаторов, трансформаторов, машин и других аппаратов. Здесь применяются твердые, жидкие и газообразные материалы или чаще изоляция является комбинированной, например маслосодержащей, бумажно-масляной. В идеале для внутренней изоляции было бы желательно

использовать такие совершенные материалы, которые при минимально возможных конструктивных габаритах обеспечивали бы надежную изоляцию, необходимую механическую прочность и отвод тепла. Но поскольку приходится иметь дело с реальными материалами, имеющими далеко не идеальные электрические, механические и тепловые свойства, необходимы тщательные изыскания таких технических решений внутренней изоляции, которые обеспечивали бы надежную работу электрооборудования при минимально возможных расходах средств и габаритах. Внутренняя изоляция в отличие от внешней является несамовосстанавливающейся, т. е. пробой такой изоляции приводит к необратимым последствиям и потере ее первоначальных изоляционных свойств. Поэтому накопление экспериментальных данных о внутренней изоляции дорогостоящих крупногабаритных конструкций встречает существенные трудности.

В процессе работы изоляция подвергается воздействию различного рода напряжений. Во-первых, это длительно действующие **рабочие напряжения**, величина которых близка к номинальному напряжению или может незначительно (на 10—15 %) превышать его. При конструировании и эксплуатации высоковольтных линий, аппаратов и других электрических устройств необходимо обеспечить надежную, безаварийную работу изоляции при непрерывном воздействии рабочего напряжения в течение всего принятого срока эксплуатации.

Во-вторых, на изоляцию воздействуют **внутренние перенапряжения**, которые возникают при включениях и отключениях линий и электрооборудования, аварийных и несимметричных режимах работы, резонансных явлениях. Эти перенапряжения воздействуют на изоляцию сравнительно кратковременно (от тысячных долей секунды до десятков секунд и более), но величина их $U_{вн}$ может превышать номинальные напряжения в несколько раз. Отношение амплитуды перенапряжения к амплитуде наибольшего фазового рабочего напряжения $U_{ф}$ называется **кратностью перенапряжения**.

Кратность и длительность внутренних перенапряжений существенно зависят от режима заземления нейтрали системы. В системах с изолированной нейтралью при устойчивых металлических замыканиях на землю напряжение на двух фазах повышается до линейного. При дуговом замыкании перенапряжения в системе могут достичь величины (3—4) $U_{ф}$. Так как однофазное замыкание в системе с изолированной нейтралью не сопровождается протеканием больших токов короткого замыкания и не приводит к отключению поврежденного участка (в этом и заключается преимущество систем с изолированной нейтралью), перенапряжения могут действовать длительно. При этом появляется опасность пробоя изоляции в другом месте сети и возникновения двухфазного короткого замыкания. Для предотвращения частых аварий в таких системах необходимо принимать меры к снижению перенапряжений и усиливать изоляцию. Применение резонансного заземления нейтрали через дугогасящие катушки способствует устранению замыкания и снижению кратности и длительности перенапряжений, однако и в этом

случае устойчивое однофазное замыкание на землю приводит к повышению напряжения на здоровых фазах до линейного. Практика показала, что применение систем с изолированной нейтралью дает явные преимущества при напряжениях 3—35 кВ. В этих системах необходимое усиление изоляции еще не приводит к заметному росту стоимости сетей и аппаратуры подстанций, а частые однофазные замыкания, характерные для сетей 3—35 кВ, не сопровождаются аварийными отключениями и повреждениями оборудования.

В сетях 110 кВ и выше в СССР и за рубежом применяется, как правило, эффективно заземленная нейтраль. Стоимость изоляции в таких сетях велика, и применение заземленной нейтрали диктуется, помимо других соображений, необходимостью всемерного ограничения возможных перенапряжений. Однофазное замыкание в системах с заземленной нейтралью сопровождается протеканием тока короткого замыкания и быстрым отключением поврежденного участка, при этом напряжение на неповрежденных фазах возрастает не более чем до $(1,2—1,4) U_{\phi}$, а автоматическое повторное включение (АПВ) в большинстве случаев бывает успешным, и нормальная схема сети восстанавливается.

Третьим видом напряжений, воздействующих на изоляцию, являются **грозовые**, или **атмосферные, перенапряжения**. Эти перенапряжения возникают в результате удара молнии в электроустановку или вблизи нее. Волны перенапряжения, возникающие в токоведущих частях при ударах молнии, распространяются со скоростями, сравнимыми со скоростью света, проникая в обмотки трансформаторов, машин, воздействуя на изоляцию линий и аппаратов. Время воздействия атмосферных перенапряжений очень мало (от единиц до сотен миллионных долей секунды), однако величина этих перенапряжений при отсутствии специальных мер защиты может достигать миллионов вольт. Такие высокие напряжения может не выдержать изоляционная конструкция практически любого номинального напряжения. Поэтому необходимо ограничивать величины атмосферных перенапряжений до приемлемых значений. Прежде всего стремятся предотвратить прямые удары молнии в оборудование, так как перенапряжения, возникающие при этом, особенно опасны. Грозозащита от прямых ударов молнии надежно выполняется с помощью молниеотводов. Однако такая защита целесообразна не для всех объектов. Кроме того, индуктированные перенапряжения, т. е. перенапряжения, возникающие при ударах молнии вблизи электрических установок, могут быть также опасны для изоляции. Не исключается полностью также возможность прорыва молнии мимо молниеотводов и прямой удар ее в электрическую установку. Следовательно, необходимы специальные устройства и меры для ограничения атмосферных перенапряжений.

Основным аппаратом грозозащиты является разрядник. Разрядник устанавливается параллельно изоляции и срабатывает при напряжении, более низком, чем напряжение, при котором проби-

вается изоляция. Волна перенапряжения, попадающая на изоляцию, оказывается сниженной до допустимого уровня. Изоляция электрических устройств должна выдерживать неоднократные воздействия волн атмосферных перенапряжений, которые, несмотря на все защитные мероприятия, могут значительно превышать номинальные напряжения.

Таким образом, для обеспечения безаварийной работы изоляция электрических установок должна выдерживать все виды напряжений, которые могут на нее воздействовать, т. е. иметь определенный уровень. Уровень изоляции практически устанавливается с помощью испытательных выдерживаемых или разрядных напряжений. Так как уровень изоляции в значительной мере определяет габариты и стоимость электрооборудования, то его по возможности стремятся снизить.

До напряжения 220 кВ включительно уровень изоляции определяется в основном атмосферными перенапряжениями, так как оказывается, что если изоляция выдерживает импульсные атмосферные перенапряжения, она, как правило, выдерживает и коммутационные перенапряжения, возможные в установках этих классов напряжений. Отсюда следует необходимость дальнейшего совершенствования грозозащиты и важность импульсных характеристик и испытаний для изоляции электрических установок до 220 кВ. Совершенствование мер грозозащиты привело к тому, что при напряжении 220 кВ и выше определяющую роль в выборе уровня изоляции стали играть внутренние перенапряжения, что потребовало специальных мер по ограничению внутренних перенапряжений. Для того чтобы габариты и стоимость оборудования на напряжение 750 кВ и выше были приемлемыми, следует ограничивать внутренние перенапряжения до $(2,2-1,8) U_{\phi}$ и ниже.

Уровень изоляции необходимо согласовывать с воздействующими на изоляцию напряжениями, защитными мерами и целесообразными запасами, обеспечивающими необходимую надежность. Такое согласование называется **координацией изоляции**. В понятие координации изоляции входит также принятие более высоких уровней изоляции (больших запасов) для дорогостоящего и трудно восстанавливаемого оборудования или оборудования, выход из строя которого может привести к тяжелой аварии и большим материальным потерям. Таким образом, задача координации изоляции является многомерной, и оптимальное ее решение находится в результате технико-экономического расчета, обеспечивающего наибольший народнохозяйственный эффект, т. е. минимум «приведенных затрат», при этом должны быть также учтены ограничения по технике безопасности, защите окружающей среды, габаритам и т. д.

Для определения соответствия изоляции вновь изготовленного оборудования принятому уровню она подвергается испытаниям. В комплекс заводских испытаний включаются испытания импульсным напряжением и повышенным напряжением промышленной частоты. Величины испытательных напряжений и методы испытаний нормированы ГОСТами.

В процессе эксплуатации под воздействием повышенных температур, механических нагрузок, электрического поля и окружающей среды электрические характеристики изоляции постепенно ухудшаются. Это ухудшение электрических свойств связано с химическим перерождением (старением) изоляции, появлением в ней местных дефектов, увлажнением, загрязнением и т. п. Изоляция при этом может ухудшиться настолько, что уровень ее станет ниже возможных перенапряжений, и она будет повреждена. Пробой изоляции в процессе работы электрической установки часто приводит к очень серьезной аварии, поэтому надо знать ее состояние и при опасном ухудшении электрических свойств восстановить или заменить ее во время ремонта.

Для определения состояния изоляции эксплуатируемого оборудования проводятся профилактические испытания. Правильное, квалифицированное заключение о состоянии изоляции можно дать после проведения комплекса испытаний и анализа их результатов. Это требует хорошего понимания физических основ и методов профилактических испытаний изоляции.

Высоковольтные испытания и исследования невозможны без специального оборудования. Конструкции этого оборудования, режимы его работы, способы измерений при высоких и сверхвысоких напряжениях составляют особый раздел высоковольтной техники, который кратко рассматривается и в общем курсе ТВН.

Таким образом, грамотное конструирование, производство и эксплуатация высоковольтных устройств требуют глубокого знания напряжений, воздействующих на изоляцию, методов снижения возможных перенапряжений, электрических свойств изоляционных конструкций, способов испытания и контроля изоляции. Эти вопросы тесно связаны между собой и составляют содержание курса ТВН.

1. ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ

1.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ГАЗАХ

1.1.1. Роль газа как диэлектрика в изоляционных конструкциях

В любой изоляционной конструкции в качестве элемента изоляции присутствует в той или иной мере воздух или какой-либо иной газ. Провода воздушных линий (ВЛ), шины распределительных устройств, выводы трансформаторов и различных аппаратов высокого напряжения отделены друг от друга промежутками, единственной изолирующей средой в которых является воздух.

Нарушение электрической прочности таких конструкций может произойти как путем пробоя диэлектрика, из которого изготовлены изоляторы, так и в результате разряда в воздухе или вдоль поверхности диэлектрика. В отличие от пробоя изолятора, который приводит к полному выходу его из строя, разряд вдоль поверхности обычно повреждением не сопровождается. Следовательно, если изоляционную конструкцию выполнить таким образом, чтобы напряжение перекрытия по поверхности или разрядные напряжения в воздухе были меньше пробивных напряжений изоляторов, то фактическая электрическая прочность таких конструкций будет определяться электрической прочностью воздуха.

В указанных выше случаях воздух имеет значение как естественная газовая среда, в которой находятся изоляционные конструкции. Наряду с этим воздух или иной газ часто применяется в качестве одного из основных изоляционных материалов при выполнении изоляции кабелей, конденсаторов, трансформаторов и других электрических аппаратов.

Для обеспечения надежной и безаварийной работы изоляционных конструкций необходимо знать, как влияют на электрическую прочность газа различные факторы, такие, как форма и длительность действия напряжения, температура и давление газа, характер электрического поля и т. п.

1.1.2. Виды электрического разряда в газах

Понятие электрического разряда в газах включает все случаи перемещения в газах под действием электрического поля заряженных частиц (электронов и ионов), возникших в результате ионизационных процессов.

Газ, состоящий только из нейтральных молекул, совершенно не проводит электрического тока, т. е. является идеальным диэлектриком. В реальных условиях за счет воздействия естественных ионизаторов (ультрафиолетовое излучение Солнца, космические лучи, радиоактивное излучение Земли и т. п.) в газе всегда имеется некоторое количество свободных зарядов — ионов и электронов, которые сообщают ему определенную электропроводность.

Мощность естественных ионизаторов очень мала: в результате их воздействия в воздухе каждую секунду образуется около одной пары зарядов в каждом кубическом сантиметре, что соответствует приращению объемной плотности зарядов $\rho_0 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл/(см³·с). Такое же количество зарядов подвергается каждую секунду рекомбинации; число зарядов в 1 см³ воздуха при этом остается постоянным и равным 500—1000 парам ионов.

Таким образом, если к пластинам плоского воздушного конденсатора с расстоянием S между электродами приложить напряжение, то в цепи установится ток, плотность которого $j = 2\rho_0 S = 3,2 \cdot 10^{-19} S$ А/см².

Применение искусственных ионизаторов во много раз увеличивает плотность тока в газе. Например, при освещении газового промежутка ртутно-кварцевой лампой плотность тока в газе возрастает до 10^{-12} А/см², при наличии искрового разряда вблизи ионизируемого объема создаются токи порядка 10^{-10} А/см² и т. д.

Рассмотрим зависимость тока, проходящего через газовый промежуток с однородным электрическим полем, от величины приложенного напряжения (рис. 1.1). Вначале по мере увеличения напряжения ток в промежутке возрастает за счет того, что все большее количество зарядов попадает под действием электрического поля на электроды (участок OA). На участке AB ток практически не меняется, так как все образующиеся за счет внешних ионизаторов заряды попадают на электроды; величина тока насыщения I_s определяется интенсивностью воздействующего на промежуток ионизатора. При дальнейшем увеличении напряжения ток резко возрастает (участок BC), что свидетельствует об интенсивном развитии процессов ионизации газа под действием электрического поля. При напряжении U_0 происходит резкое увеличение тока в промежутке, который при этом теряет свойства диэлектрика и превращается в проводник.

Явление, при котором между электродами газового промежутка возникает канал высокой проводимости, называют **электрическим пробоем** (пробой в газе часто называют **электрическим разрядом**, имея в виду весь процесс образования пробоя).

Электрический разряд, соответствующий участку $OABC$ характеристики, называют **несамостоятельным**, так как на этом участке

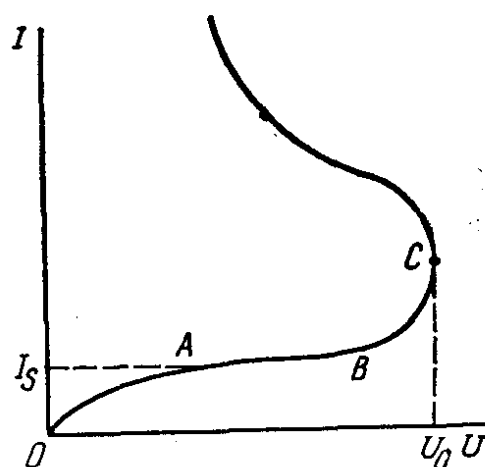


Рис. 1.1. Вольт-амперная характеристика газового разряда.

ток в газовом промежутке определяется интенсивностью воздействующего ионизатора. Разряд на участке после точки C называют **самостоятельным**, так как ток разряда на этом участке зависит только от параметров самой электрической цепи (ее сопротивления и мощности источника питания) и для его поддержания не требуется образования заряженных частиц за счет внешних ионизаторов. Напряжение U_0 , при котором начинается самостоятельный разряд, называют **начальным напряжением**.

Формы самостоятельного разряда в зависимости от условий, в которых протекает разряд, могут быть различными.

При малых давлениях, когда из-за небольшого числа молекул газа в единице объема промежутков не может приобрести большую проводимость, возникает **тлеющий разряд**. Плотность тока при тлеющем разряде невелика ($1-5 \text{ мА/см}^2$), разряд охватывает все пространство между электродами.

При давлениях газа, близких к атмосферному и выше, в случае, если мощность источника питания невелика или напряжение прикладывается к промежутку на короткое время, имеет место **искровой разряд**. Примером искрового разряда является разряд в виде молнии. При длительном действии напряжения искровой разряд имеет вид искр, последовательно возникающих между электродами.

В случае значительной мощности источника питания искровой разряд переходит в **дуговой**, при котором через промежуток может протекать ток, достигающий сотен и тысяч ампер. Такой ток способствует разогреву канала разряда, увеличению его проводимости, и в результате происходит дальнейшее увеличение тока. Так как этот процесс требует для своего завершения некоторого времени, то при кратковременном приложении напряжения искровой разряд в дуговой не переходит.

В резконеоднородных полях самостоятельный разряд начинается всегда в виде **коронного разряда**, который развивается только в той части газового промежутка, где напряженность поля наиболее высока (около острых краев электродов). При коронном разряде между электродами не возникает сквозного канала высокой проводимости, т. е. промежуток сохраняет свои изолирующие свойства. При дальнейшем увеличении приложенного напряжения коронный разряд переходит в искровой или дуговой.

Закономерности возникновения электрического разряда в различных газах одинаковы, разница заключается в значениях коэффициентов, характеризующих процесс. В дальнейшем изложение ведется применительно к самому распространенному газу — воздуху — с указанием особенностей, характерных для других газов.

1.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ИОНИЗИРОВАННЫХ ГАЗАХ

1.2.1. Возбуждение и ионизация атомов и молекул

Условие ионизации газов. Обязательным условием возникновения разряда в газах является наличие в нем свободных зарядов — электронов и ионов. Возникновение свободных зарядов может про-

исходить как за счет ионизации в объеме газа, так и за счет эмиссии зарядов с поверхности электродов. Для того чтобы произошла ионизация атома, ему необходимо сообщить каким-либо способом энергию W , равную или бóльшую энергии ионизации $W_{и}$ (потенциала $U_{и}$, см. табл. 1.1).

Табл. 1.1. Потенциалы ионизации и возбуждения некоторых газов, В

Газ	Потенциал ионизации $U_{и}$	Потенциал возбуждения $U_{в}$
Водород (H_2)	15,4	11,2
Азот (N_2)	15,8	6,1
Углекислый газ (CO_2)	13,7	10,0
Кислород (O_2)	12,5	7,9
Гелий (He)	24,6	19,8

Если энергия, сообщенная атому, будет меньше $W_{и}$, но больше или равна энергии возбуждения $W_{в}$, то он перейдет в возбужденное состояние, которое является неустойчивым, и через очень малый промежуток времени (порядка 10^{-8} с) возвратится в исходное состояние.

Одновременно с ионизацией в газовом промежутке всегда идет обратный процесс — рекомбинации, который, так же как и переход атома из возбужденного состояния в нормальное, сопровождается выделением энергии, затраченной ранее на ионизацию. Поэтому газовый разряд всегда сопровождается свечением канала разряда.

Рассмотрим отдельные виды ионизации, имеющие наибольшее значение при развитии разряда в газах.

Ударная ионизация. Столкновение какой-либо частицы, летящей со значительной скоростью, с нейтральным атомом или молекулой может закончиться ионизацией последних, если выполнено условие $W \geq W_{и}$.

Энергия частицы, движущейся в однородном электрическом поле,

$$W = qEx,$$

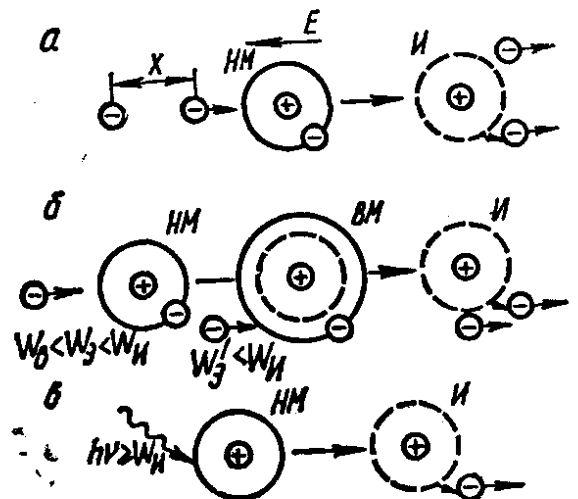
где q — заряд частицы; E — напряженность электрического поля; x — путь, пройденный перед столкновением (рис. 1.2, а).

Подставив это значение W в условие ионизации и учитывая, что $W_{и} = qU_{и}$, получим значение пути $x_{и}$, который частица должна пройти перед столкновением, для того чтобы это столкновение закончилось ионизацией:

$$x_{и} \geq U_{и}/E. \quad (1.1)$$

Рис. 1.2. Схемы ударной (а), ступенчатой (б) и фотоионизации (в):

НМ — нейтральная молекула; ВМ — возбужденная молекула; И — ион.



При столкновениях может также иметь место так называемая **ступенчатая** ионизация, при которой энергия движущихся частиц меньше $W_{и}$. Например, электрон с энергией меньше $W_{и}$ переводит атом в возбужденное состояние, а летящий за ним следующий электрон, сталкиваясь с таким возбужденным атомом, сообщает ему недостающую энергию, необходимую для ионизации (рис. 1.2, б).

Фотоионизация в объеме газа. Важное значение в процессе образования свободных зарядов в газе имеет фотоионизация, т. е. ионизация под действием коротковолнового излучения. Чтобы воздействие излучения привело к ионизации газа, нужно выполнить условие (рис. 1.2, в)

$$h\nu \geq W_{и} \text{ или } \lambda \leq ch/W_{и}, \quad (1.2)$$

где c — скорость света; ν , $\lambda = c/\nu$ — соответственно частота и длина волн излучения; h — постоянная Планка.

Из формулы (1.2) следует, что для фотоионизации газов, входящих в состав воздуха (азот, кислород, водород), длина волны λ излучения должна быть не более 10^{-7} м, т. е. она может возникнуть только в результате воздействия таких коротковолновых излучений, как ультрафиолетовые лучи (например, ртутно-кварцевых ламп), рентгеновые лучи, излучения радиоактивных препаратов.

Фотоионизация возможна также в результате излучения самих молекул, участвующих в разряде. Например, при рекомбинации выделяется фотон с энергией, достаточной для ионизации, а при переходе молекулы из возбужденного состояния в нормальное выделяются фотоны, способные произвести ступенчатую ионизацию.

Термическая ионизация. Термическая ионизация включает все процессы ионизации, обусловленные тепловым состоянием газа. При температуре газа порядка 20°C вероятность термической ионизации ничтожно мала, однако она резко возрастает при высоких температурах газа.

Степень ионизации газа, т. е. отношение числа ионизированных частиц к общему их количеству в единице объема, для газов с $W_{и} \approx 15$ эВ (воздух) при $10\,000$ К составляет приблизительно $0,02$, при $15\,000$ К — $0,3$ и при $20\,000$ К — $0,85$.

Эмиссия с поверхности электродов (поверхностная ионизация). При разрядах в газах, кроме ионизации в объеме, имеет место и освобождение электронов с поверхности электродов (эмиссия электронов). Для освобождения электронов с поверхности металлов (катода) также требуется затратить некоторую энергию, которая получила название **энергии (потенциала) поверхностной ионизации** (табл. 1.2).

Энергия, необходимая для выхода электрона, может быть сообщена ему различными способами.

1. Нагреванием катода до соответствующей температуры — **термоэлектронная эмиссия**. Этот вид эмиссии в начальных стадиях развития разряда не имеет места, но при дуговом разряде, когда катод в месте соприкосновения с дугой нагревается до температу-

ры в несколько тысяч градусов, термоэлектронная эмиссия приобретает важное значение.

2. Бомбардировкой катода частицами, обладающими высокой энергией, например положительными ионами, — **вторичная электронная эмиссия.**

3. Облучением поверхности катода коротковолновым излучением — **фотоэлектронная эмиссия.** Источником такого излучения могут являться также

процессы возбуждения и рекомбинации, происходящие в канале газового разряда. Вероятность фотоэмиссии оказывается в ряде случаев выше вероятности фотоионизации, так как $W_{п.и} < W_{и}$.

4. Наложением сильного внешнего электрического поля — **автоэлектронная эмиссия.** В изоляционных конструкциях этот вид эмиссии не наблюдается, так как для ее осуществления необходимо внешнее электрическое поле порядка $10^5 - 10^6$ В/см, что на практике не встречается.

Таким образом, эмиссия электронов с поверхности электродов при разрядах в газах имеет место в основном за счет бомбардировки катода положительными ионами и облучения его коротковолновым излучением.

Табл. 1.2. Потенциалы поверхностной ионизации $U_{п.и}$ некоторых металлов, В

Металл	$U_{п.и}$
Алюминий	1,8
Серебро	3,1
Медь	3,9
Железо	3,9
Окись меди	5,3

1.2.2. Рекомбинация заряженных частиц

При ионизации молекулы образуются положительный ион и свободный электрон. Процесс рекомбинации обратен процессу ионизации, при этом заряды частиц взаимно компенсируются, и энергия, затраченная ранее на ионизацию молекулы, выделяется в виде фотонов.

В канале газового разряда может происходить рекомбинация электрона с положительным ионом, но вероятность такого процесса мала. Это объясняется тем, что электроны в электрическом поле обладают значительными скоростями перемещения, в результате чего время воздействия положительного поля иона на электрон ограничено.

Свободный электрон при некоторых условиях может слиться с нейтральной молекулой (прилипнуть к ней) и образовать отрицательный ион. Возможность прилипания обусловлена наличием у атомов, образующих молекулы, свободных внешних устойчивых орбит, на которые и может попасть электрон. Сродство нейтральных молекул с электронами выражается энергией сродства (потенциалом $U_{ср}$), которая выделяется при прилипании электрона (в этом случае газы называются **электроотрицательными**) или которую нужно при этом затратить. Для отрыва прилипших электронов от молекул таких газов необходимо, чтобы они поглотили энергию, равную энергии сродства, поэтому они являются очень устой-

чивыми. Наибольшим сродством с электронами обладают кислород с $U_{\text{ср}}=2,2$ В, а также хлор и фтор с $U_{\text{ср}}\approx 3,8$ В (поэтому, в частности, последние входят в состав специальных высокопрочных газов).

Таким образом, в канале газового разряда возможна также рекомбинация положительных и отрицательных ионов (ионная рекомбинация). Вероятность такой рекомбинации значительно выше, чем электронно-ионной, так как скорости перемещения ионов в электрическом поле значительно ниже, чем скорости перемещения электронов. В процессе ионной рекомбинации «лишний» электрон с орбиты отрицательного иона переходит на орбиту положительного иона, и возникают две нейтральные молекулы.

Обозначим концентрацию ионов в 1 см^3 газа через N . Если начальные концентрации (при $t=0$) положительных и отрицательных ионов равны, т. е. $N_+ = N_- = N_0$, то с течением времени их концентрации будут уменьшаться в соответствии с выражением

$$N = \frac{N_0}{1 + N_0 \rho t},$$

где t — время, с; ρ — коэффициент рекомбинации; для ионной рекомбинации в воздухе $\rho \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/(\text{ион} \cdot \text{с})$.

1.2.3. Коэффициент объемной ионизации

Прежде чем рассматривать условие возникновения самостоятельного разряда в газах, остановимся несколько подробнее на коэффициентах, характеризующих процессы ионизации.

Как было отмечено ранее, при комнатной температуре энергия теплового движения электронов недостаточна для ионизации при столкновении. Дополнительную энергию, необходимую для ионизации, частицы приобретают на участке между двумя столкновениями за счет ускоряющего действия внешнего электрического поля.

Из кинетической теории газов известно, что средняя длина свободного пробега λ частиц радиусом r_1 в газовой среде с молекулами радиусом r при температуре T и давлении p определяется выражением

$$\lambda = \frac{kT}{\pi(r_1 + r)^2 p},$$

где k — постоянная Больцмана.

Для электрона $r_1 \ll r$, следовательно,

$$\lambda_{\text{э}} = \frac{kT}{\pi r^2 p}.$$

Для иона $r_1 \approx r$, т. е.

$$\lambda_{\text{и}} = \frac{kT}{4\pi r^2 p}.$$

Таким образом, длина свободного пробега ионов в газовой среде в среднем в 4 раза меньше длины свободного пробега электрона.

Введя в формулу для λ относительную плотность воздуха δ , которая представляет отношение плотности воздуха при данных атмосферных условиях к плотности воздуха при нормальных условиях ($p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па, или 760 мм рт. ст., и $t_0 = 20^\circ\text{C}$), получим

$$\lambda_0 = 1/A_0\delta, \quad (1.3)$$

где

$$\delta = \frac{pT_0}{p_0 T}. \quad (1.4)$$

Значения коэффициента $A_0 = \frac{\pi r^2 p_0}{kT_0} = \frac{1}{\lambda_0}$ и длина свободного пробега λ_0 для некоторых газов при нормальных атмосферных условиях приведены в табл. 1.3. При средней длине пробега частиц λ их действительные длины свободного пробега отличаются от средней, и в газе всегда может быть какое-то количество частиц, имеющих действительную длину пробега, достаточную для ионизации.

Табл. 1.3. Значения A_0 и λ_0

Газ	$A_0 \cdot 10^3, 1/\text{см}$	$\lambda_0 \cdot 10^{-3}, \text{см}$
Воздух	11,1	0,09
Водород (H_2)	3,8	0,26
Азот (N_2)	9,6	0,10
Гелий (He)	2,2	0,45

Определим, какая доля частиц проходит путь x без столкновения, т. е. будет иметь длину пробега, равную или бóльшую x .

Предположим, что из точки $x=0$ вдоль оси X начинают двигаться n_0 частиц. По мере продвижения вдоль оси X число частиц, не испытавших ни одного столкновения, уменьшается и на расстоянии x от начала движения будет равно n (рис. 1.3). Число столкновений на пути dx равно убыли числа нестолкнувшихся частиц dn , т. е.

$$n \frac{1}{\lambda} dx = -dn.$$

Разделив переменные и проинтегрировав по x от 0 до x , а по n от n_0 до n , получим, что доля частиц, пролетевших без столкновения путь x или бóльший, равна

$$n/n_0 = \exp(-x/\lambda). \quad (1.5)$$

Из выражения (1.5) следует, что все частицы имеют длину свободного пробега больше нуля; пробег, равный или бóльший λ , имеют $1/e$ всех частиц, или 37 %, а пробег 10λ — только примерно 0,05 % всех частиц. Так как все частицы находятся в совершен-

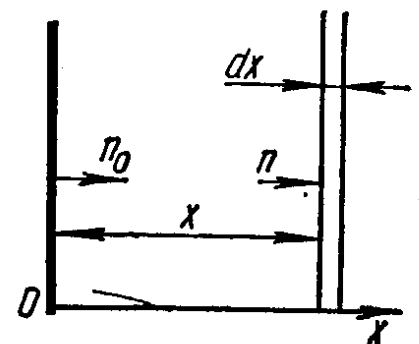


Рис. 1.3. Определение числа нестолкнувшихся частиц и числа электронов в лавине.

но одинаковых условиях, то выражение (1.5) одновременно означает вероятность того, что действительная длина свободного пробега частицы (электрона) больше или равна x .

Зная вероятность пробега электроном без столкновений того или иного пути, можем легко оценить количественно ионизацию, производимую им. При этом сделаем следующие допущения:

- 1) электрон производит ионизацию при всех столкновениях, когда его кинетическая энергия равна или больше $W_{и}$, и совершенно не производит ионизации, если его энергия меньше $W_{и}$;
- 2) при каждом соударении электрон полностью отдает свою энергию и начинает новый пробег с нулевой скоростью;
- 3) электрон движется по направлению силовых линий электрического поля.

Эти допущения являются довольно грубыми, но позволяют получить наглядное выражение для коэффициента объемной ионизации α , который показывает, какое число ионизаций производит один электрон на пути 1 см по направлению силовых линий поля.

При средней длине свободного пробега электрона $\lambda_{э}$ число столкновений, испытываемых им на пути 1 см, равно $1/\lambda_{э}$. Из этого числа столкновений ионизацией закончатся только те, при которых действительная длина пробега была равна или больше $x_{и} = U_{и}/E$, а вероятность этого равна $\exp(-x_{и}/\lambda_{э})$.

Следовательно, число ионизаций на пути 1 см

$$\alpha = \frac{1}{\lambda_{э}} \exp(-x_{и}/\lambda_{э}). \quad (1.6)$$

Подставив в выражение (1.6) значение $x_{и}$ и $\lambda_{э}$ из формул (1.1) и (1.3), получим

$$\alpha = A_0 \delta \exp\left(-\frac{A_0 U_{и} \delta}{E}\right) \quad (1.7)$$

или в общем виде

$$\alpha/\delta = f(E/\delta). \quad (1.8)$$

Зависимость (1.8) хорошо подтверждается опытными данными и говорит о том, что при неизменном отношении E/δ коэффициент α прямо пропорционален плотности (давлению) газа. Формула (1.7) является менее точной, так как она получена на основании ряда упрощений, но в сравнительно небольших пределах изменения E/δ можно подобрать такие значения коэффициента A_0 (см. табл. 1.3), при которых формула дает удовлетворительное совпадение с опытными данными.

В качестве примера на рис. 1.4 приведена зависимость (1.8) для воздуха. Из этого рисунка видно, что при нормальных условиях ($\delta=1$) и напряженности поля менее 20—25 кВ/см коэффициент α ничтожно мал

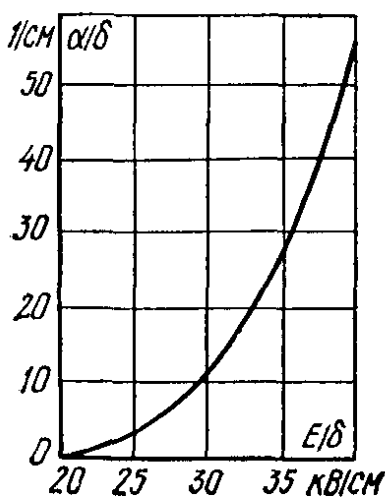


Рис. 1.4. Зависимость $\alpha/\delta = f(E/\delta)$ для воздуха.

и ионизация воздуха практически отсутствует. Заметная ионизация, играющая существенную роль при формировании самостоятельного разряда, начинается только при напряженностях поля порядка 25—30 кВ/см и более.

Оценим приблизительно долю ионизации, производимой ионами. Так как длина свободного пробега ионов в среднем в 4 раза меньше, чем электрона, то в соответствии с выражением (1.7) коэффициент объемной ионизации ионами должен быть в $e^4/4 \approx 13$ раз меньше α . Кроме того, вследствие значительно большей массы ионов их скорость приблизительно в 100 раз меньше скорости электронов. Поэтому ионизация ионами будет осуществляться примерно в 1300 раз реже, чем электронами, и, следовательно, не может иметь существенного значения.

1.2.4. Лавина электронов

Рассмотрим процесс ионизации, происходящий в газовом промежутке между электродами в однородном поле.

Допустим, что за счет воздействия внешнего ионизатора около катода появится один электрон. При достаточно высокой напряженности поля этот электрон, перемещаясь к аноду, произведет ионизацию столкновением. При первой ионизации возникает новый электрон, который при своем движении к аноду также будет осуществлять ионизацию. Следовательно, после второй ионизации, когда возникнут два новых электрона, их общее число возрастет до четырех, после третьей — до восьми, и далее оно будет расти в геометрической прогрессии. Такой непрерывно возрастающий поток электронов получил название **лавины электронов**.

Двигающиеся к аноду электроны оставляют позади себя положительные ионы, которые перемещаются к катоду со значительно меньшей скоростью, чем электроны (при разрядных напряженностях поля и атмосферном давлении $v_e \approx 2 \cdot 10^7$ см/с, а $v_+ \approx 2 \cdot 10^5$ см/с). Таким образом, электроны будут сосредоточены в основном в головной части (головке) лавины, а ионы распределены по всей ее длине.

Определим число электронов в головке лавины при одном начальном электроде ($n_0 = 1$, рис. 1.3). Пусть число электронов на расстоянии x от катода равно n . Каждый из этих n электронов на пути dx произведет αdx ионизаций, а все электроны — $n \alpha dx$ ионизаций. Таким образом, увеличение числа электронов на пути dx будет равно $dn = n \alpha dx$ или $dn/n = \alpha dx$.

Для однородного поля $E = \text{const}$, следовательно, α также будет постоянным. Интегрируя по n в пределах от 1 (начальный электрон) до n и по x от 0 до x , получим

$$n = e^{\alpha x}. \quad (1.9)$$

Это выражение показывает, что число электронов и ионов по мере увеличения x растет лавинообразно, и при достаточно больших x

или α эти заряды могут существенно исказить электрическое поле между электродами.

На рис. 1.5, а показана начальная лавина электронов, распространяющихся от катода, на рис. 1.5, б — примерное распределение положительного N_+ и отрицательного N_- объемных зарядов в лавине.

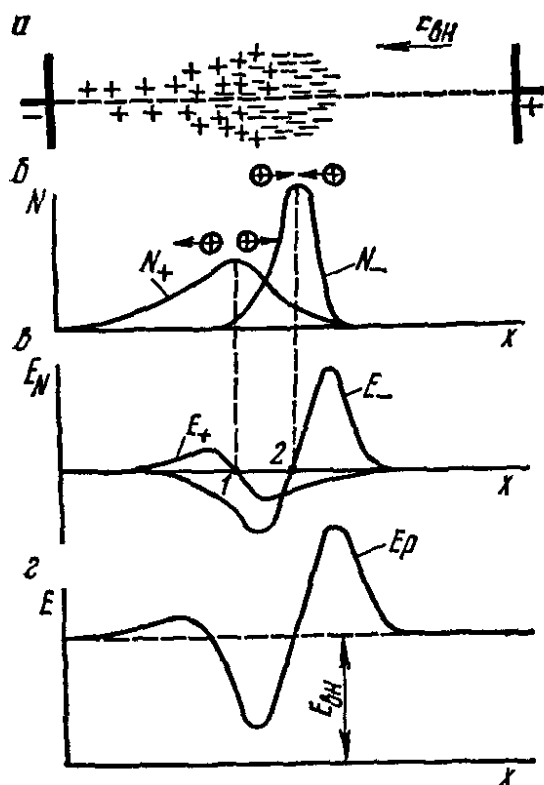


Рис. 1.5. Искажение поля объемными зарядами электронной лавины.

Направление сил (напряженностей поля), обусловленных объемными зарядами и действующих на положительный заряд, показано условно на рис. 1.5, б стрелками. На рис. 1.5, в представлены продольные составляющие этих напряженностей, причем за положительные приняты направления, совпадающие с напряженностью внешнего поля $E_{вн}$. В точках 1 и 2, соответствующих наибольшей плотности зарядов N_+ и N_- , напряженности E_+ и E_- равны нулю, так как силы, действующие на положительный заряд, здесь отсутствуют.

Кривая результирующего распределения напряженности поля E_p (рис. 1.5, г) показывает, что вследствие образования объемных зарядов происходит резкое искажение электрического поля.

Между электродами создаются области с пониженной (позади головки) и повышенной (перед головкой) напряженностью поля. В областях с пониженной напряженностью поля уменьшаются скорости относительного перемещения ионов, т. е. усиливается процесс их рекомбинации, что сопровождается излучением фотонов, обладающих энергией, затраченной ранее на ионизацию. На участке с повышенной напряженностью резко возрастают ионизация и возбуждение молекул, что также сопровождается интенсивным излучением фотонов.

1.2.5. Условие самостоятельности разряда

Возникновение лавины электронов между электродами еще не является показателем самостоятельности разряда. Действительно, как только положительные ионы уйдут на катод, а электроны — на анод, прохождение тока в промежутке прекратится. Для возобновления тока нужен новый электрон, который явится началом новой электронной лавины. Если такие электроны будут создаваться за счет внешнего ионизатора, то разряд останется несамостоятельным и будет сопровождаться прохождением в промежутке отдельных импульсов тока, частота повторения которых, т. е. ток разряда, бу-

дет зависеть от интенсивности внешнего ионизатора (участок *OABC* на рис. 1.1).

Чтобы разряд стал самостоятельным, требуется образование новых электронов (их называют **вторичными**) за счет процессов в самом газовом промежутке и еще до того, как начальная лавина прекратит свое существование.

Вторичные электроны при разряде в газах могут возникать в результате следующих явлений: бомбардировки катода положительными ионами, созданными начальной лавиной; фотоионизации на поверхности катода, осуществляемой излучением начальной лавины; фотоионизации в объеме газа за счет излучения начальной лавины.

Удельный вес этих процессов меняется в зависимости от давления газа, при котором развивается разряд. При пониженных давлениях основную роль играют процессы на катоде, а при давлениях, близких к нормальному и выше, — фотоионизация в объеме газа. Это объясняется тем, что, во-первых, при повышенных давлениях эффективность бомбардировки катода снижается за счет уменьшения длины свободного пробега ионов; во-вторых, при увеличении давления эффективность фотоионизации на катоде снижается за счет поглощения фотонов в объеме газа.

Интенсивность процесса возникновения вторичных электронов характеризуется **коэффициентом вторичной ионизации** γ , который представляет число вторичных электронов, отнесенное к одному акту ионизации в лавине.

Рассмотрим теперь условие, при котором разряд становится самостоятельным. Число ионизаций в лавине, достигшей анода, при одном начальном электроне, согласно выражению (1.9), равно $e^{\alpha S} - 1$. Это количество ионизаций создает $(e^{\alpha S} - 1)\gamma$ вторичных электронов, и если это число будет равно (или больше) единице, т. е. в результате своего развития лавина воссоздаст начальный электрон, разряд станет самостоятельным. Таким образом, выражение

$$\gamma(e^{\alpha S} - 1) = 1 \quad (1.10)$$

означает, что разряд будет поддерживаться, если даже действие внешнего ионизатора прекратится, т. е. оно является условием возникновения самостоятельного разряда.

Выражение (1.10) можно записать следующим образом:

$$\alpha S = \ln(1 + 1/\gamma) = \text{const.} \quad (1.11)$$

Для воздуха при атмосферном и более высоких давлениях $\ln(1 + 1/\gamma) \approx 20$, следовательно, условие возникновения самостоятельного разряда в этом случае можно записать в виде

$$\alpha S = 20. \quad (1.12)$$

При пониженных давлениях, когда $\ln(1 + 1/\gamma) \approx 4$, соответственно получим

$$\alpha S = 4. \quad (1.13)$$

1.2.6. Плазма

Коэффициент ударной ионизации α , как показывает выражение (1.7), быстро возрастает с увеличением напряженности электрического поля E . Поэтому достаточно незначительного повышения E сверх начальной напряженности E_0 , при которой начинается самостоятельный разряд, чтобы число воссоздаваемых лавиной электронов стало больше единицы. При этом число ионизированных частиц в газовом промежутке стремительно нарастает, в результате чего между электродами создается канал, в котором ионизирована значительная часть молекул (плазма).

Свойства плазмы специфичны. Будучи похожей на газ по своему агрегатному состоянию, плазма обладает рядом свойств, присущих металлам, в частности она имеет высокую электропроводность и отражает электромагнитные волны. Поэтому плазму наряду с тремя известными агрегатными состояниями вещества — твердым, жидким и газообразным — часто называют четвертым состоянием.

Для поддержания вещества в состоянии плазмы необходима определенная, достаточно высокая концентрация заряженных частиц. Это объясняется следующим образом. В результате хаотического теплового движения частиц электроны, как более легкие, стремятся уйти за пределы плазмы, в результате чего равновесие зарядов нарушится и произойдет распад плазмы. Такому выходу электронов из плазмы препятствуют силы электрического поля, возникающие между вылетевшими из плазмы электронами и оставшимися избыточными положительными зарядами. Только при достаточно высокой концентрации заряженных частиц эти силы создают необходимый потенциальный барьер, препятствующий выходу электронов из плазмы и поддерживающий тем самым вещество в плазменном состоянии.

В технике высоких напряжений плазма возникает во время электрических разрядов при достаточно высокой степени ионизации в канале разряда (дугового или искрового). Чем выше степень ионизации канала разряда, тем выше проводимость плазмы.

1.3. РАЗРЯДЫ В ГАЗОВЫХ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКАХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНО ДЕЙСТВУЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЯХ

1.3.1. Разряд в однородном поле. Закон Пашена

Если число вторичных электронов, равное $\gamma(e^{\alpha s} - 1)$, даже незначительно превышает единицу, то число электронных лавин, развивающихся в промежутке, будет непрерывно возрастать. При этом последующие лавины развиваются еще до того, как положительные ионы предыдущих лавин успеют уйти на катод. Следовательно, электроны лавин будут распространяться в объеме, заполненном положительными ионами, и газ в промежутке вдоль пути лавин перейдет в состояние плазмы. Ток через газовый промежуток при

этом определяется параметрами внешней цепи, и разряд при атмосферном давлении имеет искровую или дуговую форму.

Таким образом, в промежутке с однородным полем условие самостоятельности разряда является одновременно и условием пробоя (разряда в промежутке), т. е. $U_0 = U_{пр}$.

Значение пробивного напряжения можно получить, подставив в условие самостоятельности разряда (1.11) значение α из выражения (1.7) и $E_{пр} = U_{пр}/S$ (S — расстояние между электродами). После подстановки получим

$$A_0 \delta S \exp\left(-\frac{A_0 U_{и} \delta S}{U_{пр}}\right) = \ln(1 + 1/\gamma)$$

или

$$U_{пр} = \frac{A_0 U_{и} \delta S}{\ln\left[\frac{A_0 \delta S}{\ln(1 + 1/\gamma)}\right]}. \quad (1.14)$$

Как видно из выражения (1.14), пробивное напряжение $U_{пр}$ зависит только от относительной плотности газа δ (давления p) и расстояния между электродами S (остальные величины для данного газа остаются постоянными). Характерно, что величины δ и S входят в выражение (1.14) только в виде их произведения.

Формула (1.14) является математическим выражением установленного экспериментально закона Пашена, который гласит: в однородном поле пробивные напряжения являются функцией произведения относительной плотности воздуха δ (давления p) и расстояния между электродами S , т. е.

$$U_{пр} = f(\delta S). \quad (1.15)$$

Из рис. 1.6, на котором графически представлена зависимость (1.15), видно, что при небольших значениях δS кривая $U_{пр}$ имеет минимум, соответствующий наиболее благоприятным условиям ионизации, при которых значения α будут наибольшими. Минимальное пробивное напряжение для воздуха имеет место при $(\delta S)_{min} \approx 0,001$ см и составляет примерно 300 В (здесь и далее, кроме особо оговоренных случаев, даются амплитудные значения напряжений).

Рассмотрим ход кривой $U_{пр} = f(\delta S)$ с точки зрения физических процессов развития разряда. Предположим, что расстояние S между электродами остается неизменным. Тогда рассматриваемая кривая представляет зависимость $U_{пр} = f(\delta)$, и самостоятельный разряд будет начинаться, как это следует из выражений (1.12), (1.13), при $\alpha = const$. Коэффициент α представляет произведение числа столкновений и вероятности ионизации [см. выражение (1.6)]. При увеличении

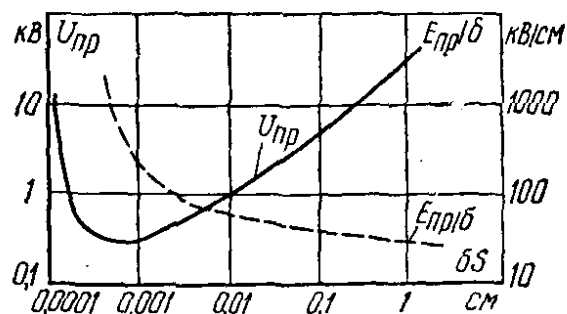


Рис. 1.6. Зависимость $U_{пр} = f(\delta S)$ для воздуха.

плотности газа длина свободного пробега электрона уменьшается, т. е. возрастает число столкновений и уменьшается вероятность ионизации. При увеличении δ по сравнению со значением, соответствующим минимуму кривой, преобладает эффект снижения вероятности ионизации; при снижении δ по сравнению с этим значением преобладает эффект снижения числа столкновений. В обоих случаях для сохранения неизменным значения α необходимо увеличить вероятность ионизации, что и достигается повышением напряжения.

Следует отметить, что явление увеличения $U_{пр}$ при больших давлениях (до 1,0—1,5 МПа) используется в ряде изоляционных конструкций (кабели высокого напряжения, конденсаторы), а эффект увеличения $U_{пр}$ при малых давлениях — в конструкциях с вакуумной изоляцией (кентроны высокого напряжения, вакуумные конденсаторы и пр.).

Чтобы объяснить ход кривой при неизменной плотности газа, рассмотрим сначала изменение $E_{пр}$ (пунктирная линия на рис. 1.6). При уменьшении расстояния пробивная напряженность возрастает, вначале незначительно, а затем, при малых расстояниях, довольно резко. Такое изменение $E_{пр}$ объясняется тем, что при уменьшении S длина лавин сокращается, т. е. уменьшается число столкновений, и требуются все более высокие напряженности, чтобы вероятность ионизации возросла. При $\delta=1$ и $S=1$ см пробивное напряжение в воздухе составляет 31 кВ.

Так как $U_{пр}$ зависит только от произведения δS , то в изоляционных конструкциях пробивное напряжение не изменится, если плотность газа (давление) увеличить, а расстояние одновременно уменьшить в n раз (или наоборот).

Как видно из рис. 1.6, в довольно широкой области значений δS пробивное напряжение изменяется приблизительно по линейному закону. Поэтому на практике для определения $U_{пр}$ в однородном поле вместо довольно неудобной для расчетов формулы (1.14) пользуются полуэмпирической формулой

$$U_{пр} = a\delta S + b\sqrt{\delta S}, \quad (1.16)$$

где a , b — постоянные, зависящие от рода газа (табл. 1.4); S — расстояние между электродами, см. Формула (1.16) дает результаты, очень хорошо совпадающие с опытными данными при значениях δS порядка 0,01 см и более.

Табл. 1.4. Значения постоянных a и b

Постоянные	Воздух	O ₂	N ₂	H ₂	He	Ne
a , кВ/см	24,5	26,00	23,50	12,60	2,01	1,82
b , кВ/см ^{1/2}	6,4	6,35	9,55	4,37	1,53	1,57

Из выражения (1.16) следует, что пробивная напряженность $E_{пр} = U_{пр}/S = a\delta + b\sqrt{\delta/S}$ при уменьшении S возрастает, что уже было отмечено ранее. Это явление дает возможность увеличить пробивное напряжение, если вместо одного газового промежутка толщиной S применить n промежутков толщиной S/n , соединенных последовательно. Например, пробивное напряжение воздуха при $S=1$ см и $\delta=1$ составляет 31 кВ ($U_{пр}=24,5+6,4=31$ кВ), а для 5 соединенных последовательно промежутков по 0,2 см $U_{пр} = 5(24,5 \cdot 0,2 + 6,4\sqrt{0,2}) = 38,5$ кВ, т. е. на 25 % больше. Как будет показано в дальнейшем, такое увеличение $U_{пр}$ характерно также для жидких и твердых диэлектриков и широко используется на практике для уменьшения размеров изоляционных конструкций. При увеличении S $E_{пр}$ стремится к своему пороговому значению $E_{п} = a\delta$.

1.3.2. Стримерная теория разряда

Теория разряда в газах, в основе которой лежат процессы ионизации столкновением, в ряде случаев, например при малых расстояниях между электродами, давала вполне удовлетворительное совпадение с опытными данными. Однако позднее, когда занялись изучением разряда в виде длинных искр, было обнаружено значительное расхождение этой теории с экспериментальными данными, особенно в отношении длительности разряда, которая в действительности была значительно меньше теоретической. Дальнейшие исследования в этом направлении привели к разработке новой теории разряда — стримерной.

Чтобы представить основные положения стримерной теории, рассмотрим развитие разряда в однородном поле. Разряд начинается с образования начальной лавины 1, развивающейся от катода к аноду (рис. 1.7, а). После пробега лавиной расстояния x_k , когда плотность электронов в головке лавины превысит некоторую критическую (соответствующую примерно $\alpha x_k = 20$), наступает резкое искажение поля и интенсивность ионизации возрастает на-

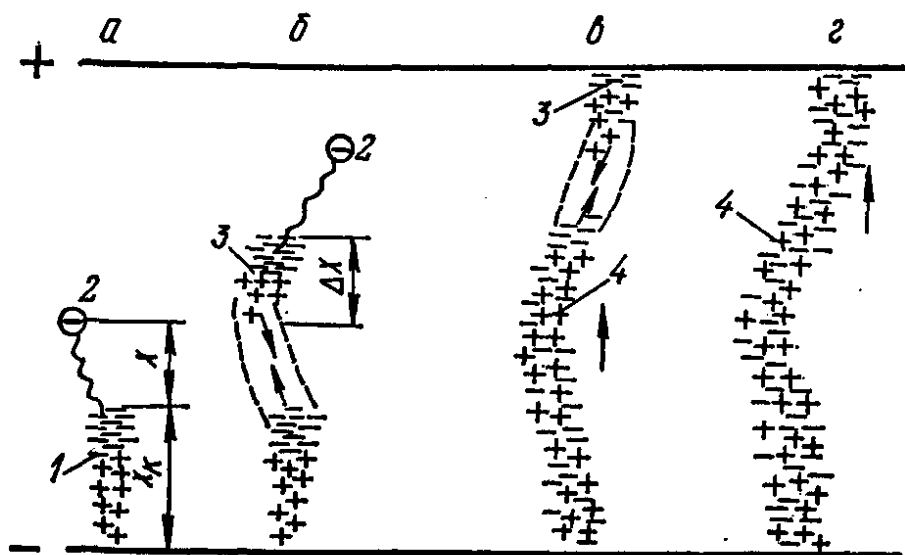


Рис. 1.7. Образование и развитие катодного стримера.

столько, что может произойти образование фотоэлектрона 2 на некотором расстоянии x перед фронтом лавины. Фотоэлектрон оказывается при этом в области повышенной напряженности, получившейся в результате наложения на первоначальное поле промежутка поля объемных зарядов (см. рис. 1.5). Поэтому фотоэлектрон начинает немедленно перемещаться по направлению к аноду, создавая вторичную лавину 3 (рис. 1.7, б). Вследствие сильной зависимости α от напряженности поля плотность электронов в этой лавине достигает критической после пробега ею расстояния $\Delta x < x_k$.

Таким образом, объемный заряд начальной лавины оказывается «перенесенным» на расстояние $x + \Delta x$ к аноду. Область между начальной и вторичной лавинами заполняется электронами начальной и положительными ионами вторичной лавины, т. е. образуется канал 4, заполненный плазмой (рис. 1.7, в).

Стадию разряда, на которой становится возможной фотоионизация за счет излучения самой лавины и образуется канал высокой проводимости, называют **стримерной**, а сам проводящий канал — **стримером** (от англ. слова stream — поток, ручей).

Скорость прорастания стримера превышает в $\frac{x + \Delta x}{\Delta x}$ раз скорость электронов в области фронта стримера и достигает 10^7 — 10^9 см/с, плотность положительных зарядов в стримере составляет 10^{12} ионов/см³, а амплитуда тока стримера, который замыкается через емкость на противоположный электрод, — 10 А.

После того как стример достигнет противоположного электрода (см. рис. 1.7, г), между электродами образуется канал высокой проводимости 4 и развивается **главный разряд**.

Рассмотренный стример представляет стример отрицательного объемного заряда, так как развивается от катода; поэтому он получил название **катодного**.

Катодные стримеры возникают в однородном поле, когда приложено напряжение, значительно превышающее пробивное (в этом случае вследствие высоких значений α условие $\alpha x_k = 20$ выполняется при $x_k \ll S$).

При напряжениях, близких к пробивному, стример образуется после пробега начальной лавиной всего пути между электродами и приобретает от анода положительный объемный заряд. Такой стример развивается от анода к катоду и называется **анодным**.

1.3.3. Разряды в неоднородных полях. Закон подобия

На практике однородные поля встречаются довольно редко, обычно в электроизоляционных конструкциях поле бывает неоднородным. Неоднородность поля существенно влияет на развитие разряда между электродами. В качестве примера рассмотрим случай поля цилиндрического конденсатора при различных радиусах r

внутреннего цилиндра. Изменение напряженности поля $E = \frac{U}{x \ln R/r}$ между электродами и зависимость напряженности E_{\max} на поверхности внутреннего электрода ($x=r$) от отношения R/r представлены на рис. 1.8. Кривая $E_{\max} = f(R/r)$ проходит через минимум при $R/r = e$. Пусть E_0 — начальная напряженность для данных электродов, принятая для упрощения рассуждений постоянной и не зависящей от радиуса r .

Тогда при $R/r < e$ (точка k_1) напряженность на поверхности внутреннего электрода $E_1 > E_0$, и около него возникает самостоятельный разряд. В результате образования ионизированного слоя около электрода его радиус как бы возрастает, т. е. отношение R/r уменьшится. Это вызовет увеличение напряженности E_1 и дальнейшее расширение области ионизации,

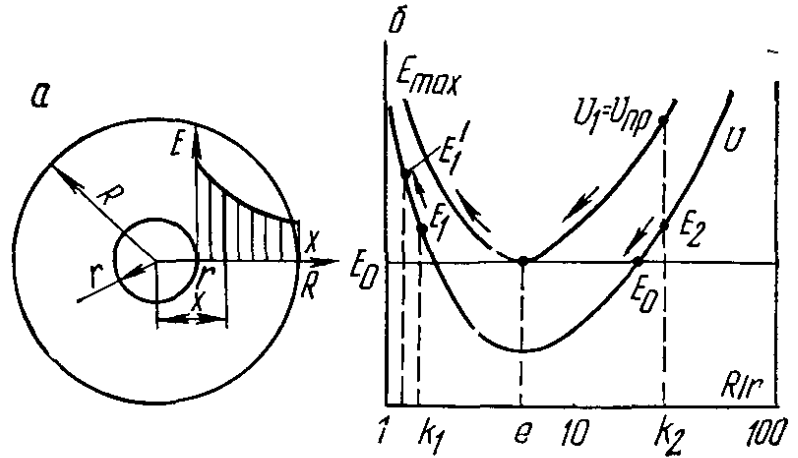


Рис. 1.8. Распределение напряженности между электродами цилиндрического конденсатора (а) и зависимость E_{\max} от отношения R/r (б).

что облегчит возникновение и развитие стримеров. В результате образующиеся стримеры достигнут противоположного электрода и между электродами возникнет канал, заполненный плазмой. Таким образом, при $R/r < e$ возникший самостоятельный разряд очень быстро, без каких-либо явно выраженных промежуточных стадий переходит в пробой промежутка, т. е. $U_0 = U_{пр}$. Поле в этом случае называют **слабонеоднородным**.

При отношении $R/r > e$ (точка k_2) напряженность E_2 также превышает E_0 и тоже начинается самостоятельный разряд. Но в этом случае в отличие от предыдущего в результате уменьшения отношения R/r напряженность E_2 уменьшается до $E_2 = E_0$. После этого дальнейшее расширение области существования самостоятельного разряда прекращается, так как при напряженностях поля меньше E_0 не выполняется условие самостоятельности разряда. Следовательно, при $R/r > e$ будет существовать устойчивый самостоятельный разряд, охватывающий только часть пространства между электродами. Такой разряд называют **коронным** (или просто **коронной**).

Для того чтобы коронный разряд перешел в пробой, необходимо, как следует из рис. 1.8, б, увеличить приложенное напряжение до значения U_1 , при котором кривая E_{\max} будет касаться прямой E_0 в одной точке. В этом случае начавшийся самостоятельный разряд также без каких-либо промежуточных стадий закончится пробоем.

Таким образом, при $R/r > e$ начальное напряжение U_0 является напряжением возникновения короны U_k , а напряжение пробоя бу-

дет всегда выше (иногда в несколько раз) U_0 , т. е. $U_0 = U_k$ и $U_{пр} > U_0$. Такие поля называют **резконеоднородными**.

Степень неоднородности поля можно характеризовать коэффициентом неоднородности $k_n = E_{max}/E_{cp}$, где $E_{cp} = U/S$. Для однородных полей $k_n = 1$, для неоднородных $k_n > 1$ и увеличивается с уменьшением радиуса кривизны электродов и ростом расстояния между ними.

Установить четкую границу между видами неоднородности полей трудно. Приблизительно можно считать, что поле будет слабо-неоднородным при $k_n < 2$ и резконеоднородным при $k_n > 2$. Эта граница соответствует для случая концентрических цилиндров отношению $R/r = 3$, для параллельных проводов $S/r = 30$ и для двух сфер одинакового радиуса $S/r = 8$ (S — везде расстояние между электродами).

Условие возникновения самостоятельного разряда (1.12) в неоднородных полях с учетом изменения напряженности поля и коэффициента α в различных точках промежутка имеет вид

$$\int_1^2 \alpha dx = 20.$$

Применим это условие для рассматриваемого случая неоднородных полей — поля цилиндрического конденсатора (см. рис. 1.8). В этом случае $E_x = \frac{U}{x \ln R/r}$, и условие самостоятельности разряда можно представить в виде

$$\int_r^R A_0 \delta \exp\left(-\frac{A_0 \delta \ln R/r}{U_0}\right) dx = \frac{U_0}{\ln R/r} \left[\exp\left(-\frac{A_0 \delta r \ln R/r}{U_0}\right) - \exp\left(-\frac{A_0 \delta R \ln R/r}{U_0}\right) \right] = 20.$$

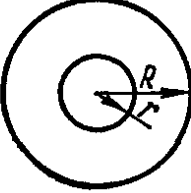
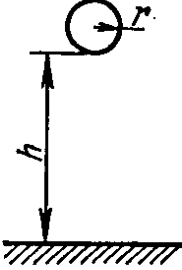
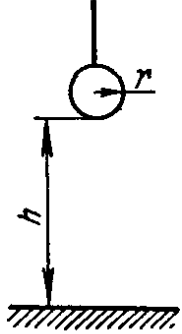
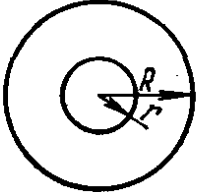
Формула для U_0 представляет довольно сложную зависимость от произведения δr и отношения R/r , но в общем случае может быть записана в виде

$$U_0 = f(\delta r; R/r). \quad (1.17)$$

Выражение (1.17) представляет математическую запись закона **подобия разрядов**: в неоднородных полях начальные напряжения являются функцией произведения плотности газа δ на один из геометрических размеров промежутка (например, на расстояние между электродами) и отношений к этому размеру всех остальных определяющих геометрических размеров.

Например, для параллельных цилиндров с радиусами R и r , находящихся на расстоянии S друг от друга, закон подобия может быть записан в виде $U_0 = f(\delta S; R/S; r/S)$ или $U_0 = f(\delta r; R/r; S/r)$ и т. п. Из закона подобия следует, что для геометрически подобных промежутков, у которых отношения всех геометрических размеров одинаковы, начальные напряжения зависят только от произведе-

Табл. 1.5. Значения коэффициентов k_H и c в формуле (1.18)

Поле	c	k_H	Примечание
Цилиндрический конденсатор 	0,65	$\frac{R/r-1}{\ln R/r}$	$S=R-r$
Провод—плоскость 	0,65	$\frac{h/r}{\ln 2h/r}$ при $h \gg r$	Для параллельных проводов $S=2h$
Шар—плоскость 	0,78	$\approx h/r+1$	$S=h$ Для двух шаров $S=2h$
Сферический конденсатор 	0,89	R/r	$S=R-r$

ния δS . Следовательно, если сохранять промежутки геометрически подобными, начальные напряжения останутся неизменными при изменении плотности газа обратно пропорционально изменению геометрических размеров.

Так как аналитические формулы начальных напряжений для неоднородных полей — очень сложные выражения, то для практических расчетов пользуются эмпирическими формулами (структура этих формул должна полностью соответствовать закону подобия). В частности, определение начальных напряжений U_0 для неоднородных полей в воздухе производится по формуле

$$U_0 = \frac{24,5\delta S}{k_H} \left[1 + \frac{c}{(\delta r)^{0,38}} \right], \quad (1.18)$$

где S — расстояние между электродами, см; r — радиус электрода с большей кривизной, см; k_n — коэффициент неоднородности электрического поля, представляющий отношение максимальной напряженности к средней; c — коэффициент, зависящий от формы электрического поля. Значения k_n и c приведены в табл. 1.5.

Как видно из выражения (1.18) и табл. 1.5, формула для определения U_0 полностью соответствует закону подобия.

В случае слабонеоднородных полей формула (1.18) дает значения пробивных напряжений ($U_{пр} = U_0$) и справедлива практически при любой полярности электродов. Для резконеоднородных полей формула дает значение напряжения начала коронного разряда ($U_0 = U_k$); аналитическое определение пробивных напряжений для таких полей представляет довольно сложную задачу, и для этих целей обычно пользуются опытными данными (см. § 1.4).

В заключение необходимо отметить, что начальные напряжения в неоднородных полях всегда ниже пробивных напряжений в однородном поле для того же газа и при том же расстоянии между электродами. Например, для цилиндрического конденсатора с $r = 1$ см, $R = 2$ см, когда $S = R - r = 1$ см и $R/r = 2$, получим $k_n = 1,46$ и $U_0 = (24,5/1,46) (1 + 0,65) = 27,7$ кВ вместо 31 кВ для однородного поля. Начальные напряжения при этом снижаются по мере увеличения неоднородности поля. Так, для сферического конденсатора при тех же геометрических размерах $k_n = R/r = 2$ и $U_0 = 23,3$ кВ.

В литературе часто можно встретить формулы для определения U_0 , имеющие аналогичную с выражениями (1.16) и (1.18) структуру, но отличающиеся от них значениями коэффициентов. Эти формулы дают при вычислении также вполне удовлетворительные результаты, но в некоторых областях значений геометрических размеров погрешность вычислений все же возрастает. Например, при применении формулы Пика $U_0 = 30,3\delta r \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{r\delta}}\right) \ln S/r$ погрешность возрастает при увеличении радиуса провода r .

1.3.4. Разряды в резконеоднородных несимметричных полях. Эффект полярности электродов

Общие сведения. В однородных полях при напряжениях ниже разрядного ионизации практически нет, поэтому при $U \geq U_0$ начальная лавина развивается здесь при отсутствии предварительно созданного объемного заряда.

В резконеоднородных полях напряженность поля у поверхности электродов с малым радиусом кривизны обычно оказывается достаточной для начала интенсивной ионизации даже при напряжениях, значительно меньших напряжения возникновения короны. Объемные заряды, создаваемые такой предварительной ионизацией, будут оказывать существенное влияние на процесс дальнейшего развития разряда.

Рассмотрим развитие разряда в промежутке стержень — плоскость, который является характерным примером резконеоднородно-

го несимметричного поля. Образующиеся в результате предварительной ионизации у стержня объемные заряды будут оказывать на развитие разряда различное влияние в зависимости от полярности стержня.

Возникновение короны. При положительной полярности стержня образующиеся в промежутке электроны, двигаясь к нему, производят ионизацию и образуют лавины электронов (рис. 1.9, а). Когда эти лавины достигают электрода, электроны уходят на стержень,

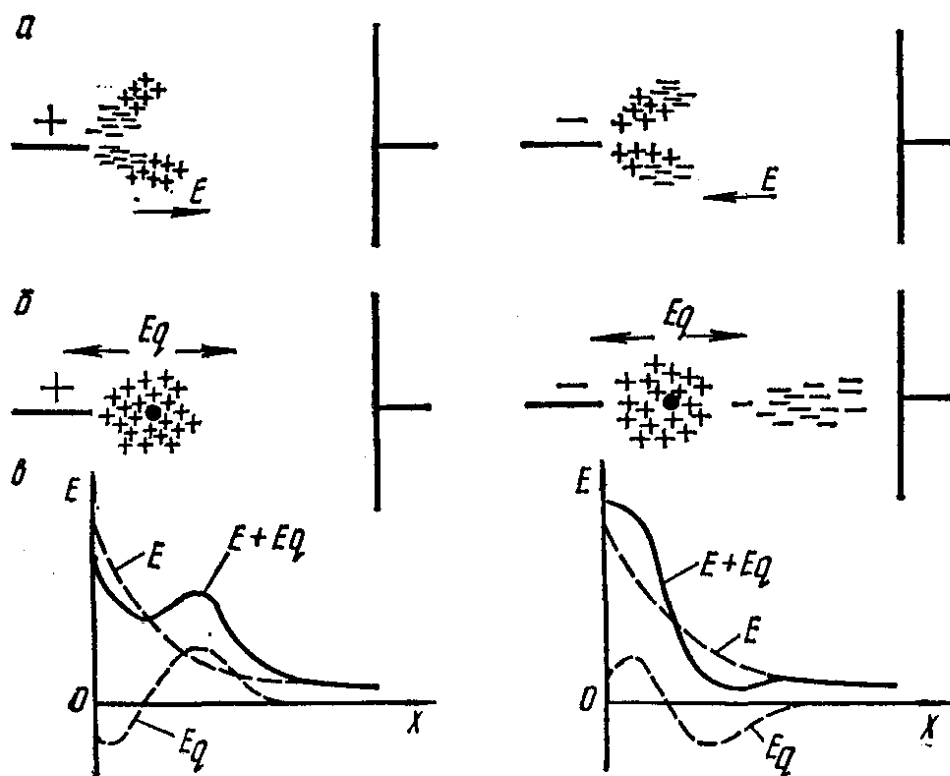


Рис. 1.9. Возникновение короны в промежутке стержень — плоскость.

и около него остаются положительные ионы, медленно перемещающиеся к плоскости. Возникший у стержня положительный объемный заряд создает собственное поле E_q (направление его показано на рис. 1.9, б стрелками), в результате чего напряженность поля вблизи стержня уменьшается, а во внешнем пространстве увеличивается (рис. 1.9, в). Поэтому дальнейшая ионизация вблизи стержня ослабляется, т. е. затрудняется выполнение условий самостоятельности разряда (начала короны).

При отрицательной полярности стержня появившиеся у катода электроны сразу попадают в сильное поле и образуют лавины, двигающиеся к плоскости. Выйдя из области сильного поля, электроны перестают производить ионизацию и летят к плоскости, уменьшая свою скорость при соударениях, в результате чего часть из них попадает на анод, а часть образует отрицательные ионы. Около стержня остается компактный положительный объемный заряд, который резко искажает электрическое поле, усиливая его вблизи стержня и ослабляя в остальной части пространства. Рассеянный отрицательный заряд на поле оказывает незначительное влияние. В результате интенсивность ионизации у стержня возрастает и вы-

полнение условий самостоятельности разряда (возникновение короны) облегчается.

Таким образом, напряжение возникновения короны при положительной полярности стержня оказывается выше, чем при отрицательной.

Пробой промежутка. При положительной полярности стержня и дальнейшем увеличении напряжения лавины электронов возникают в области наибольшей напряженности — справа от объемного заряда (рис. 1.9, в). Электроны лавины, сливаясь с положительным объемным зарядом, создают зародыш анодного стримера, заполненный плазмой. Так как заряды плазмы находятся в неоднородном электрическом поле, то на головке стримера будет некоторый избыточный положительный заряд. Этот заряд создает повышенную по сравнению с первоначальной напряженность перед головкой стримера, что обеспечивает образование новых лавин, которые втягиваются в стример, способствуя дальнейшему его прорастанию и усилению поля перед головкой стримера. Таким образом, объемный заряд при положительной полярности стержня способствует прорастанию стримера до противоположного электрода, т. е. облегчает пробой промежутка.

При отрицательной полярности стержня повышение напряжения приводит к началу интенсивной ионизации и образованию большого числа лавин на участке между стержнем и объемным зарядом, где напряженность поля наивысшая (рис. 1,9, в). Вследствие этого возникает более или менее однородный плазменный слой, который играет роль как бы экрана с большим, чем у стержня, радиусом кривизны.

При дальнейшем увеличении напряжения интенсивность ионизации возрастает, плазменный слой увеличивается и несколько вытягивается по направлению к электродам. Напряженность поля на внешней поверхности плазменного слоя постепенно растет, и начинается образование лавин справа от этого слоя, что приводит в конце концов к образованию катодных стримеров. Образование катодных стримеров происходит в области более низкой напряженности поля, чем при положительной полярности стержня, что затрудняет их развитие; скорость их оказывается при этом на порядок ниже скорости положительного стримера.

В результате разрядные напряжения при отрицательной полярности стержня в 2—2,5 раза выше, чем при положительной. Это явление получило название **эффекта полярности электродов**. Разрядные напряжения при небольших расстояниях (до 8—10 см) имеют величину порядка 8—15 кВ/см (рис. 1.10), что значительно ниже разрядных напряженностей в однородном поле.

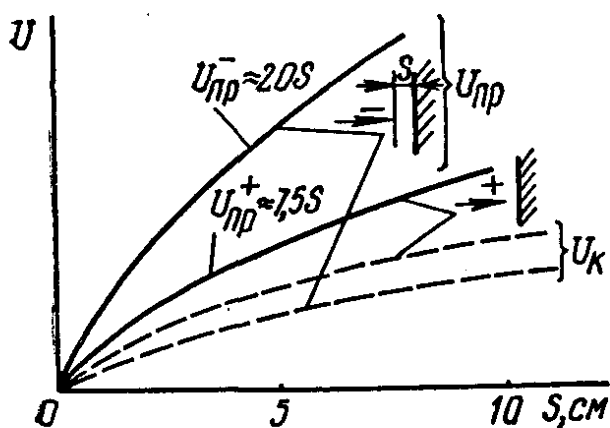


Рис. 1.10. Эффект полярности.

Эффект полярности наблюдается и при переменных напряжениях. В этом случае пробой несимметричных промежутков будет происходить при положительной полуволне напряжения на стержне, т. е. при напряжениях, значительно меньше тех, которые данный промежуток мог бы выдержать при отрицательной полуволне.

Поэтому эффект полярности нежелателен, и в изоляционных конструкциях принимают меры к его устранению (см. § 1.4, а также гл. 4).

Главный разряд. Пересечение стримером всего промежутка между электродами обеспечивает полный пробой, но не является последней фазой разряда. Так как канал 1 стримера (рис. 1.11) является проводящим и напряженность поля в нем невелика, то стример служит как бы проциал его головки близок к потенциалу стержня. Когда расстоянием электродов, и потенциальной разностью между плоскостью и стримером становится достаточно малым, напряженность поля в еще не пробитой части промежутка 2 возрастает настолько, что в ней начинается интенсивная ионизация. В результате этот промежуток превращается в плазму 3, плотность ионов в которой значительно выше, чем в стримере.

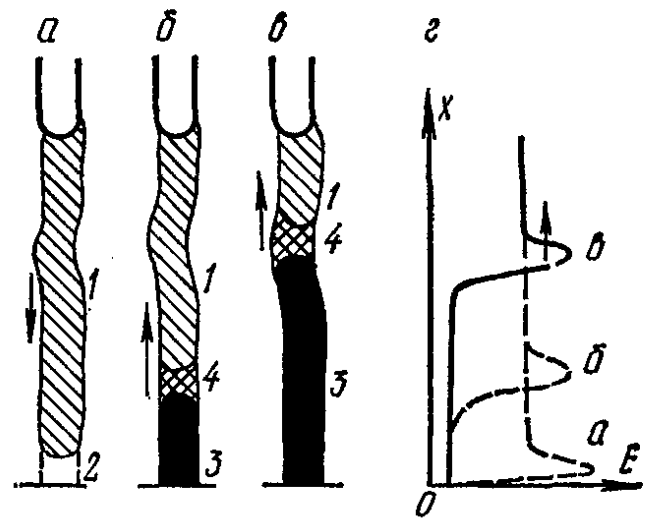


Рис. 1.11. Развитие главного разряда (а, б и в) и распределение напряженности электрического поля в канале (г).

Большая напряженность на границе вновь образовавшегося канала приводит к быстрому распространению зоны 4 интенсивной ионизации по направлению к стержню. Этот процесс называют **главным** или **обратным разрядом**. Главный разряд распространяется в направлении, обратном направлению движения стримера, со скоростью до 10^9 см/с и обеспечивает создание между электродами канала высокой проводимости, через который и протекает ток короткого замыкания источника питания.

Особенности развития разряда в длинных воздушных промежутках. Разряд в воздушных промежутках длиной в несколько метров или десятков метров и более (между проводами ВЛ сверхвысокого напряжения, разряд в виде молнии) приобретает новые качественные особенности. При таких расстояниях проводимости стримеров уже недостаточны для создания хорошо проводящего канала между электродами, и по следу одного стримера возникает разряд в новой, так называемой **лидерной**, стадии.

Рассмотрим образование положительного лидера (рис. 1.12). Электроны в канале *mk* положительного стримера отсасываются анодом. При достаточно высокой концентрации электронов, т. е. при достаточном токе, в канале стримера начинается термическая ионизация, приводящая к еще большей концентрации заряженных час-

тиц в канале, т. е. к увеличению проводимости и дальнейшему росту тока.

В результате канал стримера превращается в плазменный канал с более высокой проводимостью — лидер mn (рис. 1.12, а). Процесс начинается у электрода, где через сечение канала канала стримера проходит весь поток электронов, и распространяется к головке стримера (внешне это проявляется в виде быстро распространяющегося яркого свечения).

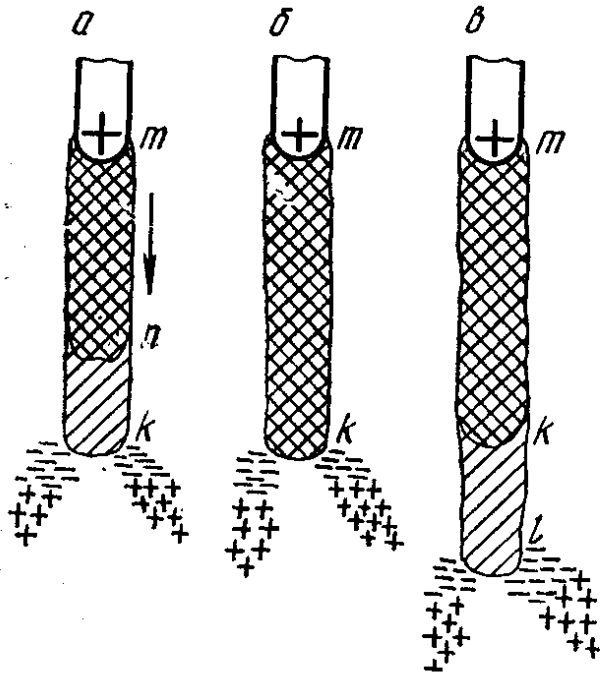


Рис. 1.12. Схема развития положительного лидера.

них напряженностях поля E порядка 1—2 кВ/см, причем чем длиннее промежутки, тем меньше E .

Концентрация зарядов в канале лидера достигает 10^{18} ион/см³, ток лидера — сотен ампер.

Образование отрицательного лидера происходит аналогичным образом, только поток электронов в этом случае направлен от электрода к головке стримера. При развитии новых стримеров из электронных лавин в глубь промежутка уходят электроны, т. е. в изолированной области создается объемный отрицательный заряд, затрудняющий продвижение лидера. Поэтому пробой промежутка происходит при более высоких напряжениях.

При продвижении лидера в глубь промежутка на конце его появляется ряд стримеров, и каждый из них представляет вероятное направление дальнейшего развития лидера. Каждое направление тем более вероятно, чем больше ионизирован канал того или иного стримера, но отклонение направления, как и само развитие стримеров, носит случайный характер. Этим и объясняется ветвящийся характер пути разряда в длинных промежутках, например молнии.

Когда лидер достигает противоположного электрода, начинается главный разряд. Визуально главный разряд имеет характер более яркого, чем лидер, свечения, распространяющегося в направлении, обратном направлению движения лидера (как и при стримерной стадии разряда). Скорость развития главного разряда в длинных промежутках также достигает 10^9 см/с.

1.3.5. Дуговой разряд

Основные понятия. Дуговой разряд (дуга) представляет самостоятельный разряд в газе, характеризующийся высокой плотностью тока и чрезвычайно высокой температурой канала разряда. В электрических установках дуговой разряд чаще всего возникает между контактами высоковольтных выключателей, разрядников и других аппаратов при отключении электрических цепей (закрытая дуга), а также при повреждениях внешней изоляции, например на линиях электропередачи при перекрытиях линейной изоляции (открытая дуга).

Канал дуги можно разбить на три участка с соответствующими падениями напряжения (рис. 1.13).

Длина **катодного участка** l в воздухе при нормальных условиях не превышает 10^{-4} см, катодное падение напряжения U_k лежит в пределах 10—20 В (в зависимости от материала электродов, рода и состояния газа). Напряженность поля в катодной зоне при этом составляет 10^2 — 10^3 кВ/см. Температура катода в результате интенсивной бомбардировки положительными ионами достигает 2500—2800 К. Все это вместе взятое обуславливает ионизацию газа столкновением и мощную эмиссию электронов с поверхности катода (плотность тока эмиссии может достигать 10^3 — 10^4 А/см²).

Длина **анодного участка** z несколько превышает 10^{-4} см, анодное падение напряжения U_a лежит в пределах 2—6 В, напряженность поля также достаточна для ударной ионизации и нагрева анода бомбардирующими его электронами до высоких температур. Плотность тока на аноде на порядок ниже плотности тока на катоде (около 500 А/см²).

Падение напряжения в **столбе дуги** 2 равномерно, напряженность поля E_c лежит в пределах 15—30 В/см. Такая напряженность сообщает электронам большие скорости и энергии, и в канале столба создается температура порядка 6000—12 000 К, в результате чего происходит интенсивная термическая ионизация. Плотность зарядов в столбе дуги достигает 10^{18} ион/см³, т. е. он представляет плазму с очень высокой электропроводностью. Длина столба дуги определяется приложенным напряжением, величиной тока и условиями горения, например длина открытой дуги в установках высокого напряжения может достигать десятков метров.

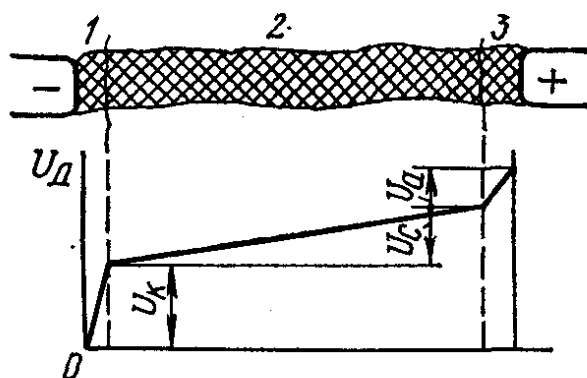


Рис. 1.13. Области дугового разряда и распределение напряжений в канале дуги.

Таким образом, приложенное к дуге напряжение U_d имеет три составляющих: $U_d = U_k + E_c l_c + U_a$, где $E_c l_c = U_c$ — падение напряжения в столбе дуги.

В тех случаях, когда $U_c \gg U_k + U_a$, дугу принято называть

длинной. В длинной дуге процессы и напряжения для поддержания разряда зависят в основном от явлений в столбе (термической ионизации, условий нагревания и охлаждения столба, характеристик и природы газа и т. п.).

Процессы в короткой дуге, например в искровых промежутках вентиляльных разрядников, когда $U_c \ll U_k + U_a$, определяются явлениями у катода и анода и зависят от природы и свойств материала электродов.

Вольт-амперная характеристика дугового разряда имеет нелинейный падающий характер. Это объясняется тем, что при увели-

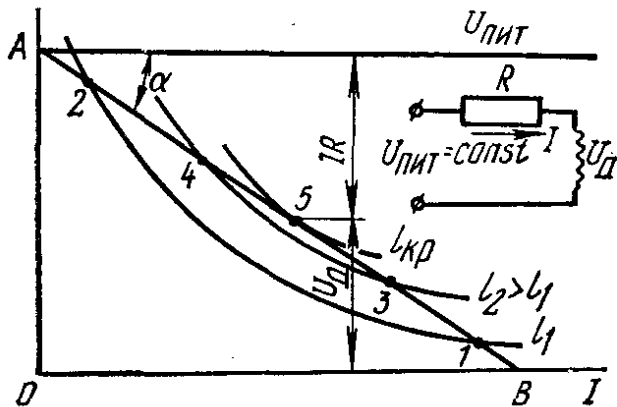


Рис. 1.14. Вольт-амперные характеристики электрической дуги постоянного тока.

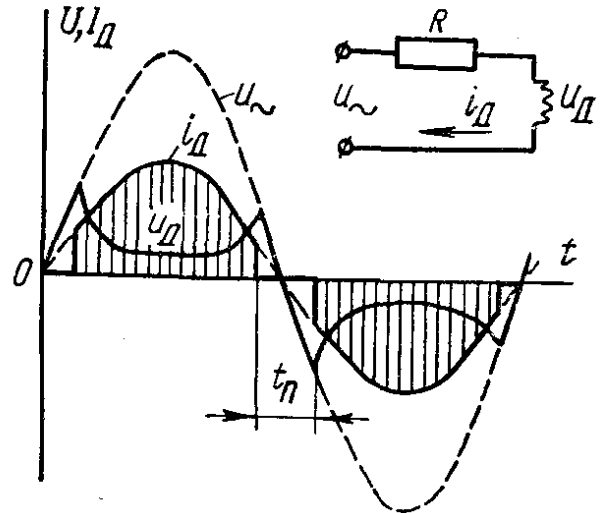


Рис. 1.15. Изменение тока и напряжения дуги переменного тока во времени.

чении тока степень ионизации, а следовательно, и электропроводность канала дуги увеличиваются быстрее, чем растет ток. Статические вольт-амперные характеристики дуги, т. е. характеристики при постоянном напряжении питания $U_{пит}$, изображены на рис. 1.14, прямая AB на этом рисунке представляет падение напряжения IR . При увеличении длины дуги l напряжение на дуге возрастает, т. е. ее характеристика смещается вверх. Точки 1 и 3 соответствуют устойчивому режиму горения дуги, точки 2 и 4 — неустойчивому, а точка 5 — предельному случаю устойчивого дугового разряда.

Нелинейность статической вольт-амперной характеристики дуги придает специфический характер кривым изменения напряжения и тока дугового разряда при синусоидальном напряжении (рис. 1.15).

Гашение дуги. Как видно из рис. 1.15, изменение i_d дуги переменного тока во времени характеризуется появлением пауз тока t_p , которые представляют наиболее благоприятные моменты для гашения дуги.

Для того чтобы после прохождения тока дуги через нуль не произошло повторного зажигания дуги, необходимо, чтобы канал дуги к этому моменту обладал определенной электрической прочностью (характеризуемой обычно пробивным напряжением канала дуги $U_{д.пр}$), превышающей величину восстанавливающегося на нем напряжения U_B .

Напряжение $U_{д.пр}$ складывается из пробивных напряжений катодного участка $U_{к.пр}$ и столба дуги $U_{с.пр}$. Из вольт-амперной характеристики газового разряда известно, что при очень малых токах разряда (порядка 10^{-6} — 10^{-8} А) катодное падение напряжения, необходимое для поддержания разряда, увеличивается до 250—300 В (при больших токах дуги оно составляет, как уже было указано, 5—20 В). Поэтому, чтобы после прохождения тока дуги через нуль самостоятельный разряд на катодном участке не возобновился, напряжение на нем в первый момент времени не должно превышать 250—300 В. Вследствие высокой напряженности электрического поля при этом объемные заряды удаляются из катодной зоны очень быстро и восстановление электрической прочности происходит здесь в течение 10^{-6} — 10^{-7} с (при условии отсутствия термоэлектронной эмиссии с катода).

Процесс восстановления электрической прочности столба дуги $U_{с.пр}$ определяется процессами рекомбинации и диффузии зарядов плазмы, а также ослаблением термической ионизации вследствие падения температуры столба дуги, поэтому протекает значительно медленнее и зависит в сильной степени от тока, протекавшего до этого в дуге. Например, электрическая прочность столба дуги достигает 0,5 кВ/см при $I_{д}=100$ А за 0,05 с, а при $I_{д}=5000$ А — за 0,35 с.

Для обеспечения высокой скорости восстановления $U_{д.пр}$ на практике применяют различные способы. Например, в вентильных разрядниках газовый промежуток разбивают на большое число (n) коротких, при этом столб дуги из канала разряда исключается и $U_{д.пр}$ определяется в первый момент времени суммой падений напряжения в катодной области, т. е. $U_{д.пр}=n(250—300)$ В; время восстановления $U_{д.пр}$ будет порядка 10^{-6} с. В ряде случаев для ускорения процессов деионизации в столбе дуги применяют повышенные давления, удаление ионизированных частиц путем создания дутья и т. п. (высоковольтные выключатели, трубчатые разрядники).

Одновременно с ростом электрической прочности промежутка на нем восстанавливается напряжение $U_{в}$, стремящееся зажечь дугу. Скорость восстановления этого напряжения зависит от ряда факторов, в частности от параметров электрической цепи, питающей дугу (ее емкости, индуктивности и сопротивления). На рис. 1.16 показаны возможные случаи изменения напряжения $U_{в}$. При колебательном процессе восстановления напряжения (рис. 1.16, а) скорость восстановления напряжения, определяемая $\operatorname{tg} \alpha$, и амплитуда $U_{в}$ могут быть очень большими. Если при этом скорость восстановления электрической прочности дугового канала окажется недостаточно высокой ($U'_{д.пр}$), в точке 1, где пересекаются эти кривые, произойдет повторное зажигание дуги.

При апериодическом процессе (рис. 1.16, б) скорость восстановления напряжения $U_{в}$ и его величина, как правило, значительно меньше, и даже при малой скорости роста $U'_{д.пр}$ повторного зажигания дуги может не произойти. Поэтому на практике в ряде слу-

чаев контакты выключателей шунтируют резисторами, в результате чего общее сопротивление канала дуги снижается, процесс восстановления напряжения U_B становится апериодическим, и тем самым достигаются более благоприятные условия гашения дуги.

Открытая дуга, возникающая на линиях электропередачи в случае перекрытия линейной изоляции, при горении растягивается тепловым движением воздуха и электродинамическими усилиями. При горизонтальном расположении проводов ВЛ длина дуги может

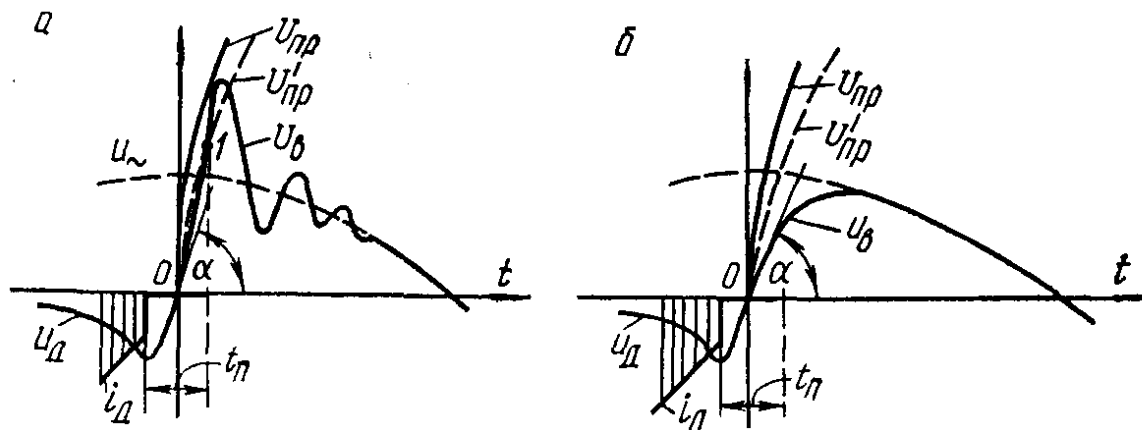


Рис. 1.16. Повторное зажигание дуги:

а — при колебательном; б — при апериодическом процессе восстановления напряжения.

превышать расстояние между ними в 20, а при вертикальном — в 5 раз. Если длина растянутой дуги превзойдет критическую, то приложенное напряжение становится недостаточным для поддержания горения дуги, и она гаснет (происходит самопогасание дуги).

Дуга также гаснет, если ее ток уменьшится до некоторой критической величины $I_{кр}$, так как при этом происходит уменьшение выделяемого в дуге тепла, ослабление термической ионизации и повышение напряженности в канале столба.

Критическая длина дуги и критический ток могут быть приближенно определены по эмпирическим формулам: для чисто активной цепи $l_{кр} = 0,082 UI^{0,25}$ м, $I_{кр} = 0,2I$; для чисто реактивной цепи $l_{кр} = 0,113 UI^{0,25}$ м, $I_{кр} = 0,45I$ (U — действующее значение напряжения сети, кВ; I — действующее значение тока короткого замыкания (к. з.) в данной точке цепи, А). Из приведенных формул следует, что критическая длина дуги в сетях напряжением 35 кВ колеблется от 7 (при $I = 10$ А) до 20 м (при $I = 1000$ А), а в сетях напряжением 110 кВ — от 20 до 60 м соответственно. Ожидать самопогасания дуги можно только в сетях напряжением 35 кВ и ниже при сравнительно небольших токах (несколько десятков ампер). Опыт эксплуатации подтверждает, что на линиях электропередачи напряжением 35—110 кВ на деревянных опорах дуги, возникающие при междуфазовых замыканиях, самопроизвольно не гаснут, хотя и растягиваются иногда до 30—40 м.

Надежное самопогасание дуги имеет место только при замыканиях на землю в сетях напряжением 20—35 кВ при токах замыкания не свыше 10 А и в сетях напряжением 6—10 кВ при токах до 30 А.

Ток дуги постоянного тока не имеет нулевых переходов, поэтому ее гашение при высоких напряжениях представляет трудную задачу. Одним из вариантов решения этого вопроса является схема, при которой искусственно создается переход тока дуги через нуль путем пропуска в канале дуги импульса тока противоположного направления, получаемого путем разряда конденсатора через дуговой промежуток.

1.3.6. Методы повышения электрической прочности газов

Для повышения электрической прочности газов часто применяют, как уже указывалось ранее, глубокий вакуум и повышенное давление. Следует, однако, иметь в виду, что в резконеоднородных полях при повышенных давлениях в электроотрицательных газах (кислород, воздух) наблюдается аномалия разряда: при положительной полярности стержня и давлении порядка 0,6—1,0 МПа разрядные напряжения резко падают примерно в 1,5—2 раза, затем начинают вновь увеличиваться, правда, более медленно. Поэтому при повышенных давлениях и резконеоднородных полях желательнее применять электроположительные газы (например, азот) или ограничиваться давлением 0,4—0,6 МПа.

За последние годы в технике изоляции все более широко применяют газы с повышенной электрической прочностью. Наибольшее распространение получили такие газы, как фреон (дихлордифторметан CCl_2F_2) и элегаз (шестифтористая сера SF_6). Электрическая прочность этих газов превышает электрическую прочность воздуха в 2,4—2,6 раза, и в отличие от других подобных газов они химически наиболее инертны, почти не разлагаются под действием электрических разрядов (особенно элегаз) и имеют низкие температуры сжижения (-30°C для фреона и -62°C для элегаза).

Повышенная электрическая прочность указанных газов объясняется меньшими значениями коэффициента α при той же, что и в воздухе, напряженности поля. Причиной меньших значений α являются малые длины свободного пробега из-за больших размеров молекул и большое сродство электронов к галоидам, особенно фтору и хлору, в результате чего число электронов в промежутке уменьшается (они прилипают к молекулам, образуя малоподвижные отрицательные ионы).

Очень часто элегаз и фреон применяют при повышенных давлениях порядка 0,3—0,5 МПа, что позволяет получить общее увеличение электрической прочности в 6—10 раз (подробнее см. § 3.6).

Для увеличения электрической прочности газовых промежутков с резконеоднородными полями широко применяют барьеры. Барьер представляет тонкую пластинку из листового изолирующего материала, имеющую обычно плоскую или цилиндрическую форму и располагаемую между электродами промежутка. Влияние, которое оказывает барьер на разрядные напряжения, связано с изменением объемного заряда промежутка, поэтому пробивное напряжение са-

мого барьера существенной роли не играет, и в качестве него можно с успехом использовать лист плотной (непроницаемой для ионов) бумаги.

Рассмотрим, какое влияние оказывает барьер в промежутке положительный стержень — плоскость (рис. 1.17, а). При наличии барьера положительные ионы задерживаются им и растекаются по его поверхности тем более равномерным слоем, чем дальше от стержня установлен барьер.

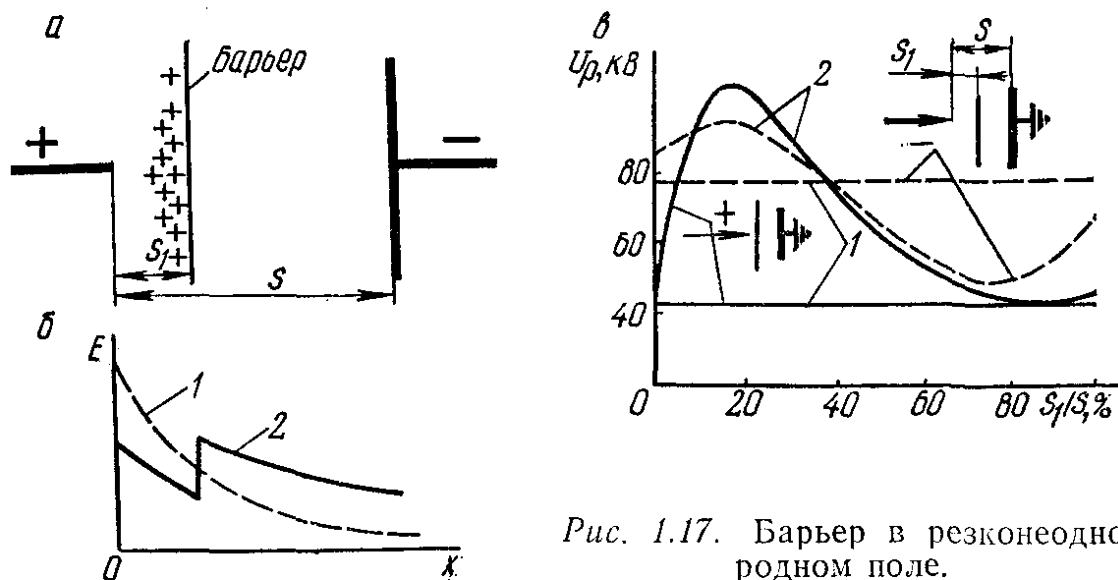


Рис. 1.17. Барьер в резконеоднородном поле.

Напряженность поля на участке барьер — плоскость возрастает, но распределяется теперь более равномерно, а напряженность поля на участке стержень — барьер снижается (рис. 1.17, б). Поэтому барьер при положительной полярности стержня приводит к значительному повышению разрядных напряжений.

При отрицательной полярности стержня барьер задерживаетдвигающиеся к плоскости электроны, которые образуют на поверхности барьера отрицательные ионы. Таким образом, барьер способствует образованию концентрированного отрицательного объемного заряда, который при отсутствии барьера был рассеянным и имел меньшую величину. Поэтому если при отсутствии барьера основную роль в развитии разряда играл сконцентрированный около стержня положительный объемный заряд, снижающий напряженность поля в промежутке, то при наличии барьера значительную роль начинает играть также сконцентрированный на барьере отрицательный заряд. Этот заряд повышает напряженность в промежутке, в результате чего разрядные напряжения уменьшаются.

Установка барьера непосредственно у стержня неэффективна. При положительной полярности ионы распределяются по его поверхности очень неравномерно и поле за барьером оказывается достаточным для возникновения ионизации. При отрицательной полярности электроны летят с большой скоростью от стержня и проходят через барьер, т. е. отрицательный заряд на его поверхности не создается. Разрядные напряжения в этом случае могут даже несколько возрасти, так как на поверхности барьера будут накап-

ливаться положительные ионы, ослабляющие поле на участке барьер — плоскость.

Опыт показывает, что наиболее эффективным является расположение барьера на расстоянии $S_1 = (0,2—0,3)S$ от стержня (рис. 1.17, в, кривые 2). В этом случае разрядные напряжения при положительной полярности увеличиваются более чем в два раза, а при отрицательной — еще не уменьшаются, т. е. эффект полярности устраняется практически полностью (прямые 1 представляют разрядные напряжения без барьеров).

Пробой в резконеоднородном поле при переменном напряжении происходит в положительный полупериод, когда разрядные напряжения промежутка ниже. Поэтому при переменном напряжении барьеры также вызывают увеличение пробивных напряжений.

Для увеличения пробивных напряжений и устранения короны в резконеоднородных полях в ряде случаев применяют экранирование электродов с острыми краями или имеющих малый радиус кривизны r . Экран представляет соединенную электрически с электродом тонкую проводящую поверхность, чаще всего имеющую форму сферы или цилиндра. Радиус кривизны экрана значительно превышает r , поэтому электрическое поле у поверхности экрана становится более однородным, что и приводит к увеличению напряжений короны и пробоя.

1.3.7. Статистическое распределение разрядных напряжений и их вероятность

Все стадии разряда в газовых промежутках подчинены статистическим закономерностям. Появление начального электрона, развитие лавин и стримеров — все это связано с различными микропроцессами, каждый из которых носит случайный характер в силу таких факторов, как действия внешнего ионизатора, наличие пылинок в газе, случайное взаимное расположение молекул газа и т. п. Поэтому разрядное напряжение промежутка также является случайной величиной, значение которой изменяется от опыта к опыту.

Предположим, что при одинаковых условиях произошло n разрядов, тогда среднее значение разрядного напряжения

$$\bar{U}_p = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} U_{pk}}{n},$$

где U_{pk} — разрядное напряжение при k -м испытании.

Разброс отдельных значений разрядного напряжения U_{pk} относительно среднего \bar{U}_p характеризуется среднеквадратичным отклонением σ и называется **стандартом распределения**:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{k=n} (U_{pk} - \bar{U}_p)^2}{n - 1}}.$$

Стандарт распределения выражается в единицах напряжения, в долях или процентах от U_p .

Согласно теории вероятностей, разброс опытных точек, на который влияет большое число независимых случайных факторов, что как раз и характерно для разрядных напряжений в газах, должен следовать так называемому нормальному закону распределения:

$$\varphi(U_p) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(U_{pk} - \bar{U}_p)^2}{2\sigma^2} \right]. \quad (1.19)$$

Функция $\varphi(U_p)$ носит название **дифференциальной кривой распределения** (рис. 1.18) и показывает плотность распределения разрядных напряжений. Вполне очевидно, что сумма $P_k \Delta U$ для всех интервалов напряжения ΔU должна быть равна 100 % (единице), или, что то же самое, площадь, ограниченная кривой $\varphi(U_p)$ и абсциссой в пределах от U_{\min} до U_{\max} , должна быть равна единице, т. е.

$$\int_{U_{\min}}^{U_{\max}} \varphi(U_p) dU = 1. \quad (1.20)$$

Дифференциальная кривая распределения разрядных напряжений и стандарт распределения позволяют установить ряд важных соотношений между воздействующим напряжением и вероятностью разряда, например определить уровень испытательных напряжений.

Для этого отложим от среднего значения пробивного напряжения \bar{U}_p значения стандарта распределения σ , тогда площадью, ограниченной прямыми $\bar{U}_p - \sigma$ и $\bar{U}_p + \sigma$, будет охвачено 76 % всех разрядов; площадью между прямыми $\bar{U}_p - 2\sigma$ и $\bar{U}_p + 2\sigma$ — 95 %; площадью между прямыми, соответствующими $\bar{U}_p - 3\sigma$ и $\bar{U}_p + 3\sigma$, — 99,6 % всех наблюдаемых опытов (см. рис. 1.18). Следовательно, если принять уровень испытательных напряжений $U_{\text{исп}} = \bar{U}_p - 2\sigma$, то вероятность разряда при многократных испытаниях будет составлять 2,5 %, при $U_{\text{исп}} = \bar{U}_p - 3\sigma$ — 0,2 %.

Интеграл функции $\varphi(U_p)$ дает **интегральную кривую $\psi(U_p)$ распределения разрядных напряжений** (см. рис. 1.18). Каждая из ординат интегральной кривой распределения представляет вероятность того, что в данном опыте разрядное напряжение окажется равным или меньшим U . Таким образом, интегральная кривая дает закон распределения пробивных напряжений.

Интегральная кривая распределения по своей форме подобна кривой вероятности пробоя $F(U)$, которую называют часто **кривой эффекта** и которая показывает, какая часть проведенных при данном напряжении опытов закончилась пробоем и какая их доля пробоя не вызвала.

Кривые эффекта и кривые распределения вероятности напряжений позволяют решать ряд технических задач, например устанавли-

вать уровень испытательных напряжений, оценивать вероятность пробоя при испытаниях повышенным напряжением, определять надежность работы изоляционных устройств в различных условиях эксплуатации.

В качестве примера рассмотрим определение вероятности пробоя воздушного промежутка, если известна его кривая эффекта $F(U)$ и задана функция $\varphi(U)$ распределения амплитуд воздействующих напряжений, например при испытаниях (рис. 1.19).

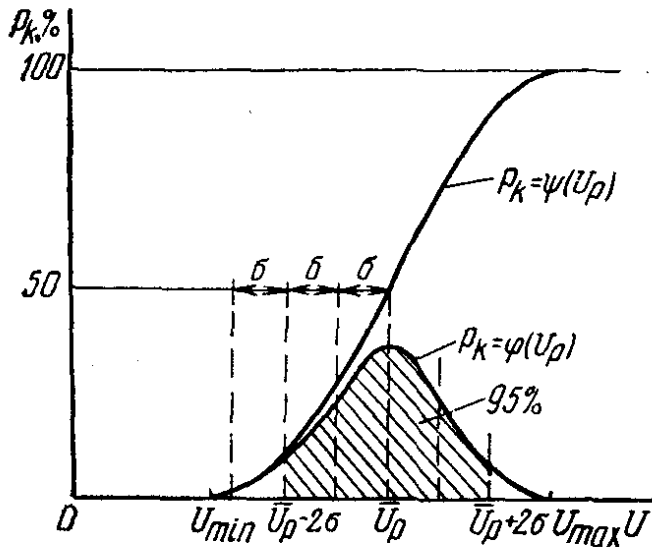


Рис. 1.18. Дифференциальная $\varphi(U)$ и интегральная $\psi(U)$ кривые распределения напряжений

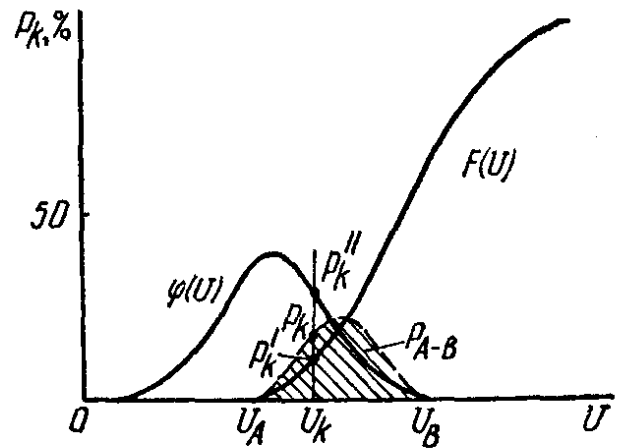


Рис. 1.19. Определение вероятности пробоя промежутка.

Пробой промежутка, очевидно, возможен в пределах напряжений от U_A до U_B . При напряжении U_k вероятность пробоя по кривой эффекта равна P'_k , а вероятность появления такого напряжения — P''_k . Следовательно, из P''_k возможных значений пробивного напряжения U_k только часть их, равная P'_k , завершится разрядом. Таким образом, вероятность пробоя P_k при напряжении U_k будет равна $P_k = P'_k P''_k$.

Полную вероятность в промежутке получим, просуммировав такие произведения для всего диапазона напряжения от U_A до U_B :

$$P_{A-B} = \sum_A^B P'_k P''_k.$$

Переходя к бесконечно малым интервалам, получим

$$P_{A-B} = \int_A^B \varphi(U) F(U) dU,$$

т. е. вероятность пробоя выразится площадью, ограниченной осью абсцисс и огибающей P_{A-B} , каждая из ординат которой представляет произведение $P'_k P''_k$ для соответствующих напряжений.

1.4. РАЗРЯДЫ В ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКАХ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ

1.4.1. Время разряда и его составляющие

До сих пор при рассмотрении развития разряда мы не принимали во внимание длительности действия приложенного напряжения. Это объясняется тем, что время действия напряжения подразумевалось достаточно большим по сравнению с тем, которое необходимо для завершения разряда.

На практике на изоляцию часто воздействуют напряжения чрезвычайно малой длительности. Такие импульсы напряжения возникают, например, в результате ударов молнии непосредственно в электротехнические установки или поблизости от них, и поэтому их называют **грозовыми импульсами**. Участок импульса, на котором напряжение возрастает, называют **фронтом**, а участок, где происходит снижение напряжения, — **спадом** импульса.

Предположим, что импульс напряжения приложен к воздушному промежутку, для которого U_0 — напряжение возникновения самостоятельного разряда (рис. 1.20). Очевидно, что до точки 1, когда $U < U_0$, разряд в промежутке принципиально не может начаться. В точке 1 разряд, как правило, также не начинается, так как для его возникновения нужно, чтобы в промежутке был хотя бы один эффективный электрон (т. е. электрон, способный образовать лавину). Процесс образования свободных электронов в промежутке носит случайный, статистический характер, поэтому время появления первого эффективного электрона t_c носит название **статистического времени запаздывания**. Разряд поэтому начинается в точке 2 и за-

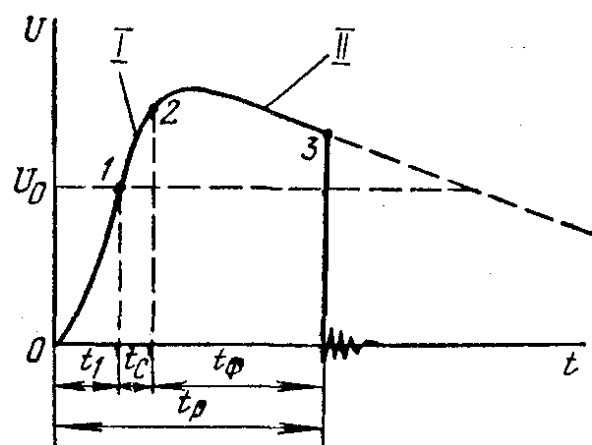


Рис. 1.20. Составляющие времени разряда:

I — фронт импульса; II — спад импульса.

канчивается в точке 3 через некоторое время t_ϕ , в течение которого происходит формирование разряда.

Таким образом, полное время разряда t_p состоит из трех слагаемых: $t_p = t_1 + t_c + t_\phi$, причем сумму $t_3 = t_c + t_\phi$ часто называют **временем запаздывания разряда**.

Среднее статистическое время запаздывания зависит от характера поля, материала катода, величины приложенного напряжения и интенсивности внешнего ионизатора. Оно снижается при уменьшении работы выхода электронов с поверхности

электрода, увеличении напряжения и расстояния между электродами, а также при увеличении интенсивности внешнего ионизатора.

В резконеоднородных полях статистическое время запаздывания невелико и зависит от указанных факторов в меньшей степени, чем в однородных и слабонеоднородных полях. Это объясняется тем, что образование эффективных электронов в резконеоднородных

полях происходит в основном за счет высоких напряженностей вблизи электродов с малым радиусом кривизны еще до того, как напряжение делается равным U_0 .

Электрический разряд, как указывалось ранее, проходит три основные стадии: 1) пробег начальной лавины пути x_k ; 2) распространение стримера на всю длину искрового промежутка; 3) развитие главного разряда.

Время развития главного разряда пренебрежимо мало по сравнению с первыми двумя стадиями, поэтому можно считать, что время формирования разряда t_f определяется длительностью лавинной и стримерной стадий.

При увеличении приложенного напряжения скорости стримеров, так же как и скорости лавины, возрастают. Поэтому время формирования разряда t_f в любых полях при увеличении приложенного напряжения будет уменьшаться.

1.4.2. Вольт-секундные характеристики изоляции

Так как обе составляющие времени запаздывания разряда зависят от напряжения, то и время разряда при разных приложенных напряжениях будет различным. Зависимость среднего времени разряда от амплитуды приложенного напряжения называют вольт-секундной ($u-t$) характеристикой искрового промежутка (или изоляции).

Так как время разряда зависит также и от формы приложенного напряжения, то при экспериментальном определении $u-t$ -характеристик применяют импульс стандартной формы, т. е. импульс с определенными значениями длины фронта T_f и длины импульса T_{II} . Стандартный грозовой импульс соответствует по форме атмосферным перенапряжениям, наиболее часто воздействующим на изоляцию в эксплуатации.

Получаемые в лабораториях импульсы напряжений имеют обычно пологий начальный участок, не оказывающий существенного влияния на развитие разряда, но затрудняющий отсчет по оси времени при расшифровке осциллограмм. Поэтому действительный фронт волны заменяют эквивалентным косоугольным (рис. 1.21), для чего на фронте отмечают точки 1 и 2 с ординатами $0,3$ и $0,9 U_{max}$ и проводят через них прямую. Пересечение этой прямой с осью абсцисс и с горизонталью, проведенной на уровне амплитуды (точки 3 и 4), определяет длину фронта импульса T_f . Длина импульса T_{II} отсчитывается от точки 3 до точки 5, в которой напряжение импульса уменьшается до

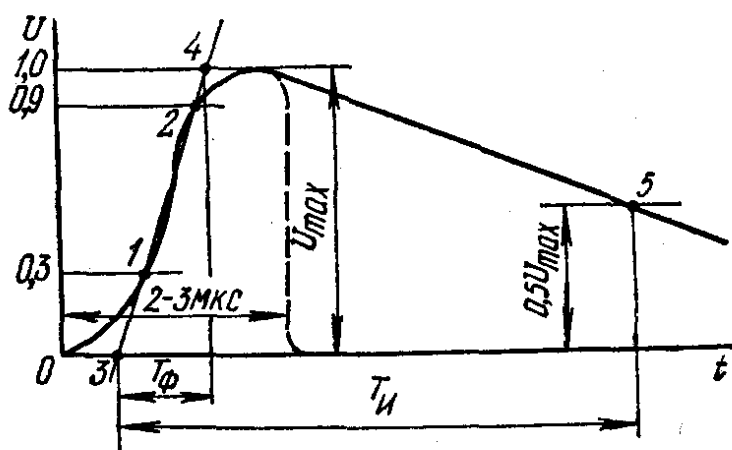


Рис. 1.21. Определение длины фронта и длины волны стандартного импульса.

$0,5 U_{\max}$ (вероятность разряда при напряжениях меньше $0,5$ ничтожно мала).

В Советском Союзе в настоящее время применяется стандартный грозовой импульс, имеющий в соответствии с рекомендациями Международной электротехнической комиссии (МЭК) длину фронта $1,2 \text{ мкс} \pm 30 \%$ и длину импульса $50 \text{ мкс} \pm 20 \%$ (сокращенное обозначение $1,2/50$). Иногда при испытаниях изоляции вместо полного импульса или полной волны применяют срезанную волну длительностью $2\text{—}3 \text{ мкс}$ (см. рис. 1.21).

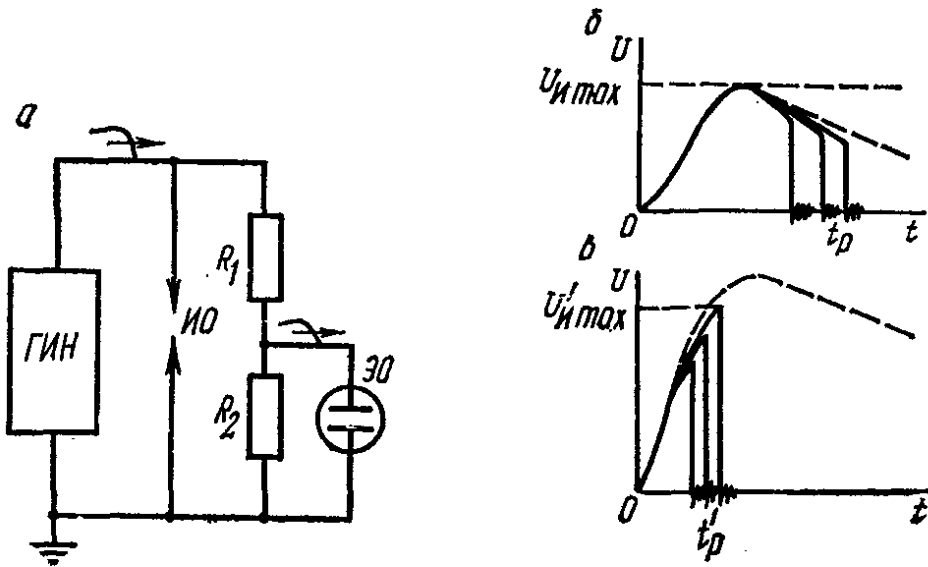


Рис. 1.22. Построение вольт-секундных характеристик.

Экспериментальное построение вольт-секундных характеристик производится по схеме рис. 1.22, а. Источником стандартных импульсов является генератор импульсных напряжений ГИН, напряжение на испытуемом объекте ИО регистрируется с помощью электронного осциллографа ЭО, включенного через омический делитель напряжения $R_1 - R_2$.

Построение $u - t$ -характеристик начинается с малых разрядных напряжений, при этом для каждого напряжения снимается не менее 5 осциллограмм, с тем чтобы определить весь возможный интервал разброса времени разряда. При малых напряжениях разряд возникает на спаде импульса (рис. 1.22, б), при больших — на фронте (рис. 1.22, в). На рис. 1.22, б и в отмечены даваемые осциллограммами точки для построения $u - t$ -характеристик. Совокупность полученных точек образует некоторую область, показанную на рис. 1.23 пунктирными линиями. **Вольт-секундной характеристикой** обычно называют кривую, проходящую через середину этой области, с обязательным указанием пределов отклонения от этой средней кривой.

В резконеоднородных полях время разряда сильно зависит от приложенного напряжения, поэтому $u - t$ -характеристика в этом случае будет довольно круто загигаться вверх при сравнительно большом разрядном времени (порядка нескольких микросекунд, рис. 1.23, кривая 1).

В однородных и слабонеоднородных полях $u-t$ -характеристика более пологая (кривая 2, рис. 1.23), резкий подъем ее наблюдается при малом разрядном времени (порядка 1 мкс и менее). Это объясняется тем, что в таких полях время разряда определяется в основном статистическим запаздыванием, а при увеличении напряжения оно резко сокращается.

Вольт-секундные характеристики имеют большое значение для координации изоляции. Например, для защиты изоляции электрооборудования от волн перенапряжений параллельно ей включают разрядник или искровой промежуток. Очевидно, что $u-t$ -характеристика разрядника всеми своими точками должна быть расположена ниже $u-t$ -характеристики защищаемой изоляции. Если же характеристика разрядника будет пересекаться с характеристикой изоляции (кривая 3, рис. 1.23), то при некоторых амплитудах импульса U изоляция будет повреждена раньше, чем сработает разрядник.

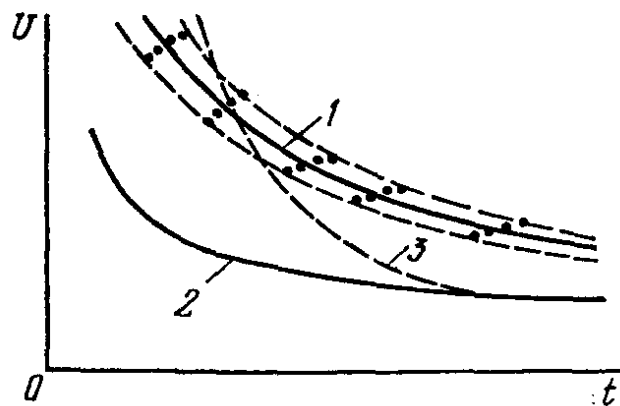


Рис. 1.23. Вольт-секундные характеристики промежутков.

Упрощенное построение вольт-секундных характеристик может быть выполнено по уравнению $u-t$ -характеристики:

$$U_t = A \sqrt{1 + \frac{T}{t_p}}$$

Постоянные A и T находятся экспериментально для данного промежутка путем определения двух точек $u-t$ -характеристики. Затем, задаваясь значениями времени разряда t_p , вычисляют соответствующие амплитуды напряжения U_t и строят всю характеристику.

Построение полных вольт-секундных характеристик, особенно экспериментальное, довольно трудоемко, поэтому вместо них часто пользуются двумя характерными величинами.

Одна из них называется 50%-ным разрядным напряжением ($U_{50\%}$ или $U_{0,5}$) и представляет амплитуду такой импульсной волны, при многократном воздействии которой разряд наступает в 50% всех случаев приложения напряжения. Это напряжение не намного превышает минимальное импульсное разрядное напряжение и соответствует горизонтальному участку $u-t$ -характеристики и времени разряда порядка 6—10 мкс. Отношение 50%-ного разрядного напряжения к амплитуде разрядного напряжения U_0 при длительном воздействии (например, при 50 Гц) $k_{и}$ называется коэффициентом импульса: $k_{и} = U_{0,5}/U_{0 \max}$. Для однородных полей $k_{и} \approx 1$, для неоднородных $k_{и} > 1$.

Второй характерной величиной является разрядное напряжение при времени разряда 2—3 мкс — $U_{2 \text{ мкс}}$.

1.4.3. Разрядные напряжения промежутков по опытным данным

Ранее было отмечено, что пробивные напряжения промежутков снижаются по мере увеличения степени неоднородности поля. Поэтому для приближенной оценки ожидаемых пробивных напряжений в ряде случаев пользуются результатами, полученными для электродов стержень — стержень и стержень — плоскость.

Разрядные напряжения электродов стержень — плоскость и стержень — стержень являются наименьшими по сравнению с электродами иной формы. Поэтому на практике разрядные напряжения таких симметричных электродов, как кольцо — кольцо, провод — стержень, оцениваются приближенно величиной разрядных напряжений для электродов стержень — стержень, а разрядные напряжения несимметричных электродов (шар — плоскость, кольцо — плоскость, провод — плоскость) — разрядными напряжениями электродов стержень — плоскость.

Определение пробивных напряжений промежутков при напряжении промышленной частоты производится при медленном подъеме напряжения — нормированная скорость составляет 3 % ожидаемого пробивного напряжения. Вследствие малой скорости

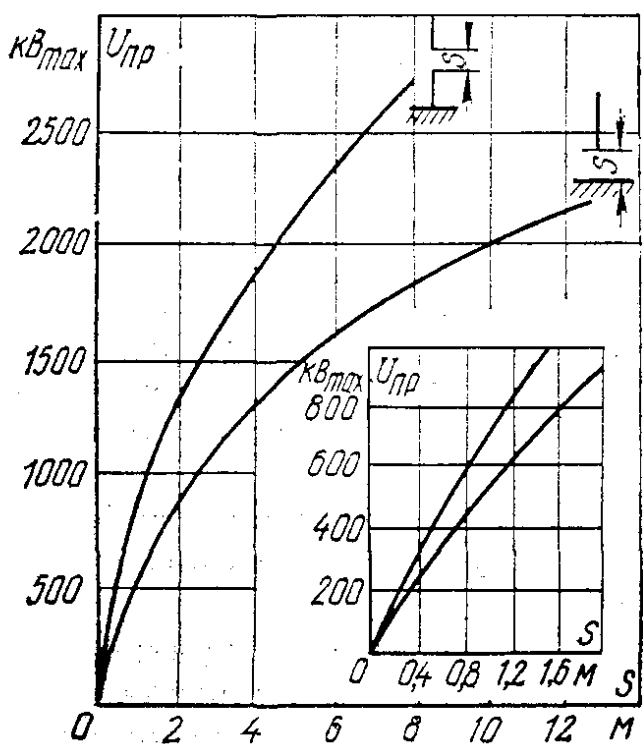


Рис. 1.24. Пробивные напряжения стержневых электродов при напряжении промышленной частоты.

возрастания напряжения весьма вероятным оказывается неблагоприятное сочетание случайных факторов, влияющих на пробивные напряжения. Поэтому условия испытаний эквивалентны испытаниям при длительном воздействии напряжения. Разброс опытных точек при этом незначителен (σ не превышает 1,5—2 %). Из рис. 1.24, на котором представлены пробивные напряжения промежутков стержень — стержень и стержень — плоскость, видно, что при расстояниях до 1 м их пробивные напряжения отличаются незначительно и только при больших расстояниях кривые резко расходятся. Это свидетельствует о том, что симметрия поля электродов оказывает более существенное влияние в

длинных промежутках. Следует отметить, что разрядные напряжения промежутка стержень — стержень, приведенные на рис. 1.24, получены при длине нижнего стержня $l_H > 3S$, когда влияние земли было незначительным. Опыты показали, что при уменьшении длины нижнего стержня, когда влияние земли сказывается все сильнее и поле электродов стержень — стержень приближается к полю стерж-

жень — плоскость, разрядные напряжения промежутка снижаются и могут иметь любое значение в области, ограниченной проведенными кривыми. Следовательно, для получения достоверных разрядных напряжений длинных промежутков при проведении опытов необходимо тщательно воспроизводить реальное поле промежутка. Например, при определении разрядных напряжений между проводом и траверсой или стойкой опоры нужно воспроизвести макет опоры с натуральными размерами траверсы и стойки, а также высоты траверсы над землей.

Пробивные напряжения промежутков стержень — плоскость при их длине до 2 м, переменном напряжении и положительной полярности постоянного напряжения практически одинаковы.

Особенности развития разряда при кратковременном воздействии напряжения наиболее наглядно могут быть показаны на примере электродов стержень — стержень и особенно стержень — плоскость, обладающих наибольшей неоднородностью поля. Кривые на рис. 1.25 показывают, что при импульсных напряжениях также имеет место эффект полярности, но проявляется он в меньшей степени, чем при длительном воздействии напряжения. При увеличении длины фронта импульса (рис. 1.26) пробивные напряжения снижаются (кривая 3). Исследования показали, что напря-

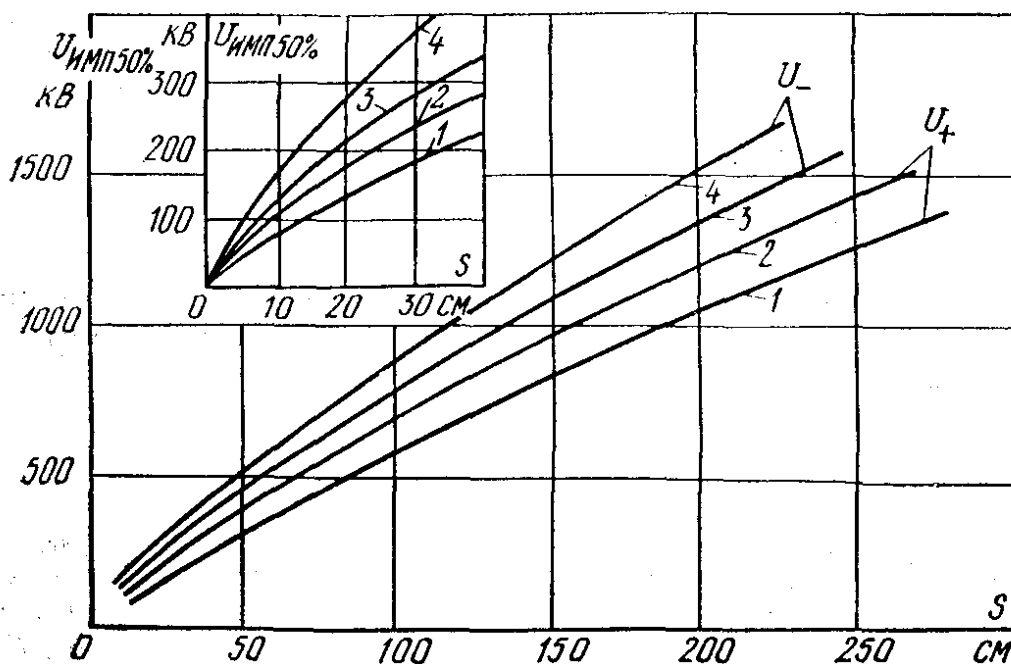


Рис. 1.25. Разрядные напряжения при импульсах 1,2/50 электродов стержень — плоскость (кривые 1 и 4) и стержень — стержень (кривые 2 и 3).

жение $U_{0,5}$ достигает минимума при некоторой критической длине фронта $T_{кр}$, а затем по мере увеличения $T_{ф}$ медленно нарастает, приближаясь к пробивным напряжениям при постоянном напряжении. Критическая длина фронта увеличивается пропорционально длине разрядного промежутка, например при $S=2$ м $T_{кр}=100$ мкс, а при $S \geq 20$ м $T_{кр}$ приближается к 1000 мкс.

При воздействии импульсных напряжений вследствие физических особенностей развития разряда наблюдается значительный

разброс пробивных напряжений. На практике часто встречаются случаи, когда импульсные напряжения воздействуют одновременно на большое число **параллельно включенных промежутков**. Например, количество гирлянд изоляторов ВЛ, подвергающихся одновременно воздействию перенапряжений, может составлять сотни и даже тысячи.

Будем считать для простоты, что кривая эффекта $P_{\text{пр}}^1(U)$ каждого промежутка одинакова (кривая 1, рис. 1.27). Тогда вероят-

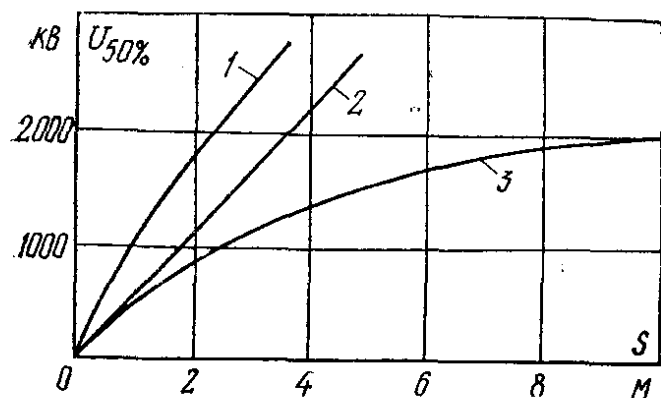


Рис. 1.26. Пробивные напряжения промежутков стержень — плоскость при кратковременном воздействии напряжения:

1, 2 — $T_{\Phi}=1,2$; 3 — $T_{\Phi}=2500$ (1 — отрицательная полярность; 2, 3 — положительная полярность импульса).

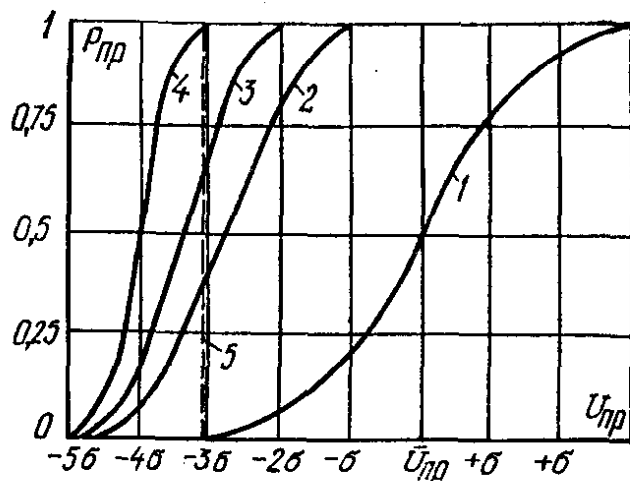


Рис. 1.27. Влияние числа параллельно включенных промежутков на ход кривой эффекта.

ность разряда хотя бы в одном из n промежутков, включенных параллельно, может быть определена, согласно теории вероятностей, по выражению

$$P_{\text{пр}}^n(U) = 1 - [1 - P_{\text{пр}}^1(U)]^n. \quad (1.21)$$

Например, при $P_{\text{пр}}^1(U) = 0,05$ и $n = 200$ получим $P_{\text{пр}}^{200}(U) = 1 - (1 - 0,05)^{200} = 1 - 0,95^{200} \approx 1$. Следовательно, хотя вероятность пробоя одного промежутка и мала (всего 5%), в системе из большого числа промежутков вероятность пробоя равна практически 100%.

Из формулы (1.21) следует, что при увеличении n кривые эффекта сдвигаются влево. Если считать, что кривая $P_{\text{пр}}^1(U)$ подчиняется нормальному закону распределения при любых напряжениях, то для n , равных 100, 1000 и 10 000, получим соответствующие кривые 2, 3 и 4 (рис. 1.27), сдвинутые в область очень малых напряжений. Однако опытные данные свидетельствуют, что при отклонении напряжений от $U_{\text{пр}}$ более чем на $\pm 3\sigma$ нормальное распределение напряжения нарушается, и при $U < \bar{U}_{\text{пр}} - 3\sigma$ вероятность пробоя равна практически нулю, т. е. $P_{\text{пр}}^1(U) = 0$. В этих условиях будет также равно нулю и $P_{\text{пр}}^n(U)$, т. е. при $n \rightarrow \infty$ кривая эффекта

будет иметь вид вертикальной прямой, проходящей на оси абсцисс через точку $\bar{U}_{\text{пр}} - 3\sigma$ (кривая 5, рис. 1.27), и представляет нижний предел пробивного напряжения.

Аналогичное явление снижения пробивных напряжений наблюдается и при пробое изоляции, имеющей большую площадь электродов и, следовательно, большое число участков с пониженным пробивным напряжением (например, конденсаторов с бумажной изоляцией).

Пробивные напряжения в воздухе зависят от его относительной плотности (см. п. 1.3.1) и влажности. Увеличение влажности воздуха вызывает повышение пробивных напряжений. Это объясняется тем, что пары воды электроотрицательны и при увеличении их содержания в воздухе происходит захват все большего количества электронов с образованием отрицательных ионов, в результате чего число ионизирующих частиц в промежутке уменьшается и пробивные напряжения возрастают.

Так как все опытные данные по пробивным напряжениям промежутков относятся к нормальной плотности и влажности (11 г паров воды в 1 м³ воздуха), то пробивные напряжения $U_{\text{пр}}$ при условиях, отличающихся от нормальных, можно определить по формуле

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{пр.н}} \delta / k, \quad (1.22)$$

где $U_{\text{пр.н}}$ — пробивное напряжение при нормальных условиях; k — поправочный коэффициент на влажность.

Влияние влажности возрастает с увеличением степени неоднородности поля и длительности действия напряжения. Для однородных полей оно настолько мало, что его не учитывают, и $k \approx 1$. Для неоднородных полей коэффициент k лежит в пределах 0,8—1,2 в зависимости от степени неоднородности поля, рода напряжения и влажности (для нормальной влажности $k = 1$). Определяется коэффициент k по графикам.

Пробивные напряжения в газах зависят также от частоты. При увеличении частоты от 50 до 10^4 — 10^5 Гц они остаются без изменений, затем постепенно уменьшаются и при 10^6 — 10^7 Гц достигают минимального значения (на 15—20 % ниже пробивных напряжений при промышленной частоте). Снижение $U_{\text{пр}}$ при увеличении частоты объясняется влиянием положительных зарядов, которые остаются в промежутке после первого полупериода и увеличивают напряженность поля в следующий полупериод. При увеличении частоты свыше 10^6 — 10^7 Гц пробивные напряжения начинают возрастать и при некоторой частоте могут даже стать выше пробивных напряжений при 50 Гц. Это увеличение $U_{\text{пр}}$ объясняется тем, что при очень высоких частотах время действия напряжения за полупериод становится соизмеримым со временем разряда и для его завершения необходимо увеличивать напряжение (как при импульсных напряжениях).

1.5. КОРОННЫЙ РАЗРЯД НА ПРОВОДАХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

1.5.1. Общие сведения

Как уже отмечалось, корона представляет лавинно-стримерную форму устойчивого разряда, характерную для резконеоднородных полей. В таких полях при выполнении условия самостоятельности разряда возникающие стримеры не могут перекрыть все пространство между электродами, и ионизация ограничивается небольшой областью вблизи электрода с малым радиусом кривизны (чехлом короны).

Коронный разряд сопровождается свечением в виде ореола, охватывающего коронирующий электрод (отсюда и название «корона»), потерями электрической энергии, электромагнитными высокочастотными колебаниями и их излучением, рядом химических реакций, в частности образованием озона и окислов азота, а также акустическим шумом и механическими вибрациями.

Физическую природу короны изучают обычно в промежутке игла — плоскость, в котором ионизация происходит в очень небольшом объеме около кончика иглы, где напряженность поля наибольшая. Измерение тока короны в этом промежутке показывает, что

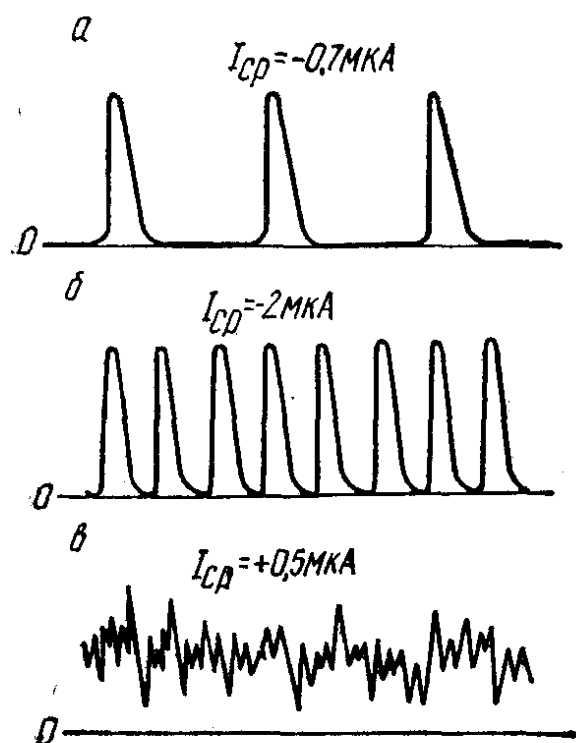


Рис. 1.28. Ток короны в промежутке игла — плоскость.

при отрицательной полярности (рис. 1.28, а) ток короны имеет форму коротких (10^{-2} — 10^{-3} мкс), регулярно повторяющихся импульсов с амплитудой 6—8 мкА. При повышении напряжения число импульсов возрастает (увеличивается среднее значение тока), но их амплитуда и форма не меняются (рис. 1.28, б). При положительной полярности (рис. 1.28, в) импульсы развиваются хаотически и часто накладываются друг на друга.

При значительных размерах электрода (например, провод) корона возникает одновременно в большом количестве точек и отдельные импульсы сливаются, создавая непрерывный суммарный ток. При увеличении напряжения короной

охватывается все бóльшая часть провода и ток короны окончательно теряет свой прерывистый характер.

Наибольший практический интерес представляет корона на проводах линий электропередачи, так как при этом могут иметь место большие потери электрической энергии и значительные помехи из-за излучения электромагнитных колебаний.

1.5.2. Корона на проводах при постоянном напряжении

При постоянном напряжении корона имеет стационарный характер. В случае положительной полярности провода возникающие в области ионизации электроны уходят на него, а положительные ионы образуют объемный заряд, перемещающийся постепенно к катоду. При отрицательной полярности провода электроны выносятся из области ионизации и образуют отрицательные ионы, медленно перемещающиеся к аноду, положительные ионы уходят на провод.

В обоих случаях между электродами возникает стационарный поток ионов, который обуславливает постоянный коронный ток конвекции I_K , а объемный заряд около провода одноименного с ним знака снижает напряженность поля и тем самым несколько повышает напряжение возникновения короны.

На рис. 1.29, а показаны два провода, разделенных заземленной проводящей плоскостью. В этом случае в обеих половинах поля коронный разряд развивается самостоятельно и в каждой системе будет объемный заряд только одного знака (униполярный); такую корону называют **униполярной**.

Если корона развивается в системе двух проводов, находящихся под напряжением противоположной полярности (рис. 1.29, б), то ионы обоих знаков могут проникать в область

другой полярности, где они частично рекомбинируют, а частично достигают другого электрода. Поэтому около каждого электрода будут различные по знаку (биполярные) заряды, и такую корону называют **биполярной**. Возникающий около провода заряд противоположного знака несколько усиливает напряженность поля и ионизацию, вследствие чего коронный ток также возрастает; одновременно вблизи провода происходит непрерывная рекомбинация.

Очевидно, что ток биполярной короны (кривая 2) с напряжением $2U$ будет превосходить сумму токов (кривая 3) двух униполярных корон (кривая 1) с напряжением U (рис. 1.29, в).

Начальная (критическая) напряженность поля E_0 , при которой корона приобретает форму самостоятельного разряда, практически не зависит от полярности электродов и для двух проводов радиусом r , находящихся на расстоянии $S \gg r$ друг от друга (или для провода, подвешенного над плоскостью на высоте $h = S/2$), может быть вычислена по формуле

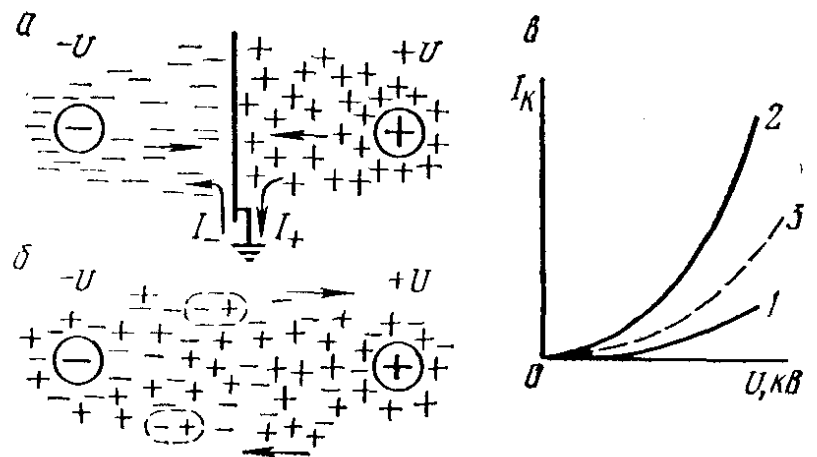


Рис. 1.29. Корона при постоянном напряжении.

$$E_0 = 24,5\delta \left[1 + \frac{0,65}{(r\delta)^{0,38}} \right] \text{ кВ}_{\text{max}}/\text{см},$$

а соответствующее напряжение

$$U_0 = E_0 r \ln S / r \text{ кВ}_{\text{max}}. \quad (1.23)$$

Хорошие результаты получаются также при вычислении E_0 по формуле Пика, особенно при небольших радиусах провода ($r \leq 1$ см):

$$E_0 = 30,3\delta \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{r\delta}} \right) \text{ кВ}_{\text{max}}/\text{см}.$$

Прохождение тока между проводами при коронировании сопровождается потерями энергии, которые могут достигать значительных величин, а это существенно ухудшает экономические показатели линии электропередачи.

Мощность потерь на корону при напряжении постоянного тока зависит от среднего тока $I_{\text{ср}}$ короны, который приближенно можно записать в виде выражения

$$I_{\text{ср}} = AU(U - U_0), \quad (1.24)$$

где A — коэффициент, зависящий от расположения и размеров проводов, а также от коэффициентов подвижности и рекомбинации ионов.

Выражение (1.24) дает результаты, хорошо совпадающие с опытными данными в случае так называемой общей короны, когда коронирование охватывает в основном весь провод. Это имеет место при напряжениях U , близких к начальным, которые определяются по формуле (1.23). При меньших напряжениях, когда корона возникает на отдельных участках провода с наиболее крупными неровностями (местная корона), экспериментальные данные значительно отличаются от выражения (1.24). Таким образом, при общей короне

$$\Delta P = I_{\text{ср}} U = AU^2 (U - U_0),$$

т. е. потери энергии будут очень быстро расти по мере увеличения напряжения. Потери энергии на корону также резко возрастают в случаях, когда на поверхности провода оседают капли дождя или кристаллы льда, создающие дополнительные области повышенной напряженности поля.

1.5.3. Корона на проводах при переменном напряжении

При переменном напряжении объемные заряды короны вначале отталкиваются силами поля от провода и перемещаются в направлении от него, затем, при изменении полярности провода в следующий полупериод, притягиваются к нему. Наибольшее удаление x объемного заряда от провода зависит от напряженности

поля E и периода T переменного тока и может быть вычислено по формуле

$$x \approx \sqrt{b_{и} E_{\max} r T},$$

где $b_{и}$ — подвижность ионов, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; E_{\max} — напряженность на поверхности провода, $\text{В}/\text{см}$.

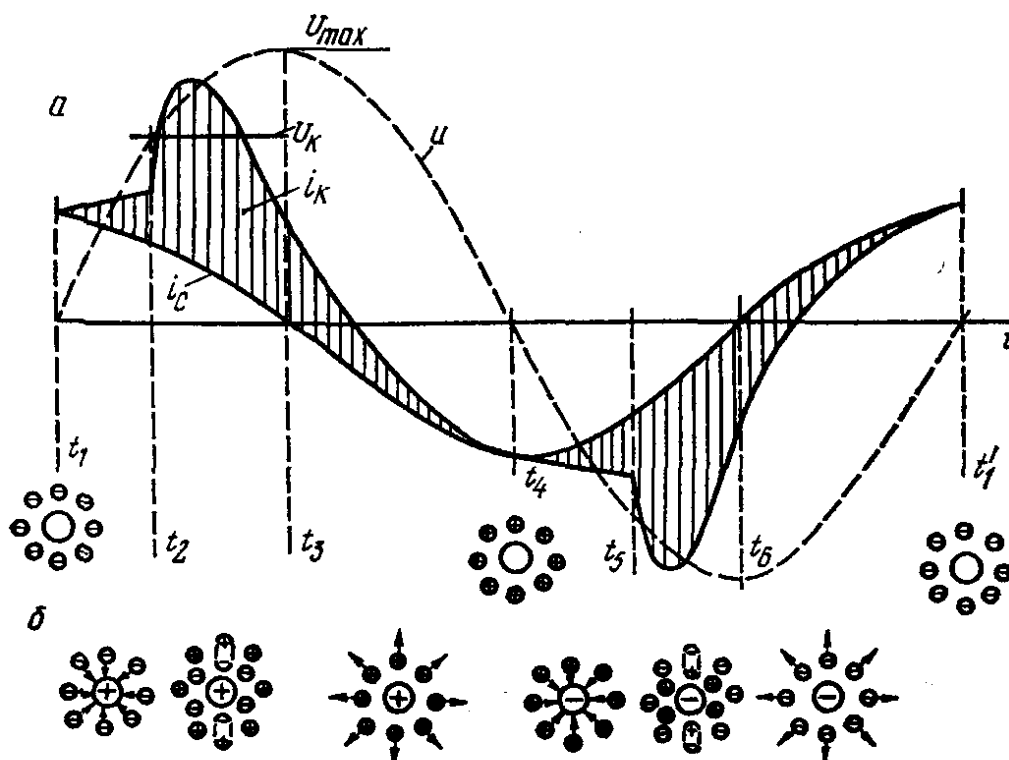


Рис. 1.30. Корона на проводе при переменном напряжении:
 а — изменение напряжения и тока короны; б — изменение зарядов чехла короны.

При радиусе проводов $r=1,25$ см (ВЛ 220), частоте напряжения $f=50$ Гц и подвижности $b_{и}=1,8$ $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ получим по формуле Пика при $\delta \approx 1$:

$$E_{\max} = 30,3 \cdot 1 \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{1,25 \cdot 1}} \right) \approx 38 \text{ кВ}/\text{см};$$

$$x = \sqrt{1,8 \cdot 38 \cdot 10^3 \cdot 1,25 \cdot 0,02} \approx 40 \text{ см},$$

что значительно меньше расстояний между проводами ВЛ высокого напряжения (для 220 кВ $S=6-7$ м).

Таким образом, объемные заряды за время полупериода не успевают удалиться от провода на значительное расстояние и в следующий полупериод возвращаются к проводу, т. е. корона на проводах ВЛ переменного тока является униполярной, и в трехфазной системе можно ограничиться рассмотрением коронирования одного провода.

На рис. 1.30 показаны кривые напряжения и тока коронирующего провода, а также стадии ионизации, соответствующие отдельным моментам времени (коронный разряд показан стилчзованно в виде зарядов, охватывающих провод).

При отсутствии короны ток i_c , стекающий с провода, является чисто емкостным, опережающим напряжение на 90° . Ток короны i_k , обусловленный перемещением объемных зарядов, накладывается на ток i_c . Рассмотрение начнем с момента t_1 , когда напряжение провода равно нулю. На участке t_1-t_2 отрицательный объемный заряд, оставшийся от предыдущего полупериода, под действием потенциала провода будет перемещаться к проводу, создавая положительный ток i_k (положительным направлением тока i_k принято считать направление движения положительных зарядов от провода).

В некоторый момент t_2 напряженность на поверхности провода достигает критической (при напряжении $U < U_k$ за счет влияния поля приблизившихся к проводу отрицательных зарядов), и начинается коронный разряд положительной полярности.

Возникающие в результате ионизации электроны уходят на провод, а положительные ионы нейтрализуют остатки отрицательного объемного заряда и создают затем положительный объемный заряд, который продолжает расти до момента t_3 (максимум напряжения).

После прохождения напряжения через максимум (момент t_3) ионизация прекращается при $U < U_k$ и ток короны поддерживается за счет движения от провода оставшихся положительных зарядов. В момент t_4 , когда напряжение достигает нуля, этот ток прекращается и провод оказывается окруженным чехлом положительных зарядов.

При отрицательной полярности напряжения процесс протекает аналогично. На участке t_4-t_5 положительные заряды движутся к проводу, после возникновения отрицательной короны в момент t_5 (так же, как и в момент t_2 , при $U < U_k$ — за счет влияния положительных зарядов) на участке t_5-t_6 наблюдается скачок тока вследствие нейтрализации остатков положительного заряда и образования отрицательного объемного заряда.

После момента t_6 ток поддерживается движением положительных зарядов к проводу и отрицательных от провода. К моменту t весь положительный заряд уходит на провод, и последний оказывается окруженным отрицательным объемным зарядом, как и предполагалось в начале рассмотрения процесса (момент t_1).

Ток короны i_k можно разложить на гармоники, выделив активную составляющую тока короны $i_{a,k}$, совпадающую с напряжением, составляющую $i_{c,k}$, совпадающую с емкостным током i_c , а также высшие гармонические. Наличие указанных гармоник говорит о том, что коронирование сопровождается потерями энергии, увеличением емкости проводов и появлением в системе высших гармонических.

Кривая тока короны на рис. 1.30 представлена в виде плавной кривой, на самом деле на кривую накладывается большое число импульсов тока, частота повторения которых может лежать в диапазоне от 10^5 до 10^8 Гц.

1.5.4. Потери на корону при переменном напряжении

Потери энергии на корону при переменном напряжении вызваны тем, что при коронировании источнику возвращается только часть энергии, затраченной им на создание электрического поля, а энергия, связанная с объемными зарядами и равная приблизительно $(U_{\max} - U_k) Q_{об}/2$, теряется безвозвратно. Следовательно, потери энергии при переменном напряжении связаны с непрерывной перезарядкой чехла короны, идут на увеличение скорости молекул, с которыми сталкиваются ионы, т. е. на нагревание воздуха, а также связаны с другими явлениями, сопровождающими корону.

На основании экспериментального изучения потерь на корону американский инженер Пик предложил эмпирическую формулу мощности потерь на корону:

$$P_k = (241/\delta) (f + 25) \sqrt{r/S} (U_\phi - U_0)^2 10^{-5} \text{ кВт/(км} \cdot \text{фаза)}, \quad (1.25)$$

где r , S — радиус провода и среднегеометрическое расстояние между проводами, см; U_ϕ — действующее значение фазового напряжения, кВ; U_0 — напряжение возникновения потерь на корону:

$$U_0 = 21,2\delta m_1 m_2 r \ln S/r. \quad (1.26)$$

Коэффициенты m_1 и m_2 , входящие в формулу (1.26), характеризуют состояние поверхности провода (m_1) и погоды (m_2). Для идеально гладкого провода $m_1 = 1$, для реальных проводов ВЛ, состоящих из отдельных проволочек и имеющих поэтому волнистую и шероховатую поверхность, коэффициент m_1 уменьшается до 0,8—0,9, что свидетельствует о наличии на проводах участков с повышенной напряженностью поля и повышенными потерями.

Потери на корону сильно зависят от атмосферных условий. Они вырастают при наличии дождя или тумана, когда на поверхности провода образуются длительно существующие капельки воды, которые представляют как бы выступы на поверхности провода и на которых напряженность поля возрастает. Поэтому для хорошей погоды $m_2 = 1$, а для плохой (дождь, туман) $m_2 = 0,8$.

В настоящее время формула Пика, так же как и ряд других аналогичных формул (Залесского, Майера, Петерсена), для определения потерь не применяется. Это объясняется тем, что они не могут учесть всего многообразия погодных условий и поэтому дают результаты, значительно отличающиеся от наблюдаемых на реальных линиях, особенно при напряжениях 330 кВ и выше. Однако эти формулы удобны для оценки влияния отдельных факторов на величину потерь и, следовательно, показывают пути снижения этих потерь.

Согласно формулам (1.25) и (1.26), наибольшее влияние на потери оказывает радиус провода r , при увеличении которого возрастает напряжение U_0 . Влияние расстояния S на величину U_0 значительно меньше, тем более, что отношение S/r для ВЛ высокового напряжения остается практически постоянным.

В настоящее время выбор проводов ВЛ производят из условия, чтобы в хорошую погоду ($m_2=1$) потери на корону были близки к нулю. Исходя из этого, определим минимальные диаметры проводов для ВЛ различного напряжения. Учитывая, что для ВЛ $\ln S/r \approx 6,5$, и приняв $\delta=1$ и $m_1=0,8$, условие отсутствия потерь запишем в виде $U_\phi = U_0$ или $U_\phi = U_\pi / \sqrt{3} = 21,2 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 6,5r$.

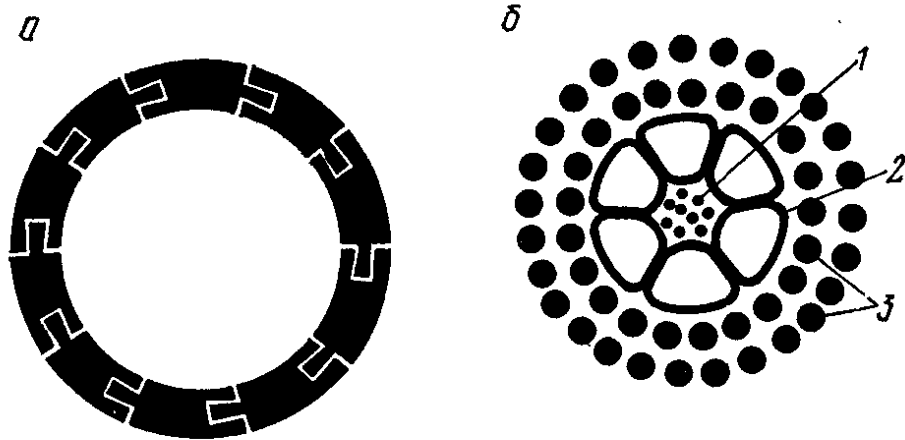


Рис. 1.31. Полный (а) и расширенный (б) провода:
1 — стальные проволочки сердечника; 2 — секторные алюминиевые трубки; 3 — алюминиевые проволочки.

Напряжение линии во время эксплуатации может превышать номинальное на 10 % ($U_\pi = 1,1 U_n$), тогда для минимального диаметра провода $d_{\min} = 2r$ получим $d_{\min} \approx 1,15 \cdot 10^{-2} U_n$ см. Для ВЛ напряжением 110, 220, 500 и 750 кВ минимальные диаметры проводов составят соответственно 1,25; 2,5; 5,8 и 8,8 см. Провода указанных диаметров имеют большое активное сечение, и плотность тока нагрузки в них часто оказывается чрезвычайно низкой. Поэтому были разработаны специальные провода большого диаметра (до 60 мм), но с меньшим активным сечением — **полые и расширенные** (рис. 1.31).

Вторым решением вопроса уменьшения потерь на корону является **расщепление провода фазы** на несколько параллельных проводников. При этом вместо одного провода большого диаметра

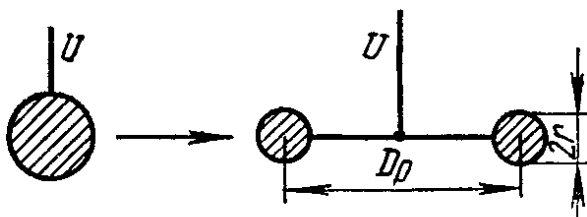


Рис. 1.32. Принцип расщепления проводов.

и часто довольно сложной конструкции применяют пучок из 2, 3 или более стандартных проводов (рис. 1.32) меньшего диаметра, но с суммарным сечением, равным сечению одинарного провода или несколько большим его.

При числе проводов в фазе более двух их обычно располагают по вершинам правильных многоугольников. Радиус описанной окружности таких многоугольников r_p называют **радиусом расщепления**.

Можно показать, что емкость расщепленных проводов

$$C = 2\pi\epsilon\epsilon_0 / \ln(S_{cp}/r_p), \quad (1.27)$$

а максимальная напряженность на их поверхности

$$E_{\max} = E_{\text{ср}} k_y = \frac{U}{r \ln \frac{S_{\text{ср}}}{\sqrt{r D_p}}}; \quad (1.28)$$

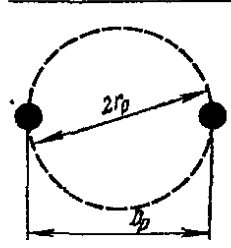
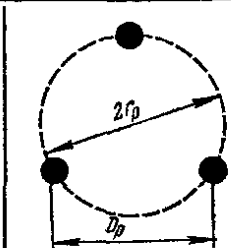
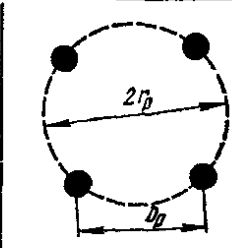
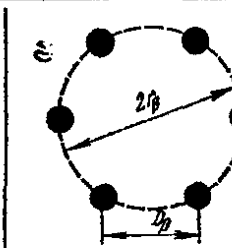
здесь r — радиус проводов расщепленной фазы; D_p — шаг (расстояние) расщепления; $r_3 = \sqrt{r D_p}$ — эквивалентный радиус расщепленного провода; $S_{\text{ср}}$ — среднее геометрическое расстояние между фазами; U — фазное напряжение; k_y — коэффициент усиления поля.

В общем случае при любом числе n проводов в фазе

$$k_y = 1 + (n-1) r/r_p. \quad (1.29)$$

В табл. 1.6 приведены значения основных параметров расщепленных проводов.

Табл. 1.6. Основные параметры некоторых видов расщепленных проводов

Характеристика провода	Эскиз расщепленного провода			
				
Число проводов в фазе n	2	3	4	6
Эквивалентный радиус r_3	$\sqrt{r D_p}$	$\sqrt[3]{r D_p^2}$	$\sqrt[4]{1,4 r D_p^3}$	$\sqrt[6]{6 r D_p^5}$
Радиус расщепления r_p	$D_p/2$	$D_p/\sqrt{3}$	$D_p/\sqrt{2}$	D_p
$k_y = E_{\max}/E_{\text{ср}}$	$1 + \frac{2r}{D_p}$	$1 + \frac{2\sqrt{3} r}{D_p}$	$1 + \frac{3\sqrt{2} r}{D_p}$	$1 + \frac{5r}{D_p}$

Выражение (1.28) для максимальной напряженности на поверхности расщепленного провода может быть записано в общем виде: $E_{\max} = E_{\text{ср}} k_y = f(D_p) \varphi(1/D_p)$, следовательно, при увеличении D_p значение E_{\max} проходит через минимум. На рис. 1.33 показано изменение E_{\max} при увеличении D_p для фазы 500 кВ, расщепленной на 3 провода АСО-480 (радиус провода $r = 1,51$ см); среднее геометрическое расстояние такой линии $S_{\text{ср}} = 1,26S = 1,26 \cdot 10,5 = 13,2$ м. Из графика видно, что наименьшее значение E_{\max} составляет 22 кВ/см, в то время как

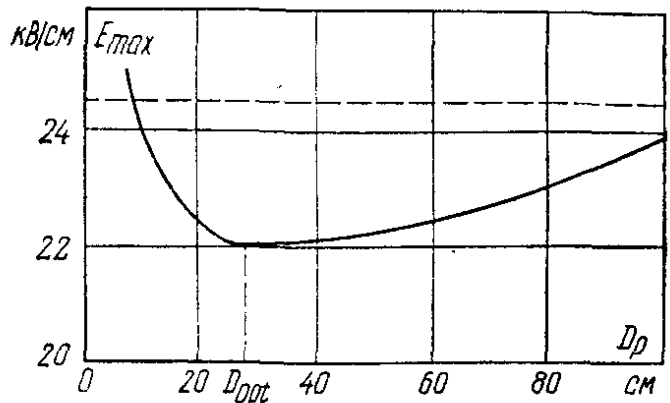


Рис. 1.33. Зависимость максимальной напряженности от шага расщепления.

напряженность на поверхности одиночного провода того же сечения $3 \cdot 480 = 1440 \text{ м}^2$ (радиус провода $r_0 = 2,7 \text{ см}$) составила бы $24,5 \text{ кВ/см}$ (пунктир на рис. 1.33).

Стремление получить на поверхности расщепленного провода наименьшее значение E_{max} обычно сочетают с желанием снизить индуктивность линии, что дает возможность увеличить ее пропускную способность. Так как индуктивность линии при увеличении шага расщепления уменьшается, то на практике применяют шаг расщепления, лежащий обычно за точкой минимума напряженности и равный $40\text{—}50 \text{ см}$.

Расщепление проводов производят обычно при напряжениях свыше 220 кВ (при 330 кВ — на два, 500 кВ — на три и 750 кВ — на четыре провода).

1.5.5. Расчет потерь энергии на корону при переменном напряжении

В настоящее время задача выбора диаметра проводов ВЛ напряжением 330 кВ и выше решается на основе отыскания наиболее экономичного соотношения между расходами, вызванными потерями на корону, и затратами на мероприятия, которые нужно осуществить для борьбы с короной (применение расщепленных или специальных проводов, изменение конструкции опор и т. п.). Правильным является решение, при котором суммарные затраты будут минимальными.

Одним из основных этапов таких расчетов является определение среднегодовых потерь на корону. Из различных методов определения среднегодовых потерь остановимся на одном, в основе которого лежит установленная на основе большого числа экспериментов линейная зависимость отношения мощности потерь к напряжению (P/U) от напряжения (рис. 1.34). Пересечение прямых P/U с осью абсцисс происходит при критических напряжениях U_k , соответствующих критическим напряжениям:

Одним из основных этапов таких расчетов является определение среднегодовых потерь на корону. Из различных методов определения среднегодовых потерь остановимся на одном, в основе которого лежит установленная на основе большого числа экспериментов линейная зависимость отношения мощности потерь к напряжению (P/U) от напряжения (рис. 1.34). Пересечение прямых P/U с осью абсцисс происходит при критических напряжениях U_k , соответствующих критическим напряжениям:

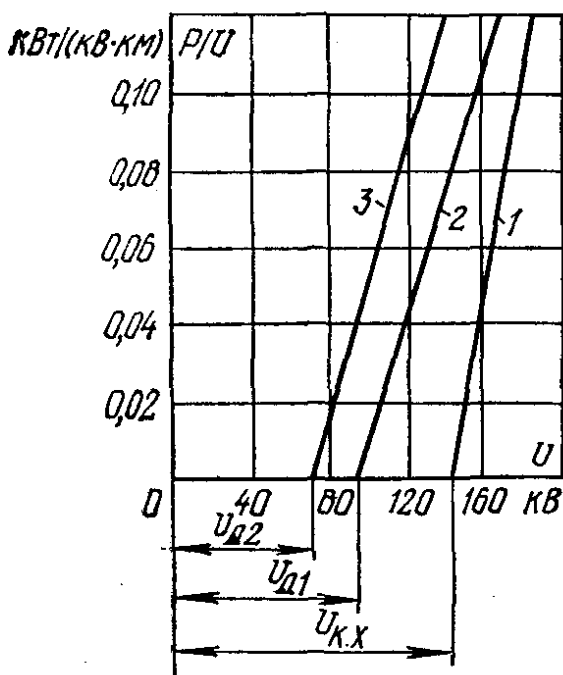


Рис. 1.34. Зависимость потерь на корону от действующего напряжения (провод АСО-150):

1 — хорошая погода; 2 — дождь с интенсивностью 1 мм/ч ; 3 — то же, 3 мм/ч .

$$E_k = 23,3m\delta \left[1 + \frac{0,62}{(r\delta)^{0,38}} \right] \text{ кВ/см.} \quad (1.30)$$

Значения постоянных a и c , входящих в выражение (1.30) и определяющих критическое напряжение U_k возникновения потерь на корону, меньше соответствующих постоянных в формуле (1.18) начальных напряжений. Это объясняется тем, что U_k при переменном

напряжении снижается за счет влияния объемных зарядов, остающихся около проводов от предыдущих полупериодов напряжения (см. п. 1.5.3).

Коэффициент m , входящий в выражение (1.30), учитывает влияние погодных условий на величину потерь на корону. При ухудшении погодных условий (например, при дожде) на поверхности проводов образуются капельки влаги, т. е. возникают очаги с повышенной напряженностью. Это вызывает снижение U_k и, следовательно, увеличение потерь на корону.

В настоящее время при определении потерь на корону принято различать следующие виды погоды.

Хорошая погода — несмотря на сухую и чистую поверхность проводов, отмечен рост потерь при увеличении влажности воздуха. Поэтому с учетом естественной неровности поверхности проводов коэффициент m в этих условиях принимается равным примерно 0,85.

Туман — сопровождается довольно интенсивным оседанием на поверхности проводов катушек влаги, $m=0,7$.

Иней, гололед, изморозь — приводят к образованию на поверхности проводов кристаллов льда, имеющих острые края и сильно искажающих электрическое поле, $m=0,6$.

Дождь и мокрый снег — вызывают сильное увеличение потерь, которые зависят от интенсивности осадков. Средняя интенсивность осадков $J_d = H_d/t_d$, где H_d — среднее количество осадков (дождя и снега), выпавших за год, мм; t_d — общая продолжительность осадков в год, ч. Зависимость коэффициента m от интенсивности осадков J_d приведена на рис. 1.35.

Сухой снег — приводит к более сильному искажению электрического поля, чем дождь или мокрый снег той же интенсивности. Это объясняется тем, что при дожде наибольшее увеличение напряженности поля происходит в основном на нижней поверхности провода, где собираются капли влаги и происходит их отрыв от провода, при сухом снеге напряженность поля может усиливаться по всей поверхности провода. Потери на корону при сухом снеге изучены меньше, чем при дожде, и в первом приближении для определения коэффициента m можно пользоваться кривой рис. 1.35, откладывая по оси абсцисс утроенное значение средней интенсивности сухого снега $J_{сн} = H_{сн}/t_{сн}$.

Приведенное разделение погодных условий на пять групп является, конечно, грубым приближением и не учитывает многих факторов. Например, потери на корону уменьшаются во время дождя даже при неизменной его интенсивности, уменьшение потерь отмечено также в процессе «старения» проводов линий, происходящего

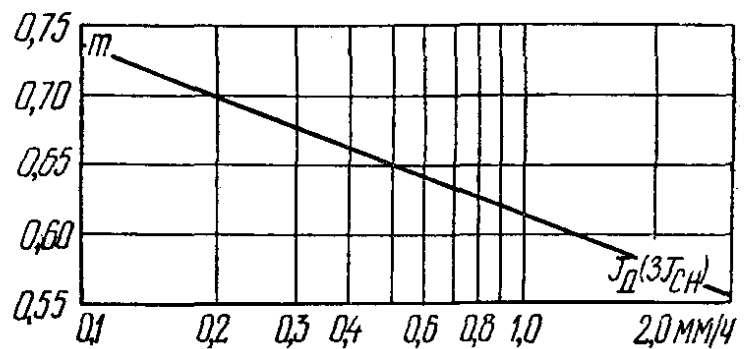


Рис. 1.35. Зависимость коэффициента m от средней интенсивности осадков.

в течение длительного времени после момента включения ВЛ в работу.

Экспериментальные и теоретические исследования проф. Левитова показали, что мощность потерь на корону для каждого из перечисленных выше видов погоды можно определить по формуле

$$P = 350\omega \frac{C^2}{C_3 - C} U_k^2 F(U_\phi / U_k) \text{ кВт/(км} \cdot \text{фаза)}, \quad (1.31)$$

где U_k — критическое напряжение короны для данного вида погоды, кВ; U_ϕ — амплитуда фазного напряжения линии, кВ; C — рабочая емкость фазы линии, Ф/км; C_3 — эквивалентная емкость объемного заряда короны, Ф/км:

$$C_3 = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{\sqrt{r_p^2 + 2,5bCU_k/\delta\epsilon\epsilon_0\omega}}{r_3}}; \quad (1.32)$$

r_p, r_3 — радиус расщепления и эквивалентный радиус расщепленного провода, см; при единичных проводах вместо них берется радиус провода r ; b — подвижность ионов, см²/(кВ·с); при хорошей погоде, инее, гололеде и изморози b принимается равным 2200, в остальных случаях — 1100; $\epsilon\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-9}$ Ф/км — диэлектрическая проницаемость воздуха.

Функция $F(U_\phi / U_k)$ в первом приближении является универсальной для всех видов погоды и конструкций линий и определяется по графику рис. 1.36. Некоторый разброс имеет место при малых отношениях U_ϕ / U_k , зона разброса заштрихована.

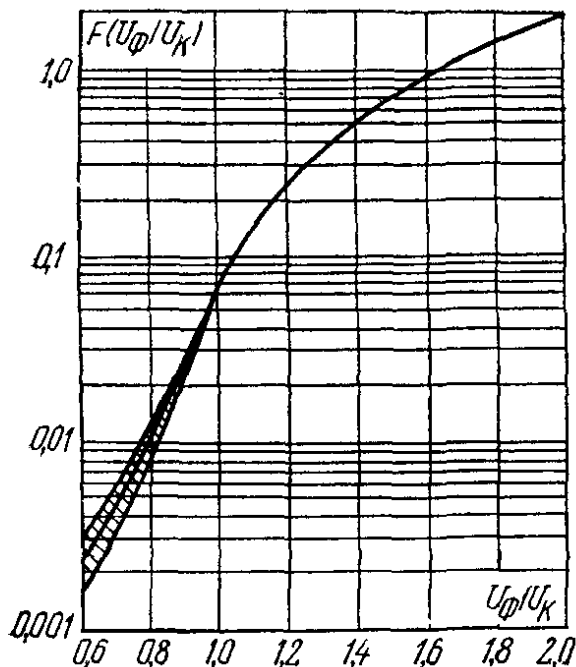


Рис. 1.36. Значения $F(U_\phi / U_k)$.

Определение среднегодовых потерь целесообразно проводить в следующем порядке:

1) зная диэлектрические характеристики линии, по табл. 1.6 и выражению (1.27) определяют эквивалентный радиус r_3 , радиус расщепления r_p и рабочую емкость фаз C ;

2) по метеорологическим условиям района, где проходит линия, определяют продолжительность всех видов погоды: хорошей погоды t_x , тумана t_T , инея, гололеда и изморози t_H , дождя и мокрого снега t_D , сухого снега $t_{сн}$, а также средние интенсивности осадков;

3) определяют критические напряжения U_k для всех видов погоды по выражению

$$U_k = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 nrE_k}{k_y C},$$

где n — число проводов в расщепленной фазе; r — радиус составляющего провода, см; E_k, k_y — критическая напряженность [см. формулу (1.30)] и коэффициент усиления (см. табл. 1.6);

4) по выражению (1.31) определяют мощности потерь для каждого вида погоды. Значения C_Σ и $F(U_\phi/U_k)$ находят при этом по выражению (1.32) и кривой рис. 1.36.

При несимметричном расположении фаз P (а следовательно, и емкости C и C_Σ , а также напряжения U_k) нужно определять для каждой фазы отдельно. Мощность потерь для каждого вида погоды в этом случае представляет сумму мощностей потерь трех фаз.

Среднегодовые потери энергии на корону на 1 км длины линии (кВт·ч/км) будут равны

$$A = P_{xt_x} + P_{tt_t} + P_{ит_и} + P_{дт_д} + P_{спт_сп}, \quad (1.33)$$

причем $\Sigma t = 8760$ ч. Средняя за год мощность потерь на корону $P_{ср} = A/8760$. Обычно потери на корону составляют 30—35 % потерь на нагрев проводов.

1.5.6. Радиопомехи при коронировании

Ранее было отмечено, что коронный разряд сопровождается электромагнитным излучением, источником которого являются стримеры короны. Исследования показали, что спектр такого излучения лежит, в частности, в диапазоне 0,1—100 МГц, т. е. может в ряде случаев представлять помехи радиоприему.

Величину сигнала, возникающего на антеннах радиоустройств, определяет вертикальная составляющая электрического поля E вблизи поверхности земли, поэтому интенсивность электромагнитного излучения короны на проводах линий характеризуется именно этой величиной. Относительное изменение напряженности электрического поля от E_1 до E_2 оценивается обычно величиной Y (дБ), при этом $Y = 20 \lg E_2/E_1$. За исходную величину E_1 часто принимают напряженность 1 мкВ/м, тогда $Y = 20 \cdot \lg E_2$ (при этом E_2 берется также в мкВ/м).

Измерения на опытных пролетах и действующих линиях электропередачи показали, что интенсивность электромагнитного излучения короны уменьшается с увеличением частоты излучения (рис. 1.37). Для того чтобы

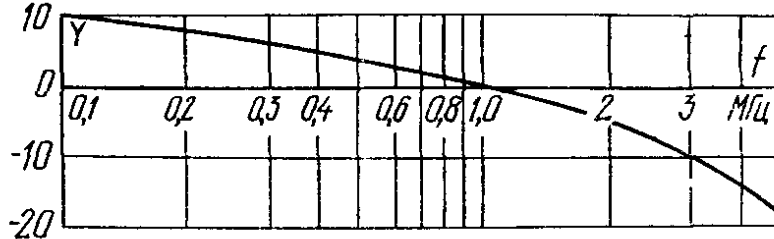


Рис. 1.37. Относительная интенсивность радиопомех коронирующей линии при различных частотах (по данным ВНИИЭ).

обеспечить надежный прием радиосигналов, их интенсивность должна превышать уровень помех не менее чем в 20 раз. Так как интенсивность радиосигналов также уменьшается с ростом частоты, допустимые уровни помех (относительно уровня 1 мкВ/м) должны быть различными. В частности, по нормам, принятым в нашей стране, уровни помех, создаваемых короной на расстоянии 50 м от ли-

ний электропередачи, не должны превышать значений, приведенных в табл. 1.7. Из табл. 1.7 видно, что допустимые уровни помех в общем согласуются с изменением интенсивности излучения короны (см. рис. 1.38), поэтому все расчеты и измерения интенсивности помех от короны проводят только на одной частоте — 1 МГц, при которой допустимый уровень помех составляет 50 мкВ/м, или 34 дБ.

Табл. 1.7. Допустимые уровни радиопомех

Уровень помех	Диапазон частот, МГц		
	0,15—0,5	0,5—2,5	2,5—20
$E_{\text{доп}}$, мкВ/м	100	50	20
$Y_{\text{доп}}$, дБ (относительно уровня 1 мкВ/м)	40	34	26

Как и потери на корону, радиопомехи сильно зависят от состояния погоды. При ухудшении погоды их интенсивность возрастает, но учесть влияние всех видов погоды в настоящее время не представляется возможным ввиду отсутствия достаточного количества экспериментальных данных. Ориентировочно принимают, что при плохой погоде (дождь, снег, гололед, изморозь и иней) средний уровень помех $\bar{Y}_{\text{пл}}$ возрастает по сравнению с уровнем помех при хорошей погоде \bar{Y}_x на 7 дБ, т. е. $\bar{Y}_{\text{пл}} = \bar{Y}_x + 7$.

Такое разделение помех является, конечно, весьма грубым, и действительные помехи могут значительно отличаться от средних. Эти отклонения подчиняются нормальному закону распределения (1.19), причем среднеквадратичное отклонение σ составляет примерно 5 дБ.

Теоретический анализ радиопомех, создаваемых короной, выполненный в ЛПИ, и экспериментальные работы во ВНИИЭ показали, что связь интенсивности радиопомех в хорошую погоду \bar{Y}_x с напряженностью электрического поля на поверхности проводов ВЛ и их радиусом r приближенно выражается зависимостью

$$\frac{30 - \bar{Y}_x}{100} = \frac{28,4 - E_{\text{max}}}{E_0} - 0,5 \frac{\sqrt{r} - 1,12}{\sqrt{r}}, \quad (1.34)$$

где r — радиус провода, см; $E_{\text{max}} = \frac{U_{\phi} C k_y}{n \cdot 2\pi\epsilon\epsilon_0 r}$ — амплитуда максимальной напряженности на поверхности провода, кВ/см; E_0 — начальная напряженность на поверхности идеально гладкого провода того же радиуса, кВ/см.

По выражению (1.34) построены кривые зависимости допустимых напряженностей $E_{\text{max доп}}$ на поверхности провода от его радиуса, при которых уровень помех не превышает допустимого — 34 дБ (рис. 1.38) при различной относительной продолжительности плохой погоды $t_{\text{пл}}^* = t_{\text{пл.ч}}/8760$. Кривые рис. 1.38 справедливы не только

для одиночных проводов, но и для расщепленных, в этом случае под r подразумевается радиус составляющих проводов. Это говорит о том, что уровень помех в случае расщепленных проводов не зависит от числа n составляющих. Объясняется это, по-видимому, тем, что увеличение числа составляющих компенсируется экранирующим влиянием возрастающего числа соседних проводов в расщепленной фазе.

Как видно из рис. 1.38, допустимые по уровню помех напряженности на поверхности провода при увеличении его радиуса существенно снижаются. Ранее было отмечено, что потери на корону также определяются максимальной напряженностью на поверхности провода, и если считать, что эти потери составляют определенную долю от потерь в линии на нагрев проводов, то допустимые потери на корону должны расти с увеличением радиуса провода, т. е. возрастать допустимые в связи с этим напряженности поля. Поэтому по мере роста номинальных напряжений ВЛ, а следовательно, и радиуса проводов увеличивается значение радиопомех, и при очень высоких номинальных напряжениях линий именно радиопомехи короны могут стать определяющими при выборе радиуса проводов.

Установленные нормы допустимого уровня помех в 34 дБ являются, по-видимому, достаточно жесткими. В настоящее время имеется ряд линий, работающих с напряженностями поля, более высокими, чем указано на рис. 1.38 (линии, переведенные на повышенные напряжения). Практика показала, что каких-либо существенных помех радиоприему в окрестности таких линий не наблюдалось. Поэтому встает вопрос о целесообразности увеличения допустимого уровня помех до 100 мкВ/м (40 дБ) на расстоянии 50 м от линий. В этом случае допустимые напряженности на поверхности провода возрастают приблизительно на 8—10 % (пунктирные кривые на рис. 1.38).

1.5.7. Практическое применение коронного разряда

Коронный разряд находит применение в электрофильтрах, которые употребляют на электрических станциях, металлургических, цементных, химических и ряде других предприятий для очистки газов от взвешенных в них частиц (сажи, остатков производства и т. п.). Для этой цели газы, подлежащие очистке, проходят внутри цилиндрического электрода — анода A (рис. 1.39), по оси которого натянута проволока K (катод), являющаяся коронирующим электродом. Электроны и отрицательные ионы, образующиеся в резуль-

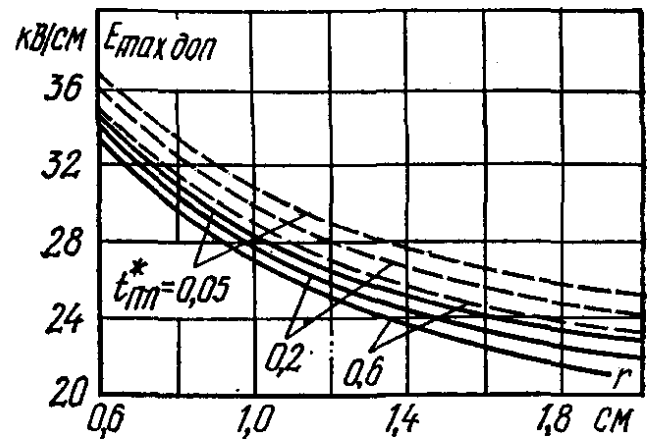
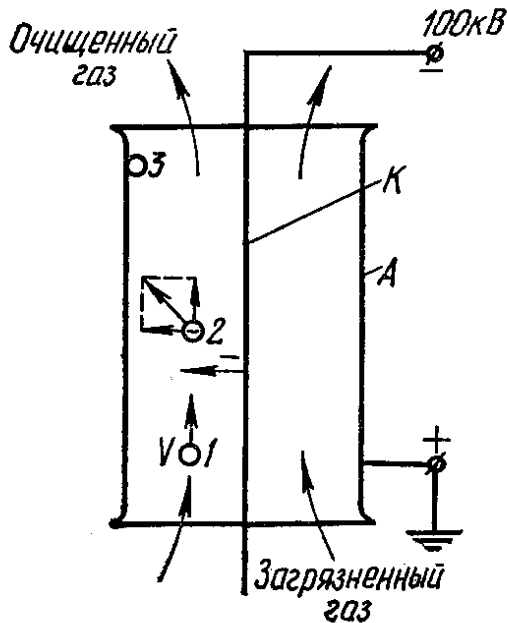


Рис. 1.38. Допустимые по радиопомехам амплитуды максимальной напряженности.

тате коронного разряда, направляются к аноду и, сталкиваясь на своем пути с частицами примесей, заряжают их. В результате частицы направляются силами поля к аноду и оседают на нем. От осевших частиц анод периодически очищается встряхиванием. Средняя напряженность поля в электрофильтрах 2—3 кВ/см, напряжение на коронирующих электродах до 100 кВ, токи примерно 0,05—0,5 мА на 1 пог. м.



Коронный разряд применяется также в устройствах для окраски изделий в электростатических полях. В таких устройствах лак или краска распыляется в электрическом поле коронирующего электрода отрицательной полярности. Отрицательные частицы распыленной краски при этом заряжаются и оседают затем на окрашиваемом изделии, которое

Рис. 1.39. Принцип действия электрофильтра:
1, 2, 3 — частица примеси соответственно до зарядки, заряженная и осевшая на аноде.

является анодом. Преимущества такого метода окраски — образование более прочного и однородного лакокрасочного слоя, особенно в труднодоступных местах, а также экономия материалов, применяющихся для окраски.

1.6. РАЗРЯД В ВОЗДУХЕ ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ

1.6.1. Общие сведения

В высоковольтных конструкциях неизбежно совместное использование газообразных (или жидких) и твердых диэлектриков, например поверхность фарфоровых изоляторов всегда соприкасается или с воздухом, или с трансформаторным маслом. При определенных условиях вдоль поверхности раздела этих диэлектриков может возникнуть разряд, который и получил название **поверхностного**.

Поверхностный разряд в виде искры может перекрыть расстояние между электродами изолятора и при достаточной мощности источника питания завершиться дуговым разрядом; вследствие высокой температуры канала дуги и нагрева диэлектрика последний может разрушиться. Поэтому предупреждение развития разряда по поверхности (перекрытия) представляет одну из основных задач при разработке изоляционных конструкций.

Разрядные напряжения по поверхности диэлектрика зависят от рода диэлектрика, состояния его поверхности, рода приложенного напряжения и формы электрического поля. На рис. 1.40 показаны три характерных случая расположения диэлектрика в электрическом поле.

1. Диэлектрик находится в однородном поле, силовые линии параллельны поверхности диэлектрика (рис. 1.40, а). В изоляционных конструкциях этот случай встречается редко, но часто применяется при исследованиях основных свойств поверхностного разряда.

2. Диэлектрик находится в резконеоднородном поле, силовые линии которого направлены так, что составляющая напряженности поля вдоль поверхности диэлектрика (тангенциальная составляющая) преобладает над нормальной составляющей (рис. 1.40, б). Этот случай характерен для опорных изоляторов.

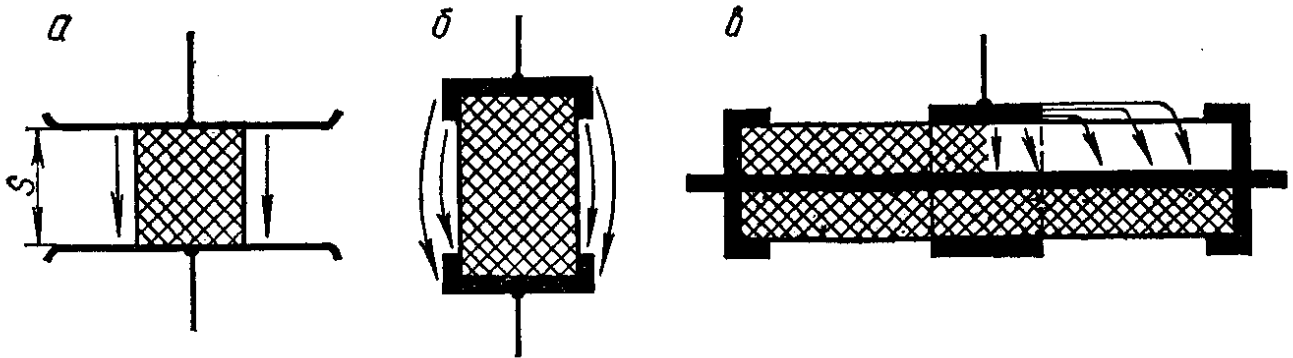


Рис. 1.40. Характерные случаи расположения диэлектрика в электрическом поле.

3. Диэлектрик находится в резконеоднородном поле, при этом нормальная составляющая напряженности преобладает над тангенциальной (рис. 1.40, в). Такая форма поля характерна для проходных изоляторов.

1.6.2. Поверхностный разряд в однородном поле

Несмотря на то что характер электрического поля в случае, показанном на рис. 1.40, а, при внесении в него диэлектрика не меняется, разрядные напряжения вдоль поверхности диэлектрика в 1,5—2 раза ниже разрядных напряжений воздушного промежутка.

Разрядные напряжения по поверхности в значительной степени зависят от наличия воздушных зазоров между электродами и диэлектриком. Так как диэлектрическая проницаемость воздуха ϵ_v в несколько (4—6) раз меньше диэлектрической проницаемости твердого диэлектрика ϵ_d , то напряженность поля в воздушном зазоре в 4—6 раз больше средней напряженности ($E_{cp} \approx E_d$), и ионизация воздуха в таких зазорах начинается гораздо раньше, чем в основном промежутке. Продукты ионизации, выходя в окружающее пространство, способствуют развитию поверхностного разряда. В практических конструкциях скрепление электродов с диэлектриком (фарфором, стеклом) производят с помощью цемента, обеспечивающего высокую механическую прочность и отсутствие воздушных включений.

Однако разрядные напряжения на поверхности даже при плотном прилегании электродов всегда ниже, чем в воздушном промежутке, наиболее сильно они снижаются в случае длительного воздействия напряжения и меньше всего — при импульсах.

Большое влияние на разрядные напряжения оказывают влажность окружающего воздуха и материал диэлектрика. При влажности воздуха, соответствующей конденсации влаги на поверхности диэлектрика (60—70 %, см рис. 1.41, а), разрядные напряжения резко снижаются, причем наблюдается значительный разброс их (заштрихованная область).

Влияние даже незначительного количества влаги на поверхности диэлектрика на разрядные напряжения объясняется тем, что вода обладает ионной проводимостью, и так как движение ионов в

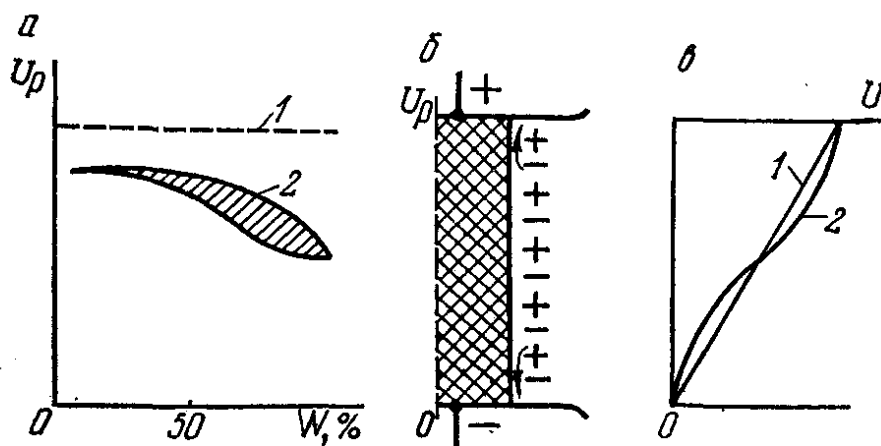


Рис. 1.41. Поверхностный разряд в однородном поле: а — зависимость разрядных напряжений от влажности воздуха; б — распределение ионов по поверхности диэлектрика; в — распределение напряжения; 1 — разрядное напряжение в чисто воздушном промежутке; 2 — то же при наличии диэлектрика.

очень тонких слоях воды происходит с малой скоростью, то в первую очередь на электроды уходят заряды из непосредственно прилегающих к ним участков поверхности. Поэтому вблизи каждого электрода создается избыток ионов того же знака, что и заряд электрода (рис. 1.41, б). Этот избыток ионов ослабляет электрическое поле вблизи электродов и усиливает его в остальной части промежутка, в результате чего распределение напряжения вдоль поверхности диэлектрика искажается (рис. 1.41, в), поле становится неоднородным и разрядные напряжения снижаются.

Поверхностная влага сильнее влияет на хорошо смачиваемые (гидрофильные) диэлектрики (стекло, фарфор). В случае несмачиваемых (гидрофобных) диэлектриков (парафин, фторопласты) влага оседает на поверхности в виде отдельных, изолированных друг от друга капель, и влияние ее менее значительно.

Разброс разрядных напряжений объясняется нестабильностью процесса разряда вследствие подсушивания и нарушения влажной пленки, поэтому при влажности воздуха, близкой к 100 %, разброс напряжений уменьшается, так как при этом образуется сплошная пленка влаги достаточной толщины, и условия развития разряда стабилизируются.

Влияние давления газа при разряде на поверхности диэлектрика проявляется в меньшей степени, чем при разрядах в газах.

Разрядные напряжения по поверхности в однородном поле можно значительно увеличить, если поверхность диэлектрика сделать ребристой и увеличить, таким образом, длину пути поверхностного разряда.

1.6.3. Поверхностный разряд в резконеоднородных полях

Для резконеоднородного поля с преимущественно тангенциальной составляющей напряженности (см. рис. 1.40, б) основные закономерности влияния различных факторов на разрядные напряжения сохраняются, причем абсолютные величины снижения разрядных напряжений несколько меньше, чем в случае однородного поля. Это объясняется тем, что поверхностные заряды лишь слегка увеличивают неравномерность и без того уже неоднородного поля.

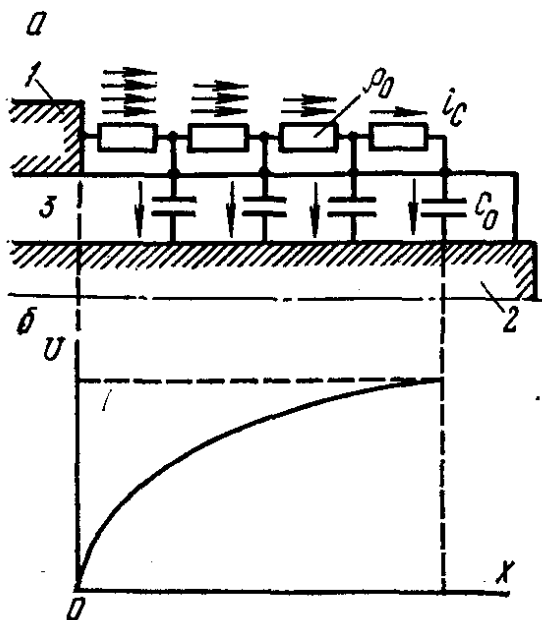


Рис. 1.42. Схема замещения (а) и распределения напряжения по поверхности проходного изолятора (б).

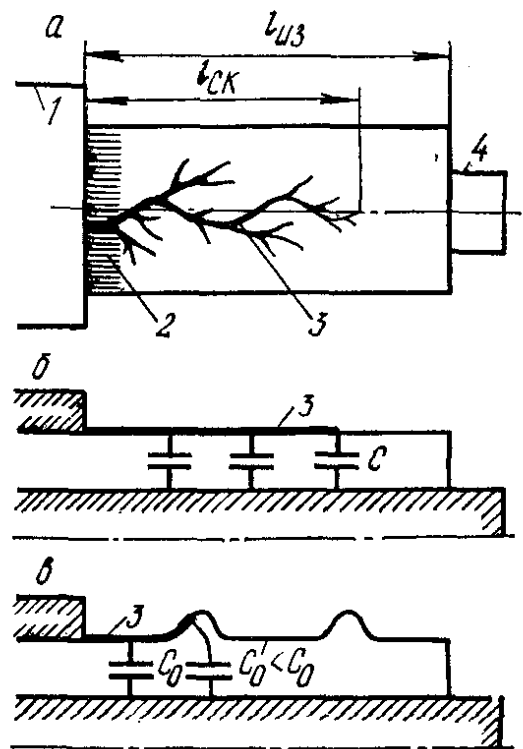


Рис. 1.43. Поверхностный разряд в резконеоднородном поле.

В большинстве изоляционных конструкций (проходные изоляторы, изоляция обмоток электрических машин при выходе из паза и т. п.) поверхностный разряд протекает в условиях резконеоднородного поля с преобладающей нормальной составляющей (см. рис. 1.40, в).

Рассмотрим распределение напряженности поля по поверхности проходного изолятора (рис. 1.42). На эквивалентной схеме замещения C_0 — емкость единицы поверхности изолятора относительно электрода 2, называемая **удельной поверхностной емкостью**, ρ_0 — удельное поверхностное сопротивление изолятора. Из схемы замещения видно, что токи i_c , протекающие через сопротивления ρ_0 и замыкающиеся через емкости C_0 , неодинаковы: через ближай-

шие к электроду I сопротивления ρ_0 протекают токи всех последующих емкостей C_0 . В результате напряжение по поверхности изолятора распределяется неравномерно, и напряженность у края электрода I будет тем выше, чем больше отношение $\chi_{C_0}/\rho_0 = 1/\omega C_0 \rho_0$ (см. рис. 1.42, б).

Так как сопротивление ρ_0 при сухой и чистой поверхности изолятора стабильно и довольно высоко (10^{14} — 10^{16} Ом), а C_0 зависит от ϵ диэлектрика \mathcal{Z} изолятора и его толщины, то распределение напряжения по поверхности изолятора будет тем более неравномерно, чем выше ϵ диэлектрика изолятора и меньше толщина его стенок.

Поверхностный разряд в данном случае развивается следующим образом (рис. 1.43). При некотором начальном напряжении у края электрода I возникает свечение 2 (корона) в форме коротких прямых параллельных и плотно расположенных нитей — при положительном полупериоде и в виде узкой светящейся полосы — при отрицательном полупериоде напряжения (рис. 1.43, а). Длина нитей на этой стадии разряда — **коронной** — приблизительно пропорциональна приложенному напряжению.

При дальнейшем увеличении напряжения из коронирующего слоя 2 развиваются стримеры в виде неустойчивых, скользящих по поверхности диэлектрика искр 3 — начинается стадия **скользящего** разряда. Длина искр очень быстро растет — приблизительно пропорционально пятой степени напряжения, и когда одна из них достигает второго электрода 4 , происходит перекрытие изолятора. Вследствие значительного выделения тепла в канале искр скользящий разряд (а также длительно существующий коронный) может повредить поверхность изолятора, особенно если он изготовлен из органического диэлектрика, который в этом случае очень быстро обугливается, и на его поверхности образуются проводящие каналы (треки).

Напряжение возникновения скользящего разряда зависит от величины поверхностной емкости C_0 , через которую замыкается ток стримера (рис. 1.43, б), и может быть определено по эмпирической формуле Теплера:

$$U_{\text{ск}} = \frac{1,36}{C_0^{0,44}} 10^{-4} \text{ кВ}_{\text{действ}},$$

где C_0 — удельная поверхностная емкость, Ф/см².

Длина искр скользящего разряда $l_{\text{ск}}$ зависит от поверхностной емкости и скорости изменения напряжения (так как эти величины определяют ток стримера, развивающегося по поверхности диэлектрика) и может быть определена по эмпирической формуле

$$l_{\text{ск}} = k C_0^2 U^5 \sqrt{dU/dt}, \quad (1.35)$$

где k — коэффициент, зависящий от рода напряжения.

Положив в формуле (1.35) $l_{\text{ск}} = l_{\text{из}}$, получим выражение для напряжения перекрытия изолятора:

$$U_{\text{пер}} = \frac{1}{k} \sqrt[5]{l_{\text{из}}/C_0^2} \left(1/\sqrt{dU/dt} \right)$$

или, так как $\sqrt[20]{dU/dt} \approx 1$, то

$$U_{\text{пер}} \approx \frac{1}{k} \sqrt[5]{l_{\text{из}}/C_0^2}. \quad (1.36)$$

Выражение (1.36) показывает, что для повышения напряжения перекрытия необходимо увеличивать длину изолятора и уменьшать поверхностную емкость, причем влияние изменения поверхностной емкости будет более значительным, так как в формулу она входит в квадрате. На практике для увеличения $U_{\text{пер}}$ при изготовлении изоляторов применяют материалы с меньшей диэлектрической проницаемостью ϵ и на их поверхности устраивают ребра (рис. 1.43, в), что сопровождается как увеличением длины $l_{\text{из}}$, так и уменьшением C_0 до значения C'_0 . При этом на участках с ребрами токи стримеров \mathcal{I} уменьшаются, т. е. затрудняются условия их развития и соответственно повышается напряжение перекрытия.

Развитие поверхностного разряда облегчается при повышенных частотах и импульсных напряжениях, когда dU/dt велико и ток поверхностных стримеров возрастает. При постоянном напряжении поверхностная емкость не оказывает влияния на развитие поверхностного разряда, и, так как объемные и поверхностные сопротивления диэлектрика обычно велики, стадия скользящего разряда практически отсутствует, т. е. после возникновения короны при некотором напряжении сразу наступает перекрытие.

Опыт показывает, что напряжения перекрытия в рассмотренных случаях близки к разрядным напряжениям воздушного промежутка в резконеоднородном поле, для которого за расстояние между электродами принято кратчайшее расстояние между электродами изолятора.

1.6.4. Разряд вдоль увлажненной и загрязненной поверхности изоляции диэлектрика

Любая изоляция, установленная на открытом воздухе, подвергается воздействию атмосферных осадков, и поверхность ее покрывается различными осадками.

Рассмотрим развитие разряда по увлажненной поверхности изолятора. Увлажнение поверхности изолятора происходит в результате выпадения дождя, росы или возникновения тумана. При этом создается сплошная проводящая пленка влаги 2 между электродами 1 и 3 (рис. 1.44, а), по которой протекает ток утечки $I_y = U/R_y$, где R_y — полное сопротивление утечки по поверхности изолятора:

$$R_y = \int_0^{L_y} \frac{\rho_{\text{п}} dl}{\Delta \pi D(l)};$$

$\rho_{\text{п}}$ — удельное объемное сопротивление проводящего слоя (для дождевой воды $\rho_{\text{п}} \approx 10^3$ Ом·м); Δ — толщина проводящего слоя;

L_y — полная длина пути утечки по поверхности изолятора; $D(l)$ — диаметр изолятора, зависящий в общем случае от расстояния l .

Считая для простоты проводящий слой однородным, т. е. что Δ и ρ_{Π} не зависят от l , получим

$$R_y = \rho_{\Pi} L_y / (\Delta \pi D_{\Sigma}), \quad (1.37)$$

где

$$D_{\Sigma} = \int_0^{L_y} dl / D(l).$$

В результате протекания тока утечки происходит подогрев проводящего слоя. В реальных условиях, когда толщина этого слоя неодинакова, в некоторых местах скорость испарения влаги может превышать скорость ее поступления из окружающей среды. Поэтому часть поверхности изолятора подсушивается, падение напряжения на этом участке возрастает и происходит его перекрытие, т. е. возникает частичная дуга 4 (рис. 1.44, б). В дальнейшем подсушивание продолжается и опорная точка a частичной дуги перемещается по краю подсушиваемой пленки. Если сопротивление утечки R_y достаточно велико и ток дуги соответственно мал, частичная дуга оборвется, подсушенный участок вновь увлажнится, снова подсушится с образованием частичной дуги и т. д., т. е. на поверхности изолятора будут наблюдаться перемежающиеся дуги, сопровождаемые характерным потрескиванием.

Рис. 1.44. Разряд по увлажненной и загрязненной поверхности изолятора.

Образование перемежающихся дуг не означает нарушения электрической прочности промежутка, но, как и скользящий разряд, может вызвать разрушение твердой поверхности диэлектрика и образование на ней треков. Поэтому для изготовления изоляторов наружных установок необходимо применять диэлектрики, обладающие высокой стойкостью к воздействию перемежающихся дуг (трекинговстойкостью).

При некотором значении тока частичная дуга не гаснет, а быстро растягивается и происходит перекрытие изолятора. Перекрытие изолятора облегчается в тех случаях, когда ток утечки достаточен для подсушивания участков поверхности изолятора и поддержания устойчивой частичной дуги. Иными словами, разрядное напряжение в рассматриваемых условиях будет уменьшаться при уменьшении сопротивления утечки (1.37). Можно показать, что

$$U_p = k_1 L_y (\rho_{\Pi} / \Delta D_{\Sigma})^{0,4}, \quad (1.38)$$

где k_1 — определяемый опытным путем коэффициент, зависящий от конструкции изолятора.

Механизм перекрытия при смоченной поверхности изоляции носит тепловой характер, т. е. развивается во времени сравнительно медленно и наблюдается только при длительном воздействии напряжения. Поэтому при импульсных воздействиях мокроразрядные напряжения практически равны сухоразрядным.

Оседающие на поверхности изоляторов пыль и другие загрязнения в сухом состоянии имеют обычно высокое сопротивление и не влияют на разрядные напряжения. При увлажнении загрязненной поверхности (например, вследствие тумана или росы) токи утечки резко возрастают и начинаются явления, аналогичные рассмотренным выше для мокрой поверхности, только вследствие высокой проводимости загрязняющего слоя они проявляются зачастую более резко.

Разрядные напряжения при этом снижаются в тем большей степени, чем больше загрязнены изоляторы. Наиболее опасными для изоляции являются уносы из котельных, химических, металлургических и других подобных предприятий, брызги морской воды и пыль почвы, содержащей соли (например, солончаков). Для загрязненной изоляции опасно слабое увлажнение во время тумана, росы или морозящего дождя. Интенсивный дождь, наоборот, способствует очищению изоляторов, так как смывает загрязняющие осадки.

Для борьбы с перекрытиями, вызванными загрязнением поверхности изоляторов, обычно увеличивают длину пути утечки.

2. ВНЕШНЯЯ ИЗОЛЯЦИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

2.1. ИЗОЛЯТОРЫ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

2.1.1. Основные электрические и механические характеристики изоляторов

Токоведущие части электрических установок, находящиеся под разными потенциалами, должны быть надежно закреплены и изолированы от заземленных частей и друг от друга. Осуществляется это с помощью различного рода изоляторов.

Изоляторы по назначению разделяются на три большие группы: линейные, стационарные и аппаратные. **Линейные** применяются для изоляции и крепления проводов ВЛ; **стационарные** — для изоляции и крепления шин и токопроводов в распределительных устройствах электрических станций и подстанций; **аппаратные** входят как отдельный элемент в конструкцию того или иного аппарата.

Материал и конструктивное выполнение изолятора должны обеспечивать его работу в течение длительных сроков, в условиях воздействия механических нагрузок, вибраций, резких изменений температуры, загрязнений, а для изоляторов, предназначенных для работы в наружных установках, — в условиях дождя, туманов,

промышленных уносов и т. д. До сих пор наиболее употребительным материалом для изготовления изоляторов является **электротехнический фарфор**. Он имеет высокую электрическую ($E_{пр} = 20—25$ кВ/мм) и механическую ($\sigma_{сж} = 400—700$ МПа, $\sigma_{из} = 80—150$ МПа, $\sigma_p = 45—70$ МПа) прочность, устойчив к трекингу и агрессивным воздействиям. Изделия из фарфора хорошо освоены и недороги. Из других диэлектрических материалов применяются **стеатит**, обладающий повышенной механической прочностью и меньшим $\operatorname{tg} \delta$ по сравнению с фарфором, **малощелочное закаленное стекло**, которое по механическим, электрическим характеристикам и стоимости вполне может конкурировать с фарфором и находит все большее применение для изготовления линейных изоляторов. Стекло прозрачно и растрескивается при повреждении, что облегчает обнаружение дефектных изоляторов при их изготовлении и на линиях. Разновидностью стекла является **ситалл**, применение которого еще ограничивается сложностью изготовления изделий из него и высокой стоимостью. Аппаратные изоляторы изготавливаются также из **эпоксидных смол** методом литья. В проходных изоляторах используется **бумажно-масляная** и **маслобарьерная** изоляция, наружная часть изолятора при этом закрывается фарфоровой крышкой. Опорные и проходные изоляторы изготавливаются иногда из бакелизированной бумаги, которая при соответствующей термической обработке приобретает сравнительно высокие электрические и механические свойства. Попытки использовать в качестве изоляторов конструкции из полимеров не привели к заметному успеху вследствие плохой трекинговой стойкости и быстрого старения полимерных материалов. Изготовление и применение изоляционных траверс из эпоксидных смол, армированных стекловолокном, а также конструкций из специального изоляционного бетона находятся еще в стадии разработки.

Арматура крепления изоляторов изготавливается из ковкого чугуна, стали, а при больших токах — немагнитного чугуна или цветных металлов. Крепление металла с диэлектриком выполняется в основном с использованием высококачественных цементов.

Потеря изолятором его изолирующих свойств может произойти или при пробое твердого изолирующего материала, или при дуговом перекрытии по его поверхности. В первом случае изолятор становится непригодным к работе вообще, во втором его электрическая прочность чаще всего восстанавливается после ликвидации дуги. Поэтому изоляторы конструируют так, чтобы наименьшее разрядное напряжение по поверхности было на 30—60 % ниже, чем напряжение пробоя сквозь толщу диэлектрика.

Напряжение перекрытия по поверхности изолятора в значительной мере зависит от условий его работы. Для изоляторов, предназначенных для установки во внутренних помещениях, основными электрическими характеристиками являются **разрядное напряжение перекрытия** $U_{с.р}$ и **выдерживаемое напряжение** $U_{с.в}$ при сухой и чистой поверхности изолятора. Значения $U_{с.р}$ определяются при непрерывном подъеме напряжения промышленной

частоты до перекрытия, а $U_{с.в}$ — до нормированного значения, указанного в каталогах или ГОСТах на испытания. Выдерживаемые напряжения несколько меньше (на 10—30 %) средних разрядных.

Величина сухоразрядного напряжения перекрытия почти целиком определяется разрядным расстоянием l_c , т. е. кратчайшим расстоянием по воздуху между электродами изолятора. Как видно из рис. 2.1, зависимость $U_{с.р} = f(l_c)$ почти пропорциональная и может быть записана в виде $U_{с.р} = E_{с.р} l_c$, где $E_{с.р} = 3—5$ — средняя разрядная напряженность вдоль l_c , зависящая от типа изолятора, кВ/см. При $l_c > 2$ м, чтобы сохранить про-

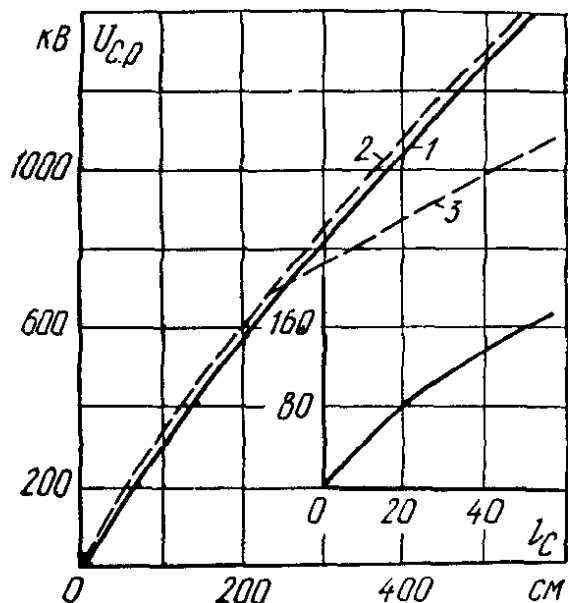


Рис. 2.1. Зависимость сухоразрядного напряжения опорных и проходных изоляторов от их разрядного расстояния:

1 — нижний предел; 2 — средние значения $U_{с.р}$;
3 — при отсутствии защитной арматуры.

порциональность между $U_{с.р}$ и l_c , необходимо применять специальные экраны для выравнивания поля вдоль колонки или гирлянды изоляторов (кривая 3).

Для возможности сравнения разрядные и выдерживаемые напряжения изоляторов U_0 , указанные в каталогах, приведены к нормальным условиям по соотношению

$$U_0 = U_{н} \frac{K_{\gamma}}{K_p K_t}, \quad (2.1)$$

где $U_{н}$ — измеренное напряжение; K_p , K_t , K_{γ} — поправочные коэффициенты, зависящие соответственно от давления, температуры и абсолютной влажности воздуха γ ; определяются по соотношениям и номограммам, приведенным в ГОСТ 1516.2—76.

При небольших изменениях относительной плотности воздуха ($\delta = 0,95—1,05$) можно считать $K_p K_t = \delta$. Зависимость от влажности более сложная. За нормальную принимается абсолютная влажность воздуха, равная 11 г/м^3 (при 20°C соответствует относительной влажности 63,5 %). При увеличении абсолютной влажности напряжение перекрытия сухого изолятора возрастает, но при относительных влажностях больше 80—85 % с ростом влажности напряжение перекрытия начинает уменьшаться.

Важнейшей характеристикой изоляторов, работающих в наружных установках, является разрядное напряжение перекрытия или соответствующее выдерживаемое напряжение при испытании изолятора под искусственным дождем. Эти величины должны быть выше расчетного уровня коммутационных перенапряжений и устанавливаются с учетом расчетных кратностей последних. Низкая

величина разрядных напряжений под дождем может приводить к частым перекрытиям изоляции, особенно при наличии загрязнений, смачиваемых дождем или туманом.

Разрядное (выдерживаемое) напряжение при промышленной частоте определяется при «стандартном» искусственном дожде, имеющем характерную капельную структуру и падающем под углом 45° на изолятор, установленный в рабочем положении. Интенсивность дождя принята равной $3 \pm 0,3$ мм/мин, удельное сопротивление воды 100 ± 10 Ом·м при 20°C (ГОСТ 1516.2—76). Мокроразрядное напряжение всегда на 20—30 % ниже сухоразрядного, за исключением очень длинных гирлянд (ВЛ 500 кВ), когда эти величины почти совпадают. Снижение напряжения перекрытия при дожде является следствием того, что высокая проводимость смоченных поверхностей вызывает перераспределение напряжения вдоль поверхности изолятора, и напряженности на сухих участках оказываются значительно больше, чем на смоченных. Это приводит к частичному перекрытию сухих участков, а затем и полному перекрытию изолятора.

Величины мокроразрядных напряжений при дожде $U_{м.р}$ считать почти невозможно, и определяются они экспериментально. Однако существует пропорциональная зависимость между $U_{м.р}$ и строительной высотой изолятора H : $U_{м.р} = E_{м.р}H$, где $E_{м.р} = 2—2,6$ — средняя мокроразрядная напряженность, зависящая от типа изолятора, кВ/см. Опытным путем установлено, что напряжение под дождем может быть повышено оптимальным выбором количества и формы ребер и юбок, при этом достигается увеличение пути утечки и создание неувлажненных участков.

Так как разряд при дожде развивается частично вдоль смоченных поверхностей, а частично в воздухе, величины $U_{м.р}$ и выдерживаемого напряжения $U_{м.в}$ зависят от давления p воздуха. При пересчете на нормальные условия принимается, что половина напряжения при возникновении разряда приходится на воздушные промежутки, и соотношение между U_0 , приведенным к нормальным условиям, и величиной измеренного напряжения $U_{и}$ выражается в этом случае формулой

$$U_{и} = U_0 K_p = U_0 \left(0,5 + \frac{p}{2p_0} \right), \quad (2.2)$$

где p_0 — нормальное атмосферное давление. От температуры и влажности воздуха $U_{и}$ почти не зависит, т. е. $K_t = K_v = 1$.

Принятая интенсивность дождя 3 мм/мин в реальных условиях встречается редко, эксплуатационные данные показывают, что перекрытия изоляторов чаще происходят при туманах или дождях слабой силы (0,1—0,2 мм/мин). Такие перекрытия наблюдаются и при рабочих напряжениях, т. е. при напряжениях значительно меньше $U_{м.р}$. Это указывает на то, что принятая методика определения разрядных характеристик изоляторов при дожде не свободна от недостатков. Именно поведение изоляторов в условиях загрязнений и увлажнений является решающим фактором при выборе изоляции воздушных линий и распределительных устройств (РУ).

Из соотношения (1.38) следует, что основным параметром для оценки разрядного напряжения в условиях загрязнения и увлажнения является длина утечки L_y , которая всегда указывается в каталогах на изоляторы наружной установки. При определении способности изолятора выдерживать длительно рабочее напряжение без перекрытия используется также понятие эффективной длины пути утечки $L_{эф} = L_y/k$, где $k = 1,0—1,3$ — поправочный коэффициент, учитывающий эффективность использования геометрической длины пути утечки L_y при развитии разряда и различную загрязняемость изоляторов в условиях эксплуатации.

Поведение изоляторов при воздействии атмосферных перенапряжений определяется вольт-секундной характеристикой. Однако практически оценку импульсной прочности изолятора производят по величине **50%-ного разрядного напряжения** при испытаниях полным и срезанным грозовым импульсом. Импульсные разрядные напряжения выше сухоразрядных и почти не зависят от загрязнения и увлажнения поверхности изолятора. Величина их зависит от формы и полярности импульса, пути разряда и конструкции изолятора. Коэффициент импульса при полной волне лежит в пределах 1,2—1,3 и повышается до 1,6—2,0 при срезанной волне. При отрицательной волне коэффициент импульса выше, чем при положительной. При грозовых импульсах канал разряда не отрывается от поверхности изолятора, поэтому разрядное расстояние при импульсах больше, чем l_c , но зависит от величины l_c . Величина импульсного разрядного напряжения $U_{и}$ связана с величиной l_c и может быть оценена по эмпирическому соотношению $U_{и} = (5—6)l_c$ кВ (при $l_c > 30$ см). Измеренные импульсные разрядные напряжения приводятся к нормальным условиям по соотношению (2.1), а также формулам и номограммам, приведенным в ГОСТ 1516.2—76. Для внешней изоляции и изоляторов 330 и 500 кВ нормированы выдерживаемые напряжения при воздействии коммутационных импульсов.

Пробивное напряжение фарфорового изолятора увеличивается с ростом толщины фарфора S приблизительно в соответствии с соотношением

$$U_{пр} = 80 \sqrt[3]{S^2} \text{ кВ.}$$

Однако, так как электрическая и механическая прочность фарфора с увеличением толщины быстро снижается, при изготовлении изоляторов не применяется фарфор толщиной свыше 4—5 см, за исключением сплошных стержневых или колонковых изоляторов, диаметр которых может быть до 12 см.

Механическая прочность изоляторов выбирается по условиям их работы. Для линейных подвесных изоляторов нормируется прочность на растяжение, для опорных и проходных — прочность на изгиб. Для большинства типов изоляторов основной механической характеристикой является разрушающая нагрузка при ее плавном подъеме, вызывающая полное или частичное разрушение изолятора.

В подвесных линейных изоляторах при возрастании нагрузки возможно появление скрытых трещин. Поэтому такие изоляторы испытываются одновременным воздействием напряжения 50—60 кВ и плавно нарастающей растягивающей механической нагрузки. При появлении трещин нарушается электрическая прочность изолятора. Величина механической нагрузки в момент нарушения электрической прочности (пробоя) изолятора называется **электро-механической прочностью** изолятора и указывается в его маркировке (в кН). Механические характеристики изоляторов, так же как и электрические, регламентированы ГОСТами.

Изоляторы должны также противостоять резким изменениям температуры. Для определения термостойкости фарфоровых и стеклянных изоляторов проводятся специальные испытания, заключающиеся в ряде последовательных нагревов и резких охлаждений с перепадом температур 70 °С.

2.1.2. Линейные изоляторы

Линейные изоляторы по конструкции разделяются на два типа: штыревые и подвесные.

Штыревые изоляторы применяются в основном на линиях до 10 кВ и значительно реже на линиях 20 и 35 кВ. Выполняются они фарфоровыми (ШФ) и стеклянными (ШС). На рис. 2.2 приведены типичные конструкции таких изоляторов. Изолятор навертывается на металлический штырь, с помощью которого он крепится на траверсе опоры. Для плотности крепления штырь обматывается паклей, пропитанной высыхающим суриком. Провод закрепляется с

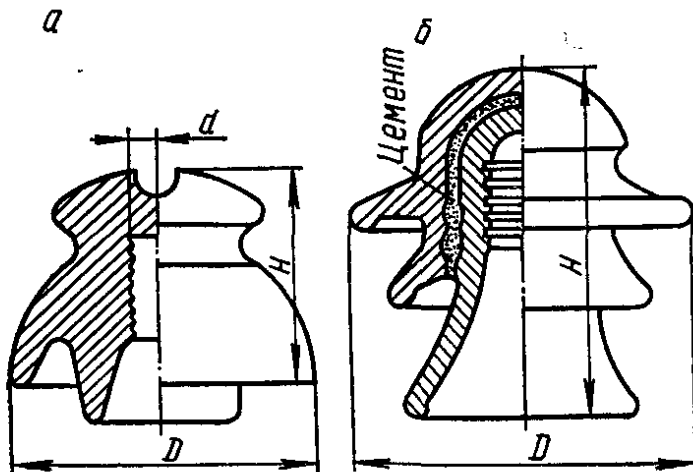


Рис. 2.2. Линейные штыревые изоляторы: а — типа ШФ (6—10 кВ); б — типа ШФ (20 кВ).

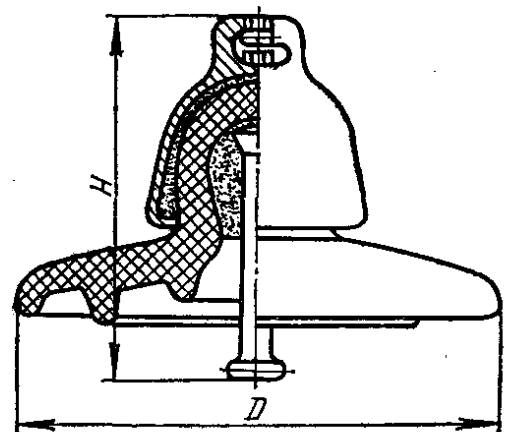


Рис. 2.3. Подвесной изолятор тарельчатого типа.

помощью проволоочной вязки или специальных зажимов в верхней канавке либо на шейке изолятора. Верхняя поверхность изоляторов хорошо оmyвается дождем, поэтому для повышения мокроразрядных напряжений в нижней части выполняются резко выступающие юбки.

Основные характеристики штыревых изоляторов в соответствии с ГОСТ 1232—67 приведены в табл. 2.1.

Табл. 2.1. Характеристики штыревых линейных изоляторов

Тип изолятора	Размеры, мм		Электро-механическая нагрузка, Н	Сухоразрядное напряжение, кВ	Мокроразрядное напряжение, кВ	Импульсное 50%-ное разрядное напряжение, кВ	
	высота <i>H</i>	Диаметр <i>D</i>				+	-
ШФ10-А	105	140	13 720	60	34	90	112
ШС10-А	110	150	13 720	60	34	90	—
ШФ20-А	199	185	19 600	86	57	—	200

Подвесные изоляторы применяются двух видов: тарельчатые и стержневые.

Тарельчатый изолятор с конической головкой (рис. 2.3) представляет фарфоровое или стеклянное тело, армированное сверху металлической шапкой, а снизу металлическим стержнем. Крепление арматуры осуществляется с использованием высококачественных цементов. Поверхность фарфорового изолятора глазуруется, а внешняя и внутренняя поверхности конусной головки покрываются слоем битума. Цемент с такими поверхностями не скрепляется, и это обеспечивает возможность малых взаимных перемещений цемента и фарфора, что предупреждает появление опасных механических напряжений в фарфоре при резких колебаниях температуры. Растягивающие усилия на стержень и шапку вследствие расклинивающего эффекта приводят к тому, что фарфор нижней части головки воспринимает сжимающие нагрузки. Это обеспечивает высокие механические характеристики таких изоляторов. Размеры тарелки и форма ребер в нижней части тарелки выбраны в соот-

Табл. 2.2. Характеристики подвесных линейных изоляторов

Тип изолятора новый (старый)	Размеры, мм			Гарантированная электро-механическая нагрузка, Н (не менее)	Напряжение 50 Гц, кВ (не менее)			50%-ное разрядное напряжение, кВ (не менее)		Масса, кг
	высота <i>H</i>	диаметр <i>D</i>	длина пути утечки <i>L_y</i>		пробивное	испытательное		+	-	
						в сухом состоянии	под дождем			
ПФ6-А (П-4,5)	167	270	285 (255)	58 800	110	60	32	125	130	6,5
ПФ16-А	173	280	365	156 800	110	68	40	130	135	8,6
ПС6-А (ПС-4,5)	130	255	255	58 800	90	58	37	90	95	4,1
ПС16-А (ПС-16)	180	320	360	156 800	100	66	42	95	99	9,0
СФ-110/2,25 (СП-110/1,5)	1270	75	2150	58 800	—	340 (сухоразрядное)	240 (мокроразрядное)	—	—	26,6

ветствии с многочисленными опытными данными и обеспечивают мокроразрядные напряжения в пределах 40 кВ.

Стеклянные подвесные изоляторы имеют меньшие габариты и выдерживают большие электромеханические нагрузки. Технология их изготовления проще и допускает полную автоматизацию процесса производства. Выпуск и применение стеклянных подвесных тарельчатых изоляторов все более расширяется. Некоторые характеристики подвесных изоляторов тарельчатого типа приведены в табл. 2.2 (ГОСТ 6490—67).

Стержневые подвесные изоляторы (рис. 2.4) представляют сплошной фарфоровый стержень с ребрами, армированный сверху и снизу металлическими шапками с коническими внутренними поверхностями. При использовании стержневых изоляторов достигается значительная экономия металла. Одного такого изолятора типа VKLS-75/21 (ГДР) достаточно для изоляции ВЛ 110 кВ. Основным недостатком стержневых изоляторов — обрыв провода при разрушении изолятора электрической

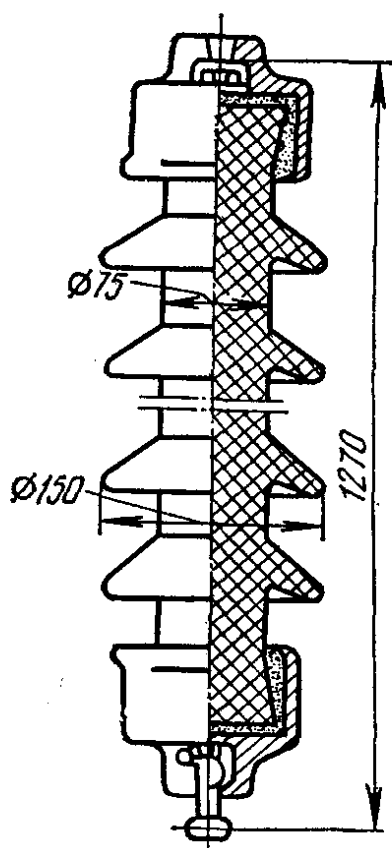


Рис. 2.4. Подвесной изолятор стержневого типа СФ-110/2,25.

дугой или механическим ударом. Тарельчатые же изоляторы, даже будучи электрически пробитыми, как правило, способны нести механическую нагрузку. В табл. 2.2 приведены основные характеристики стержневого изолятора СФ-110/2,25.

2.1.3. Опорные и проходные изоляторы

Станционные и аппаратные изоляторы распределительных устройств по своему назначению и конструкции разделяются на опорные и проходные. **Опорные** изоляторы используются для крепления шин и токопроводов открытых и закрытых распределительных устройств и аппаратов: **Проходные** изоляторы применяются при переходе токопроводов сквозь стены или для ввода напряжения внутрь металлических баков трансформаторов, конденсаторов, выключателей и других аппаратов.

Основным изолирующим материалом опорных изоляторов является фарфор. В проходных изоляторах на напряжение 35 кВ и выше, помимо фарфора, широко используется бумажно-масляная и маслобарьерная изоляция.

Опорные изоляторы для внутренней установки на напряжение 3—35 кВ выполняются, как правило, стержневого типа и состоят из фарфорового тела и металлической арматуры. В изоляторах

с внутренней герметизированной полостью (рис. 2.5, а) арматура в виде шапки для закрепления шин и круглого или овального основания скрепляется с фарфором с помощью цемента. Ребристость развита слабо и служит для некоторого увеличения разрядного напряжения. Наибольшее влияние оказывает ребро, расположенное у шапки, которое несколько выравнивает поле в области наиболее высоких напряженностей, откуда начинается развитие разряда.

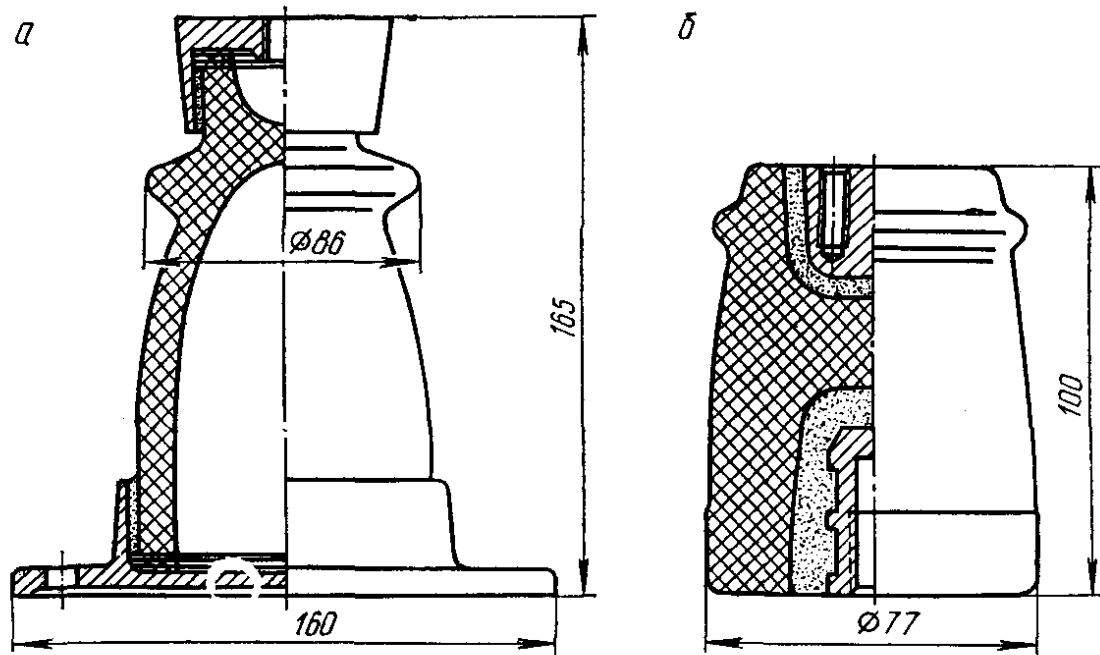


Рис. 2.5. Опорные изоляторы типа ОФ-6 для внутренней установки.

Это ребро делается наибольшим. Изоляторы с внутренней заделкой арматуры (рис. 2.5, б) имеют меньшие вес, высоту и несколько лучшие электрические характеристики по сравнению с изоляторами с воздушной полостью. Достигается это потому, что при внутренней заделке арматуры наибольшие напряженности наблюдаются в фарфоре, воздушная полость отсутствует, а арматура играет роль внутреннего экрана (см. § 1.6).

Опорные изоляторы, предназначенные для работы в открытых распределительных устройствах, имеют развитую ребристость для обеспечения необходимых разрядных характеристик при дожде.

Опорные штыревые изоляторы типа ОНШ выпускаются на напряжения 6—35 кВ и состоят из одного (рис. 2.6, а), двух или трех (рис. 2.6, б) фарфоровых тел, скрепленных с помощью цемента друг с другом и с арматурой. Крепление ошиновки и изоляторов осуществляется с помощью болтов. На напряжение 110, 150 и 220 кВ штыревые изоляторы собираются в колонки соответственно из трех, четырех и пяти изоляторов ОНШ-35.

Стержневые изоляторы для наружной установки типа ОНС выпускаются на напряжения до 110 кВ (рис. 2.7). Число и размеры ребер выбираются на основании опыта. При отношении вылета ребра a к расстоянию между ребрами b , равном примерно 0,5, мокро-разрядные напряжения при данном разрядном расстоянии получаются наибольшими.

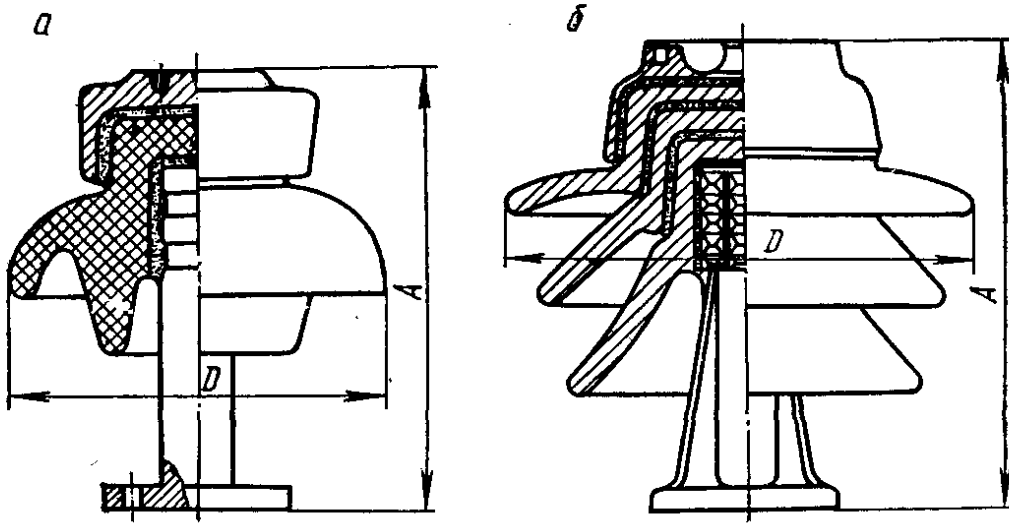
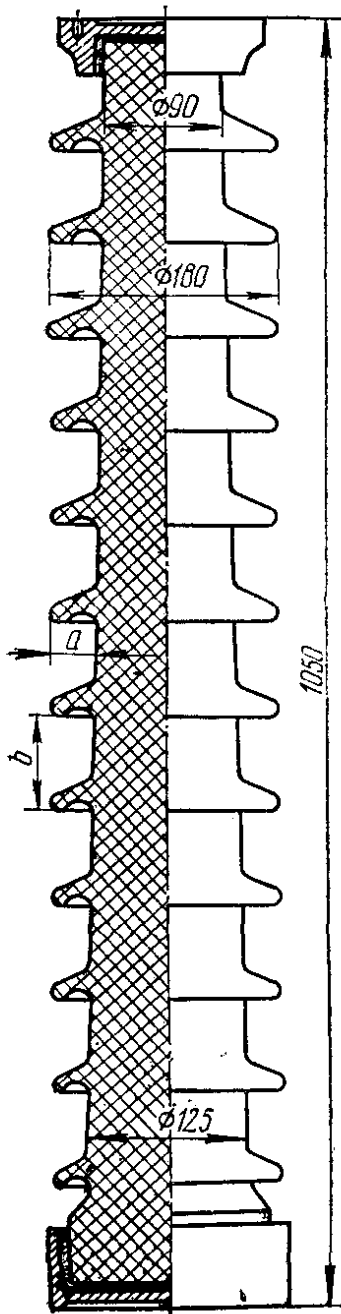


Рис. 2.6. Опорные штыревые изоляторы для наружной установки:
a — ОНШ-10-500; *б* — ОНШ-35-2000.

Применяются также стержневые опорные изоляторы с внутренней полостью. Диаметр таких изоляторов больше, чем сплошных стержневых, что обеспечивает их бóльшую механическую прочность. Однако у таких изоляторов возможны разряды во внутренней полости, для предотвращения которых внутренние полости герметизируют с помощью фарфоровых перегородок или заливают компаундом.



На напряжение 330 кВ и выше одиночные колонки изоляторов получаются очень высокими и не обеспечивают необходимую механическую прочность на изгиб. Поэтому при этих напряжениях применяют опорные конструкции чаще всего в виде конусообразного треножника из трех колонок изоляторов. При изгибающих усилиях изоляторы в таких конструкциях работают не только на изгиб, но и на сжатие. Напряжения по элементам высокой колонки опорных изоляторов, так же как и в подвесной гирлянде, распределяются неравномерно. Для выравнивания напряжения применяют тороидальные экраны, закрепляемые на верхнем элементе колонки. Основные характеристики опорных изоляторов приведены в табл. 2.3.

Проходные изоляторы на напряжение 6—35 кВ изготавливаются чаще всего фарфоровыми. Конструктивное их выполнение опреде-

Рис. 2.7. Стержневой опорный изолятор для наружной установки ОНС-110-300.

Табл. 2.3. Основные характеристики опорных изоляторов

Тип изолятора новый (старый)	Класс напря- жения, кВ	Высо- та, мм	Длина пути утеч- ки, см	Наи- боль- ший диа- метр фарфо- ра, мм	Межа- ничес- кая проч- ность, Н	Испытатель- ное напряже- ние 50 Гц, кВ (не менее)		Испы- татель- ное им- пульс- ное нап- ряже- ние, кВ
						в су- хом состоя- нии	под дож- дем	
ОФ-6-375 (ОА-6)	6	165	—	86	3675	36	—	60
ОФ-10-3000 (ОМЕ-10)	10	134	—	180	29400	47	—	80
ОНШ-10-500 (ШН-10)	10	190	22,5	160	4900	47	34	80
ОНШ-35-2000 (ИШД-35)	35	400	86	460	19600	110	85	195
ОНС-110-300 (СТ-110)	110	1050	168	200	2940	295	215	480
5ОНШ-35-2000	220	2000	450	460	2450	520	425	950

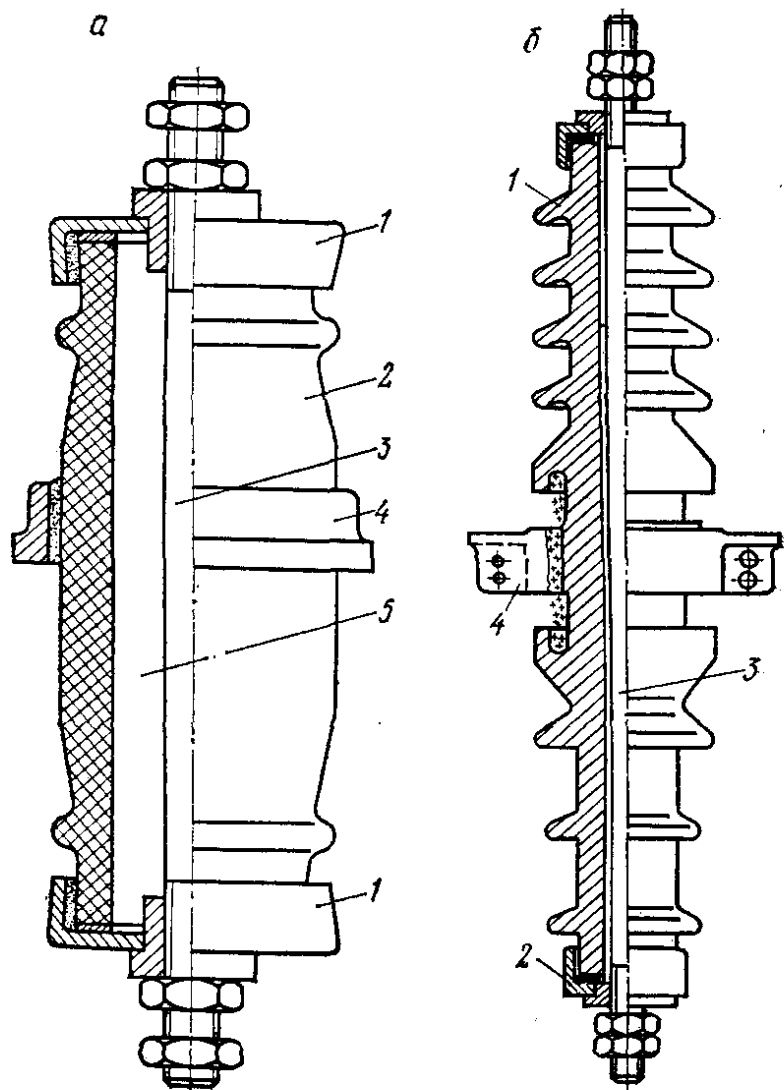
ляется напряжением, током, допустимой механической нагрузкой на изгиб и окружающей средой.

Изолятор (рис. 2.8) состоит из фарфорового тела цилиндрической формы 1, плотно скрепленного с помощью армированных на цементе металлических концевых колпачков 2 с токоведущим стержнем 3. Фланец 4 служит для крепления изолятора к стене здания или корпусу аппарата. Так же как и изоляторы других типов, проходные выполняются таким образом, чтобы напряжение пробоя было выше напряжения перекрытия вдоль поверхности. Напряжение пробоя фарфоровых проходных изоляторов зависит от толщины фарфора. Однако конструкция таких изоляторов практически определяется необходимой механической прочностью, расчетным напряжением перекрытия и мерами по устранению короны.

Изоляторы на 3—10 кВ выполняются с внутренней воздушной полостью 5.

Рис. 2.8. Проходные фарфоровые изоляторы:

а — на напряжения 6—10 кВ для внутренней установки; б — на напряжение 35 кВ сплошной конструкции для наружной установки.



Специальных мер для устранения возможности коронирования при таких напряжениях принимать не надо. При напряжениях 20—35 кВ возможно появление короны у стержня напротив фланца, где наблюдается наибольшая напряженность поля в воздухе. Для предотвращения коронирования изоляторы на такие напряжения изготавливаются без воздушной полости (рис. 2.8, б). При этом наружная поверхность фарфора металлизируется и соединяется со стержнем. Для устранения возможности появления разрядов у фланца фарфоровая поверхность под ним также металлизируется и заземляется. Напряжение возникновения скользящих разрядов от фланца вдоль поверхности фарфора и, следовательно, напряжения перекрытия по поверхности могут быть увеличены снижением поверхностной емкости. Для этого или увеличивают диаметр изолятора у фланца, или поверхность изолятора выполняют ребристой, располагая более массивные ребра вблизи фланца (см. § 1.6).

Изоляторы, предназначенные для ввода напряжения из одной среды в другую (воздух — масло и т. д.), выполняются несимметричными относительно фланца. Например, путь перекрытия в масле можно брать в 2,5 раза меньшим, чем в воздухе. Ввод, один конец которого находится в помещении, а второй — на открытом воздухе, изготавливается также несимметричным, наружная часть имеет более развитую ребристость для увеличения мокроразрядного напряжения.

2.1.4. Специальные изоляторы для районов повышенного загрязнения

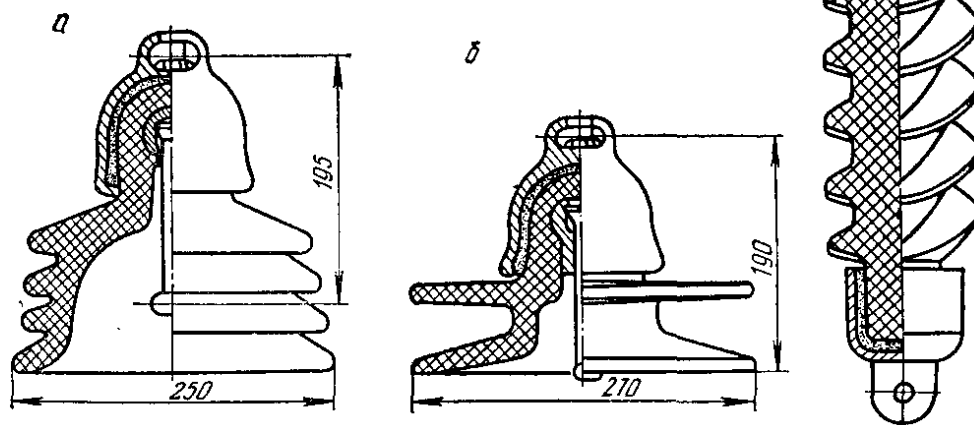
Напряжение перекрытия по поверхности загрязненных и увлажненных изоляторов зависит прежде всего от характера и интенсивности загрязнения. При значительных загрязнениях это напряжение может настолько уменьшиться, что обычные изоляторы будут часто перекрываться при рабочих напряжениях. Поэтому в сильно загрязненных районах целесообразно использовать специальные изоляторы. Как следует из выражения (1.38), для увеличения напряжения перекрытия при заданных параметрах загрязнения (химический состав, толщина слоя и т. д.) необходимо увеличение длины пути утечки L_y и уменьшение эквивалентного диаметра изолятора $D_э$. Кроме того, при конструировании специальных изоляторов принимают меры к тому, чтобы обеспечить хорошие аэродинамические показатели и самоочищаемость изолятора при дожде и ветре.

Характерные конструкции подвесных изоляторов для районов с загрязненной атмосферой приведены на рис. 2.9. Изолятор, показанный на рис. 2.9, б, применяется для натяжных гирлянд, он имеет повышенную длину пути утечки (440 мм) и хорошо очищается ветром и дождем. Изолятор, представленный на рис. 2.9, а, применяется для подвесных гирлянд. Стержневой подвесной изолятор (рис. 2.9, в) хорошо обмывается дождем, стекающим струей по винтовым ребрам. Имеются и другие типы специальных изоляторов для ВЛ и РУ.

Как показывает опыт, разрядные характеристики изоляторов в условиях загрязнения зависят от отношения длины пути утечки к строительной высоте изолятора: L_y/H . Чем больше это отношение, тем более развита поверхность изолятора. Для изоляторов нормаль-

Рис. 2.9. Подвесные изоляторы для загрязняемых районов:

а — ПФГ-5А для поддерживающих гирлянд;
б — ПФГ-6А для натяжных гирлянд; *в* — подвесной стержневой изолятор с винтовыми ребрами.



ного исполнения, предназначенных для работы в незагрязняемых районах (районах полевого загрязнения), обычно $L_y/H=2-2,5$. При повышенном загрязнении атмосферы целесообразно использовать специальные изоляторы с $L_y/H=2,5-3,5$.

2.2. ИЗОЛЯЦИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

2.2.1. Принципы выбора изоляции линий

Изоляция проводов линий электропередачи выполняется с помощью изоляторов и воздушных промежутков. Выбор изоляции определяется всем комплексом воздействующих напряжений с учетом влияния атмосферных факторов и требований техники безопасности. Перекрытие изоляции воздушных линий нельзя считать недопустимым явлением. Стремление исключить всякие перекрытия приводит к неоправданным затратам на усиление изоляции и устройств по ограничению перенапряжений. Техничко-экономические расчеты по минимуму приведенных затрат показывают, что целесообразно допустить небольшое число аварийных отключений ВЛ из-за перекрытий изоляции, которые возникают при совпадении неблагоприятных факторов (перенапряжение, снижение атмосферного давления, дождь или 100 %-ная влажность, ветер, раскачивающий провода, и т. д.). В таких расчетах при поисках оптимального варианта надо учитывать статистические закономерности пробоя изоляции, атмосферных условий, перенапряжений, влияние средств грозозащиты, АПВ, ущерб от аварийных отключений и еще ряд не

менее важных факторов и ограничений. Задача эта очень сложная и до конца не решенная. Существующие способы выполнения изоляции линий традиционно связаны с широким использованием различного типа изоляторов, собранных в гирлянды.

2.2.2. Гирлянды подвесных изоляторов

Для изоляции ВЛ 6—10 кВ достаточно одного штыревого или подвесного изолятора. Для изоляции линий 35 кВ и выше подвесные изоляторы собираются в гирлянды. Шарнирное соединение изоляторов обеспечивает гибкость гирлянды, что важно и для удобства монтажа, и для снижения механических нагрузок на элементы гирлянды при сильном ветре и обрыве проводов. Гирлянды, подвешенные вертикально на промежуточных опорах, нагружены весом проводов и возможными на них осадками и называются **поддерживающими**. **Натяжные** гирлянды на анкерных, угловых и концевых опорах расположены почти горизонтально вследствие больших продольных тяжений натянутых проводов. Подвеска проводов больших сечений осуществляется на сдвоенных и строенных гирляндах.

Количество изоляторов в гирлянде определяется типом изолятора, номинальным напряжением линии, материалом опоры, расположением гирлянды и степенью загрязненности атмосферы в районе прохождения ВЛ. Изоляция рассчитывается таким образом, чтобы свести к минимуму возможные перекрытия при перенапряжениях и рабочих напряжениях. Опыт показывает, что в районах полевого загрязнения перекрытия происходят чаще при одновременном воздействии перенапряжений и дождя, в загрязненных районах изоляция перекрывается, как правило, при рабочих напряжениях в условиях 100 %-ной влажности или слабых морозящих дождей. Соответственно существуют два разных метода выбора числа изоляторов в гирлянде.

Величина мокроразрядного напряжения перекрытия гирлянды $U_{м.р}$, как показывают исследования, прямо пропорциональна числу элементов n в гирлянде: $U_{м.р} = E_{м.р} H n$, где H — строительная высота одного изолятора; $E_{м.р}$ — мокроразрядный градиент в гирлянде. Для предотвращения перекрытия гирлянды при воздействии коммутационных перенапряжений $U_{м.р}$ должно быть больше амплитуды перенапряжения $U_{вн}$. Поэтому в районах полевого загрязнения число элементов в гирлянде может быть определено из расчетной кратности внутренних перенапряжений по соотношению

$$n \geq \frac{k_1 U_{вн}}{E_{м.р} H} = \frac{k_1 k_2 U_H}{E_{м.р} H \sqrt{3}}, \quad (2.3)$$

где $k_1 \approx 1,1$ — коэффициент, учитывающий влияние эксплуатационных условий на величину мокроразрядного напряжения перекрытия, а также возможное повышение напряжения относительно номинального линейного напряжения U_H и некоторый необходимый запас для перехода от разрядных напряжений к выдерживаемым; k_2 — расчетная кратность внутренних перенапряжений.

Приведенный метод выбора числа изоляторов в гирлянде не учитывает возможного влияния загрязнений. Так как в соответствии с выражением (1.38) напряжение перекрытия загрязненного изолятора (гирлянды) при длительном воздействии напряжения зависит от параметров загрязнения и пропорционально L_y , то при заданных параметрах загрязнения ρ_v и Δ вероятность перекрытия уменьшается при увеличении отношения $L_y/U_{\text{раб}}$. Поэтому в настоящее время в качестве основного критерия при выборе внешней изоляции принимается удельная эффективная длина пути утечки $\lambda_{\text{э}} = L_{\text{эф}}/U_{\text{л max}}$, т. е. отношение эффективной длины пути утечки

Табл. 2.4. Удельная эффективная длина пути утечки гирлянд изоляторов ВЛ и внешней изоляции открытых распределительных устройств (ОРУ) 3—750 кВ $\lambda_{\text{э}}$, см/кВ (не менее)

Степень загрязненности атмосферы	Номинальное напряжение для ВЛ, кВ			Номинальное напряжение для ОРУ, кВ	
	35	110—220	330—750	35	110—750
I	1,7	1,4	1,3	1,7	1,5
II	1,9	1,6	1,5	1,7	1,5
III	2,25	1,9	1,8	2,25	1,8
IV	2,6	2,25	2,25	2,6	2,25*
V	3,5	3,0	2,0	3,5	3,0** (ЗРУ)
VI	4,0	3,5	3,5	4,0 (ЗРУ)	3,5** (ЗРУ)

* Кроме 750 кВ.

** Кроме 500 и 750 кВ.

изоляции к наибольшему линейному напряжению $U_{\text{л max}}$. Чем больше принятая величина $\lambda_{\text{э}}$, тем меньше вероятность перекрытия изолятора или гирлянды. На основании многолетних опытных данных нормированы минимально допустимые величины $\lambda_{\text{э}}$ для районов с различной степенью загрязнения атмосферы (см. табл. 2.4).

Степень загрязненности атмосферы I—VI определяется по методике, изложенной в «Руководящих указаниях по выбору и эксплуатации изоляции в районах с загрязненной атмосферой»: I — районы полевого загрязнения, не подверженные естественным химическим и промышленным загрязнениям (лес, тундра, луга и т. д.); II — земледельческие районы, в которых применяются химические удобрения, а также промышленные районы за пределами минимального защитного интервала M , т. е. за пределами зоны, расположенной вблизи источника загрязнения, в которой степень загрязненности атмосферы III — VI; III — VI — загрязняемые зоны вблизи промышленных предприятий, морей, соленых почв и озер.

По опасности уносов для внешней изоляции промышленные предприятия подразделяются на пять групп: А, Б, В, Г и Д. Минимальный защитный интервал M и зоны с разной степенью загрязненности атмосферы в пределах M находятся в зависимости от группы предприятия по опасности уносов и расстояния от источника загрязнения.

Расчет степени и зоны загрязнения вблизи морей, соленых озер и засоленных почв проводится в зависимости от солености воды, расстояния от береговой линии или засоленного участка и т. д.

Количество изоляторов в гирлянде при нормированной величине $\lambda_э$ выбирается по формуле

$$n \geq \frac{U_{л \max} \lambda_э}{L_{эф}}, \quad (2.4)$$

где $L_{эф}$ — эффективная длина пути утечки одного изолятора.

Табл. 2.5. Число изоляторов в гирлянде ВЛ и РУ

Изолятор	Число изоляторов при номинальном напряжении, кВ							
	10	35	110	150	220	330	500	750
Для воздушных линий								
ПФ6-А	1	3	7	9	13	19	—	—
ПФ6-Б	1	3	7	10	14	20	27	—
ПС6-А	1	3	8	10	14	21	29	—
ПС12-А	—	3	7	9	13	19	26	—
ПС22-А	—	—	—	—	10	15	21	30
Для распределительных устройств								
ПФ6-А	—	4	8	10	14	20	29	—
ПФ6-Б	—	5	8	10	15	21	30	—
ПС6-А	—	4	9	11	16	22	33	—
ПС12-А	—	—	—	10	14	20	29	38

В табл. 2.5 приведены рассчитанные по формуле (2.4) и рекомендованные Правилами устройств электроустановок (ПУЭ) конкретные числа изоляторов для ВЛ и ОРУ, расположенных в зонах полевого загрязнения (I) на высоте до 1000 м. Число изоляторов в поддерживающих гирляндах 110—220 кВ увеличено на один, а на линиях 330—500 кВ — на два по отношению к расчетному для учета возможных повреждений изоляторов в эксплуатации.

В натяжных гирляндах число изоляторов берется на один или при напряжениях 220 кВ и выше несколько больше, чем в поддерживающих, так как натяжные гирлянды испытывают большие механические нагрузки и вероятность повреждения изоляторов в этих гирляндах выше.

Для загрязненных районов (II—VI) число изоляторов в гирлянде определяется в соответствии с расчетом по формуле (2.4). При этом для сильно загрязненных районов (IV—VI) следует проверить варианты с использованием специальных изоляторов или подвесных устройств типа V, Λ, Д и т. д.

На деревянных опорах при напряжениях 35—220 кВ в районах с I—III степенями загрязненности число изоляторов в гирлянде принимается на один меньше, чем на металлических и железобетонных, поскольку дерево работает как дополнительная изоляция

и увеличивает разрядное напряжение линейной изоляции при дожде на 15—20 %. В районах с IV—VI степенями загрязненности атмосферы подвески гирлянд изоляторов заземляются для уменьшения опасности возгорания деревянных опор под действием больших токов утечки при увлажнении загрязненных изоляторов.

Импульсная прочность линейной изоляции, выбранной по условиям (2.4) или (2.3), достаточна для линий всех классов напряжений, чтобы с учетом сравнительно недорогих средств грозозащиты обеспечить допустимый уровень грозоупорности линии. Усиливать изоляцию для повышения грозоупорности оказывается более дорогим и менее эффективным мероприятием, чем применение, например, тросовых защит от прямых ударов молнии на ВЛ 110—500 кВ или дугогасящих катушек, ликвидирующих перекрытия без отключения линии в сетях 35 кВ и ниже.

Линии на деревянных опорах имеют более высокую импульсную прочность изоляции, чем на металлических опорах. Специальных мер грозозащиты таких линий почти не требуется.

Сухоразрядные напряжения перекрытия гирлянд изоляторов обычно выше, чем разрядные напряжения при дожде, однако при сухой погоде важное значение приобретает то обстоятельство, что напряжение по элементам гирлянды распределяется неравномерно.

При промышленной частоте и незначительных активных токах утечки распределение напряжения по элементам гирлянды определяется протеканием емкостных токов. Емкостная схема замещения приведена на рис. 2.10. На этой схеме $C = 30 - 70$ пФ — собственная емкость тарельчатого фарфорового или стеклянного изолятора; $C_3 = 4 - 5$ пФ — емкость изолятора по отношению к земле; $C_{\text{п}} = 0,5 - 1$ пФ — емкость изолятора по отношению к проводу. Не допуская больших погрешностей, для гирлянд 35—220 кВ с одиночными проводами можно считать, что все емкости C_3 одинаковы, это же допущение принимается и для емкостей $C_{\text{п}}$. Допустим, что в данный момент провод положителен и токи в емкостях протекают в направлениях, указанных на схеме. При этом напряжения на емкостях $C_{\text{п}}$ по мере их удаления от провода непрерывно нарастают, а на емкостях C_3 соответственно убывают. В узловой точке 1 величина тока $i_{31} = \omega C_3 U_{31}$, оттекающего через емкость C_3 , значительно больше, чем величина подтекающего тока $i_{\text{п}1} = \omega C_{\text{п}} U_{\text{п}1}$, так как $C_3 > C_{\text{п}}$ и $U_{31} > U_{\text{п}1}$. Поэтому $i_1 > i_2$, и на первый от провода изолятор будет приходиться большее напряжение, чем на последующий. В гирляндах с числом изоляторов $n > 7 - 8$ притекающий, например, к узлу $n - 1$ ток $i_{\text{п}(n-1)}$ может стать больше, чем оттекающий ток $i_{3(n-1)}$, так как для этого узла хотя $C_{\text{п}} < C_3$, но $U_{\text{п}(n-1)} \gg \gg U_{3(n-1)}$. В итоге неравномерное распределение напряжения по элементам гирлянды выражается характерной кривой I (рис. 2.11).

Чем больше изоляторов в гирлянде, тем заметнее неравномерность распределения напряжения по ее элементам. При наличии 6 и более изоляторов в гирлянде на первый от провода изолятор приходится примерно 20—25 % полного фазового напряжения. Корона возникает на изоляторе при напряжениях выше 22—25 кВ. По-

этому при номинальных напряжениях 154 кВ и выше ближайшие к проводу изоляторы будут коронировать. Корона сопровождается потерями энергии, вызывает коррозию металлических деталей и сильные радиопомехи. В таких случаях принимаются специальные меры к выравниванию распределения напряжения вдоль элементов гирлянды.

Эффективным и распространенным приемом является использование защитной арматуры (экранов) в виде металлических колец,

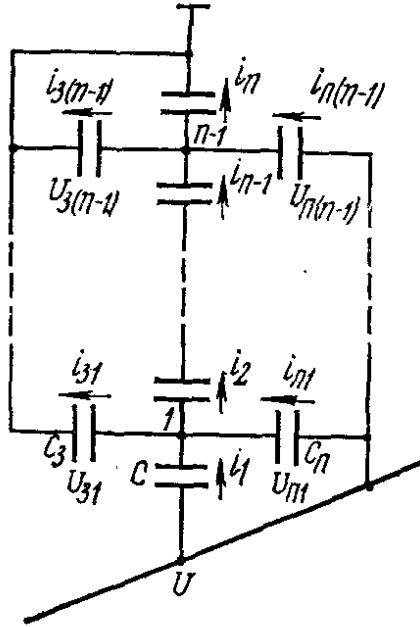


Рис. 2.10. Емкостная схема замещения гирлянды изолятора.

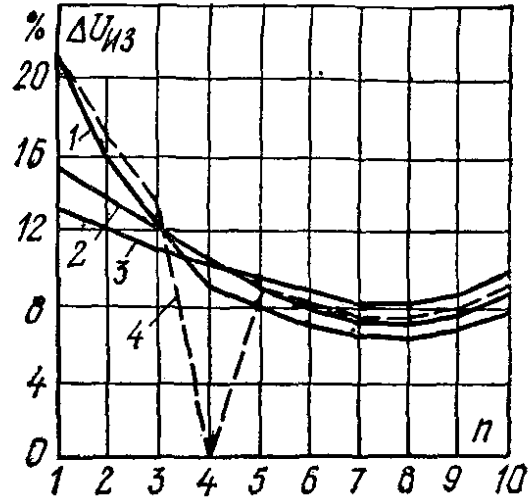


Рис. 2.11. Распределение напряжения по изоляторам гирлянды при разных видах арматуры:

1 — без арматуры; 2 — восьмерка; 3 — кольцо; 4 — без арматуры, но пробит четвертый изолятор; n — номер изолятора от провода.

овалов, восьмерок, укрепляемых на обоих концах или чаще на линейном конце гирлянды. Арматура увеличивает емкость изолятора относительно провода $C_{п}$, что приводит к выравниванию распределения напряжения вдоль гирлянды (кривые 2, 3 на рис. 2.11), и предохраняет фарфоровое тело изолятора от повреждения дугой при перекрытиях, так как разряд отводится в сторону от гирлянды. Однако при наличии быстродействующей релейной защиты от коротких замыканий эта функция защитной арматуры несущественна, поскольку за короткое время (0,1—0,2 с) дуга почти не повреждает изоляторы.

Выравнивание распределения напряжения вдоль гирлянды наблюдается и при использовании расщепленных проводов, так как при этом заметно возрастает $C_{п}$.

Разрядные характеристики гирлянд, снабженных арматурой, очень мало отличаются от аналогичных характеристик гирлянд без арматуры. При дожде распределение напряжений вдоль элементов гирлянды почти равномерное, так как определяется сильно возросшими токами утечки по поверхности изоляторов, а при сухой погоде интенсивная предразрядная ионизация у наиболее нагруженных по напряжению изоляторов также выравнивает распределение напряжения, и напряжения перекрытия при использовании арматуры почти не увеличиваются.

2.2.3. Выбор воздушных промежутков ВЛ

Естественной изоляцией проводов линий являются воздушные промежутки. Величина их должна быть скоординирована с электрической прочностью гирлянд изоляторов при рабочих напряжениях и внутренних и грозовых перенапряжениях. Во всех трех случаях воздушные промежутки выбираются такими, чтобы их разрядные напряжения были на 10—15 % больше, чем возможные воздействующие напряжения, или по крайней мере равны разрядным напряжениям по гирлянде. Необходимо также учитывать возможность отклонения гирлянды под действием ветра, гололеда, влияние неблагоприятных (вероятность 5 %) метеорологических условий на электрическую прочность воздушного промежутка.

Например, по условиям внутренних перенапряжений разрядное напряжение воздушного промежутка может быть принято равным

$$U_p \geq \frac{(1,1 - 1,15) k U_{\text{раб max}}}{\beta};$$

здесь β — поправка на метеорологические условия, равная 0,89; 0,84; 0,74 соответственно для высот 500, 1000 и 2000 м над уровнем моря (рекомендации ВНИИЭ); k — расчетная (допустимая) кратность внутренних перенапряжений.

При проверке прочности воздушного промежутка по условию воздействия атмосферных перенапряжений расчетная величина импульсного разрядного напряжения принимается равной 50 %-ному разрядному напряжению гирлянды при положительной волне.

По найденным расчетным величинам U_p и экспериментальным зависимостям $U_{\text{пр}} = f(S)$ для промежутков провод — опора, провод — провод находятся необходимые изоляционные расстояния S по воздуху для проводов ВЛ и соответствующие размеры опор. В некоторых случаях при выборе расстояний руководствуются также требованиями техники безопасности, учитывается появление под ВЛ транспорта, людей и т. д.

2.3. ВНЕШНЯЯ ИЗОЛЯЦИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

К изоляции распределительных устройств предъявляются требования высокой надежности, так как пробой изоляции в РУ станций и подстанций может привести к аварии и порче дорогостоящего оборудования. Следует, однако, заметить, что внешняя изоляция РУ работает часто в более благоприятных условиях, чем изоляция ВЛ: территория РУ надежно защищена от прямых ударов молнии, а набегающие по ВЛ волны грозовых перенапряжений ограничены по амплитуде с помощью трубчатых и вентильных разрядников. В закрытых РУ внешняя изоляция меньше загрязняется и увлажняется.

Выбор типа и числа подвесных и опорных изоляторов для ОРУ осуществляется, так же как и для ВЛ, по нормированной удельной

эффективной длине утечки λ_3 (см. табл. 2.4) в соответствии с соотношением (2.4). Число изоляторов в поддерживающих и натяжных гирляндах ОРУ 35 — 330 кВ принимается на 1—2, 500 кВ — 3, 750 кВ — на 4 больше, чем для одиночных гирлянд ВЛ (см. табл. 2.5).

Электрооборудование, предназначенное к установке на ОРУ, в зависимости от длины утечки внешней изоляции разделяется на три категории: А — нормальное исполнение; Б — усиленное; В — особо усиленное (ГОСТ 9920—75). Величины λ_3 для указанных категорий приведены в табл. 2.6.

Табл. 2.6. Допустимые величины λ_3 для электрооборудования ОРУ

Категория электрооборудования	Отношение длины пути утечки внешней изоляции к наибольшему рабочему линейному напряжению для электрооборудования, установленного в сетях, см/кВ (не менее)	
	с заземленной нейтралью	с изолированной нейтралью
А	1,50	1,7
Б	2,25	2,6
В	3,10	3,5

Как видно из таблицы, оборудование категории А устанавливается в районах со степенью загрязненности I—II, категории Б — соответственно III—IV, В — при степени загрязненности V. В тяжелых случаях загрязненности атмосферы (IV—VI степеней) рекомендуется выносить ОРУ из зоны повышенных загрязнений или строить закрытые распределительные устройства (ЗРУ). Размещение ОРУ 500—750 кВ в районах с IV—VI степенями загрязненности вообще не допускается.

Разрядное напряжение загрязненных изоляторов может быть увеличено покрытием их поверхности полупроводящей глазурью или водоотталкивающей смазкой. Полупроводниковая глазурь увеличивает токи утечки, благодаря чему поверхность изолятора подсушивается и разрядное напряжение при дожде значительно возрастает; водоотталкивающая смазка предупреждает образование водяной пленки, что также приводит к увеличению $U_{м.р.}$ Эти приемы еще не получили широкого распространения и находятся в стадии изучения.

Применение усиленной или специальной изоляции не исключает необходимости тщательного контроля за загрязнением изоляторов ВЛ и РУ и периодической их чистки.

В перспективе следует ориентироваться на усиление мер по устранению источников загрязнения, строительство закрытых и комплектных распределительных устройств, широкое использование газовой изоляции (см. § 3.6) и кабельных линий. При этом не только увеличивается надежность электроснабжения, но сохраняется окружающая среда, что становится все более ценным, особенно на территории предприятий и городов и вблизи их.

Минимальные изоляционные расстояния по воздуху распределительных устройств выбираются в соответствии с испытательными

напряжениями внешней изоляции РУ. Для гибкой ошиновки ОРУ учитывается также действие ветра, влияние температуры и давления. Во всех случаях должна быть обеспечена безопасность обслуживающего персонала при осмотрах и производстве работ.

3. РАЗРЯДЫ В ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ

3.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Понятие **внутренняя изоляция** относится к изоляционным конструкциям, так или иначе изолированным от внешней среды. Конструкции могут быть разными, например внутренняя изоляция кабелей отличается от изоляции трансформаторов. Однако существуют общие закономерности, характерные для всех ее видов. К конструкциям внутренней изоляции предъявляются практически одни и те же требования: обеспечение надежной изоляции при всех формах воздействующих напряжений; компактность при достаточной механической прочности и хороших тепловых характеристиках; долговечность; возможность контроля состояния и восстановления изоляции во время ремонта. При этом изоляция должна иметь приемлемую стоимость, быть технологичной в изготовлении и безопасной (нетоксичной, невзрывоопасной) в эксплуатации.

Надежность и компактность конструкций достигаются при использовании жидких, твердых и газовых диэлектриков, имеющих высокие электрические свойства, или чаще их сочетаний. **Комбинирование** высокопрочных диэлектриков вместе с различными приемами **регулирования электрических полей** являются основными путями, ведущими к удовлетворению перечисленных выше требований к внутренней изоляции. Жидкие компоненты способствуют хорошему теплоотводу, а твердые придают конструкции необходимую механическую прочность. Пропитка пористых или слоистых материалов жидкостями устраняет пустоты, делает изоляцию более однородной и тем самым существенно улучшает ее электрические характеристики. В некоторых видах изоляции для пропитки применяются также высокопрочные газы.

Практикой отработаны удачные сочетания твердых и жидких диэлектриков, традиционно широко применяемые для внутренней изоляции высоковольтного оборудования. К таким сочетаниям относятся, в частности, **маслобарьерная и бумажно-масляная** виды изоляции. Твердые целлюлозные материалы и нефтяные изоляционные масла, на основе которых эти виды изоляции выполняются, не дефицитны и сравнительно недороги. Это обеспечивает возможность массового производства силовых трансформаторов, конденсаторов, кабелей и других электрических аппаратов практически всех классов напряжений и любых мощностей. В последнее время

все большее распространение получают герметизированные комплексные распределительные устройства, в которых в качестве основной изоляции применяются **высокопрочные газы под давлением** (элегаз). Перспективно использование высокопрочных газов под давлением, а также глубокого вакуума в специальных конструкциях высоковольтных кабелей. Сочетание твердых диэлектриков с газом под давлением или глубоким вакуумом обладает почти всеми качествами внутренней изоляции.

Выравнивание электрических полей в конструкциях внутренней изоляции является также одним из самых эффективных способов улучшения ее показателей и поэтому составляет важный раздел высоковольтной техники. Расчет полей при сложных конфигурациях электродов и неоднородных средах в межэлектродном пространстве — задача далеко не простая и решается в настоящее время, как правило, приближенными методами, с использованием счетной техники. Находят по-прежнему применение и методы моделирования в электролитической ванне и на полупроводящей бумаге. Наиболее распространенные приемы регулирования полей во внутренней изоляции описаны при рассмотрении конкретных изоляционных конструкций.

В отличие от внешней изоляции, электрическая прочность которой жестко и непосредственно связана с атмосферными условиями, характеристики внутренней изоляции косвенно, а следовательно, более слабо зависят от окружающей среды и в этом плане являются более стабильными. Для полностью герметизированных систем (конденсаторы, кабели) эта зависимость сказывается только на условиях охлаждения. Для трансформаторов, высоковольтных вводов, внутреннее пространство которых сообщается с атмосферой через системы «дыхания», влияние окружающей среды постепенно будет проявляться в виде окисления, увлажнения, насыщения газом и загрязнения компонентов внутренней изоляции. Поэтому более совершенными являются устройства со специальной защитой от окисления и увлажнения или полностью герметизированные.

Так как в конструкциях внутренней изоляции неизменно присутствуют твердые элементы, то ее пробой сопровождается необратимыми изменениями, т. е. внутренняя изоляция в отличие от внешней не восстанавливается сама собой. Повреждение внутренней изоляции приводит к отключению устройства и последующему дорогостоящему ремонту. Поэтому ее надежность и запас прочности должны быть выше, чем у внешней изоляции. Характеристикой надежности внутренней изоляции является **средний срок службы** при заданных воздействиях, а не **среднее число перекрытий** в год, принятое для внешней изоляции.

Срок службы внутренней изоляции зависит от воздействия многих факторов: напряжений, температуры, механических нагрузок. Полный учет этих факторов для конкретных условий работы электрической установки практически невозможен, и расчет и конструирование внутренней изоляции ведутся обычно по наиболь-

шим допустимым значениям воздействия (напряженностям поля, температуры и т. д.). Накопление со временем изменений, ослабляющих изоляцию вследствие воздействий, равных или меньших по величине максимально допустимых, учитывается в некотором запасе прочности.

Атмосферные и внутренние перенапряжения, воздействующие время от времени на внутреннюю изоляцию, должны переноситься без пробоя или опасных локальных повреждений. Поэтому наряду с **длительной электрической прочностью** (напряжение или напряженность пробоя), определяющей способность изоляции выдерживать рабочие напряжения в течение всего принятого срока эксплуатации (20—30 лет), важно знать и **кратковременную электрическую прочность** изоляции, которая позволяет оценить способность ее противостоять кратковременно воздействиям заданной длительности и формы. Понятие «кратковременная электрическая прочность» неоднозначно и относится к следующим воздействиям:

1) аperiodическим импульсам грозовых перенапряжений длительностью 10—100 мкс; при определении импульсной кратковременной прочности применяется полная ($1,2/50$) или срезанная (срез при 2—3 мкс) волна (см. рис. 1.21);

2) импульсным воздействиям колебательной формы длительностью порядка 10^3 — 10^4 мкс, характерным для внутренних (коммутационных) перенапряжений;

3) непрерывному с заданной скоростью подъему напряжения до пробоя;

4) подаче напряжения толчком или с определенной скоростью с последующей выдержкой в течение заданного времени.

Два последних вида воздействий определяют возможности конструкций изоляции при сравнительно длительных или многократно повторяющихся переходных процессах.

Испытания изоляции напряжением промышленной частоты при одномоментной выдержке и импульсные испытания полной и срезанной волной являются основными видами заводских приемо-сдаточных испытаний, регламентированных ГОСТами. При испытаниях определяются не прочность, а соответствующие допустимые (выдерживаемые) напряжения.

Так как кратковременная и длительная прочность внутренней изоляции, а также характер пробоя зависят от времени и формы воздействующих напряжений, то вольт-секундные характеристики для ее образцов и конструкций имеют более сложный вид, чем для воздушных промежутков или конструкций внешней изоляции. Получить действительные значения кратковременной, а тем более длительной прочности и построить вольт-секундные характеристики для реальных конструкций внутренней изоляции практически невозможно — каждый пробой приводит, как уже отмечалось, к необратимому повреждению. Поэтому изучение электрических параметров характерных конструкций внутренней изоляции проводится на более простых образцах. В особо ответственных случаях выполняются и используются макеты.

Образцы, макеты и изделия всегда в чем-то отличаются друг от друга, процесс их пробоя подчиняется статистическим законам, и, следовательно, параметры внутренней изоляции подвержены значительному разбросу. Это еще более затрудняет получение достоверных данных. Обычно ограничиваются приближенными оценками средней и минимальной прочности и величины среднеквадратичного отклонения, стремясь из минимума результатов получить максимум пользы, широко применяя аппарат теории вероятностей и математической статистики.

Заводские испытания гарантируют изготовителю и заказчику работоспособность нового устройства при воздействии перенапряжений определенной амплитуды, формы и длительности. Вопрос о характере и степени изменений параметров внутренней изоляции при ее работе в течение десятков лет окончательно решается в процессе эксплуатации. Причины и закономерности естественного (при нормальных режимах работы и допустимых воздействиях) и ускоренного (при повышенной температуре, напряжении) старения, которые изучаются в лабораториях на образцах, помогают наметить пути увеличения долговечности конструкций и предусмотреть профилактические меры по поддержанию их параметров в необходимых пределах. Эти исследования и опыт эксплуатации показали, что старение изоляции проявляется не только и не столько в снижении ее кратковременной прочности, сколько в изменении угла диэлектрических потерь, сопротивления, емкости и других физико-химических характеристик. Именно эти величины являются важными, хотя и косвенными показателями состояния изоляции и поэтому обычно нормируются.

Физические основы профилактических испытаний внутренней изоляции, методы оценки ее состояния (диагностики) и восстановления — вопросы, с которыми инженер-эксплуатационник сразу же сталкивается в своей практической работе.

Хорошее знание физических процессов, приводящих к нежелательному изменению изоляции, методов ее профилактических испытаний и нормированных критериев оценки состояния необходимо для обеспечения надежной и длительной работы внутренней изоляции, и поэтому эти вопросы достаточно подробно рассматриваются в пособии.

3.2. РАЗРЯДЫ В ИЗОЛИРУЮЩИХ ЖИДКОСТЯХ

3.2.1. Характеристика жидких диэлектриков как изолирующей среды

Диэлектрические жидкости можно классифицировать по их природе и степени очистки. Наиболее часто в изоляционной технике используются нефтяные минеральные масла. Химический состав масел сложен и включает нафеновые, парафиновые и ароматические углеводороды в различных пропорциях. Применяются также

хлорированные углеводороды типа совол и совтол и синтетические кремнийорганические жидкости.

Химически чистые однородные жидкости получать и хранить трудно, и для технических целей они не используются. **Технически чистые** жидкости, используемые в больших количествах для изоляции, содержат твердые, жидкие и газообразные примеси, которые в значительной мере определяют электрические свойства жидкости.

Изолирующие масла и кремнийорганические жидкости относятся к неполярным жидким диэлектрикам, **относительная диэлектрическая проницаемость** ϵ которых лежит в пределах 2,2—2,5. Диэлектрическая проницаемость слабополярных жидкостей (совол, совтол) сильно зависит от температуры и частоты и изменяется в пределах 3—6.

Удельная объемная проводимость γ нейтральной жидкости высокой степени очистки может быть уменьшена до 10^{-16} См/м. Технически чистые нейтральные жидкости имеют $\gamma = 10^{-11} - 10^{-13}$ См/м. При невысоких напряженностях поля ток в жидкости вызывается перемещением ионов (ионная проводимость). Носителями тока являются также заряженные инородные включения (катафоретическая проводимость).

Ионная проводимость жидкостей определяется диссоциацией молекул основной жидкости и примесей и в значительной степени зависит от природы жидкости и температуры:

$$\gamma \approx A \exp \left[-\frac{B}{T} \right], \quad (3.1)$$

где A , B — постоянные для данной жидкости. Ионная проводимость полярных жидкостей обычно на несколько порядков выше, чем нейтральных.

Катафоретическая проводимость, вызываемая перемещением заряженных частиц, целиком зависит от природы, размеров и количества примесных включений и быстро увеличивается с ростом температуры. Выражение (3.1) справедливо и для катафоретической проводимости, и в хорошо очищенной жидкости два названных вида проводимости трудно различить. В загрязненных жидкостях наблюдается явление электроочистки: при длительном протекании тока заряженные частицы постепенно осаждаются на электродах и значения γ и, следовательно, тока уменьшаются.

При высоких предпробивных напряженностях поля ($E > 100$ кВ/см) в жидкостях наблюдается нарастание тока: $I = I_0 \exp(cE)$. Это, а также некоторые другие явления (дискретные импульсы тока, свечение жидкости у электродов и в объеме) свидетельствуют о возникновении в сильных полях процессов ударной ионизации электронами — **электронной проводимости**.

Диэлектрические потери в жидкости определяются суммой потерь проводимости и релаксационных потерь, которые характерны для полярных жидкостей. Для неполярных жидкостей для γ и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ справедливо соотношение $\gamma \approx \omega \epsilon \operatorname{tg} \delta$. Величина $\operatorname{tg} \delta$ нефтяного изоляционного масла при час-

тоте 50 Гц находится в пределах 0,003—0,005 и также зависит от степени чистоты жидкости.

Тепловыделение в жидкости при частотах, близких к 50 Гц, не приводит к заметному росту температуры при наличии конвективного теплообмена, и величина $\operatorname{tg} \delta$, так же как γ и ϵ , не имеет прямого влияния на напряжение пробоя жидкого промежутка.

Электрическая прочность $E_{\text{пр}}$ тщательно очищенных химически однородных жидкостей может превышать 1 МВ/см. Пробой в этом

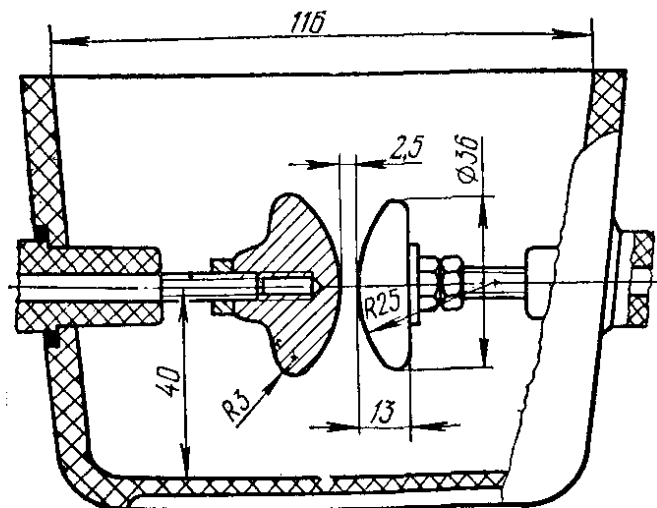


Рис. 3.1. Стандартный разрядник для определения $E_{\text{пр}}$ жидких диэлектриков.

случае носит характер электронного пробоя, и механизм его во многом сходен с механизмом пробоя газов. Первичные электроны в жидкости появляются в результате автоэлектронной эмиссии с катода. Образующийся объемный заряд искажает поле у катода, способствует дальнейшему нарастанию тока автоэлектронной эмиссии, развитию ударной ионизации и появлению вторичных электронов; образуется стример, и затем наступает пробой.

Электрическая прочность технически чистой жидкости редко превышает 300 кВ/см и, как правило,

лежит в пределах 200—250 кВ/см. Величина электрической прочности технически чистой жидкости определяется в равномерном поле как $E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}}/S$. При этом используются электроды специальной формы и расстояние между ними S нормируется (например, стандартный разрядник для определения $E_{\text{пр}}$ масел, см. рис. 3.1). Нормируются также условия проведения испытаний.

Параметр $E_{\text{пр}}$ служит для сравнения диэлектрических свойств разных жидкостей и их чистоты. Напряжение пробоя жидких промежутков в конкретных изоляционных конструкциях, связанных в особенности с неоднородными полями по величине $E_{\text{пр}}$, определить, как правило, не представляется возможным.

Невысокая электрическая прочность технически чистых изолирующих жидкостей объясняется наличием в них различного рода примесей — воды, твердых частиц, газовых пузырьков. Примеси могут находиться в жидкостях в разных количествах и в различных сочетаниях. Их поведение и влияние зависят от формы поля, напряженности, формы и длительности воздействующего напряжения, температуры, давления и т. д. Поэтому создать единую теорию пробоя технически чистых жидкостей — задача очень сложная. Существующие теории учитывают чаще какой-нибудь один фактор, например влияние воды, газа или твердых частиц. Практическая ценность этих теорий относительна, так как они не дают возможности определять разрядные напряжения в конкретных изолирующих конструкциях; для этих целей приходится прибегать к опытным

данным. Однако существующие теории помогают находить правильные решения при постановке и анализе результатов экспериментов, проектировании и эксплуатации жидкой и комбинированной изоляции, и некоторые из них будут кратко рассмотрены ниже.

3.2.2. Разряды в нефтяном изоляционном масле

По назначению нефтяные изоляционные масла подразделяются на трансформаторные, конденсаторные и кабельные. Масла эти различаются по своему химическому составу, степени очистки, вязкости, диэлектрической проницаемости. Однако основные закономерности при пробое всех масел одинаковы.

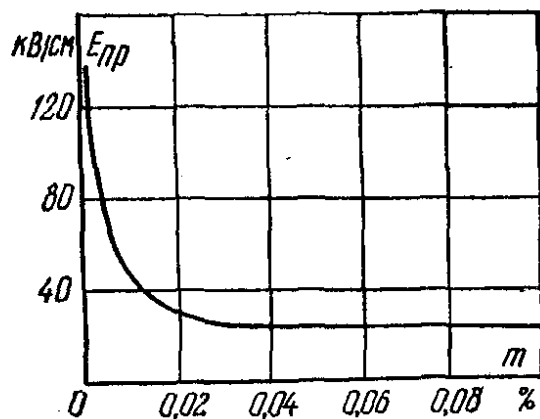
Напряжение пробоя масляного промежутка существенно зависит от формы поля. В однородных полях оно всегда значительно выше, чем в неоднородных. Поэтому в практических конструкциях всегда стремятся по возможности выровнять поле путем закругления выступов, кромок и т. п.

Пробивные напряжения масел в однородных полях, определенные, например, в стандартном разряднике при непрерывном подъеме напряжения, имеют очень большой разброс относительно средних значений. Кривая дифференциального распределения вероятностей пробоев близка к нормальному распределению (см. формулу (1.19) и рис. 1.18), и отклонения от среднего значения могут составить для плохо очищенных масел 40—50 %. По мере очистки масла разброс уменьшается. Значительно меньший разброс наблюдается в резконеоднородных полях. Вероятностный характер пробоев связан с произвольным (случайным) расположением примесей в межэлектродном пространстве, с вероятностными закономерностями их перемещения, деформации, образования цепочек и т. д. При неблагоприятном расположении частиц пробой наступает при минимальном напряжении.

Масло и вода образуют молекулярные растворы. В зависимости от температуры в масле может быть растворено от $4 \cdot 10^{-3}$ (20°C) до $4 \cdot 10^{-2}$ (80°C) % по объему воды. При больших концентрациях вода в масле будет находиться в эмульгированном состоянии или выпадать на дно сосуда.

Даже очень незначительные примеси воды резко снижают электрическую прочность масел (рис. 3.2). Особенно сильно снижает электрическую прочность эмульгированная вода в виде капелек. Еще больше снижается электрическая прочность увлажненных масел при наличии в масле гигроскопических частиц — волокон картона, бумаги, ткани. В сильно увлажненных маслах часто наблюдаются незавершенные частичные пробой.

Рис. 3.2. Типичная зависимость электрической прочности трансформаторного масла от весовой концентрации воды в масле.



Одна из теорий объясняет влияние влаги следующим образом: под воздействием поля капелька воды, имеющая высокую диэлектрическую проницаемость, вытягивается в направлении поля, принимая форму вытянутого эллипсоида. На концах эллипсоида напряженность поля сильно увеличивается, что может привести к развитию электронных лавин и пробоем. По представлениям других исследователей, под влиянием поля поляризованные увлажненные частички или капельки влаги движутся в направлении увеличенных напряженностей и скапливаются в межэлектродном пространстве.

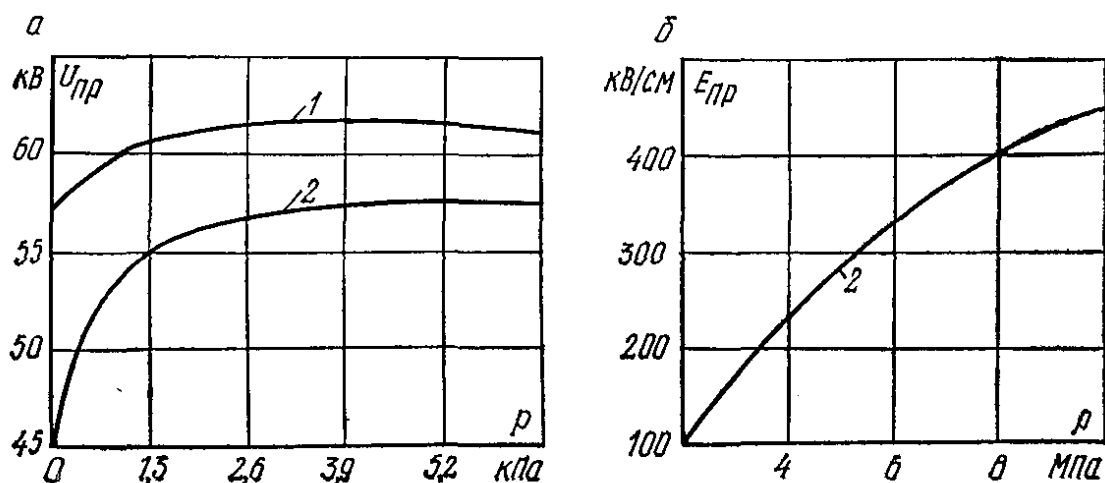


Рис. 3.3. Зависимость напряжения пробоя масла от внешнего давления.

Взаимодействуя друг с другом, частички образуют «мостики», способные перекрыть частично или полностью межэлектродное расстояние. Растяжение капелек, образование мостиков из твердых частиц и развитие разряда по их направлению в загрязненных маслах наблюдались непосредственно. Наблюдались также частичные разряды между частицами и электродом, между отдельными частицами и свечение у концов волокон и вытянутых капелек. Все эти явления способствуют развитию пробоя.

Из сказанного вытекает необходимость хорошей очистки масла от влаги и механических загрязнений перед заливкой в аппарат и тщательного контроля за качеством масла в процессе эксплуатации. Влага в масло может попасть и в процессе работы, например при «дыхании» негерметичного трансформатора с расширителем. К образованию влаги может привести также процесс старения и окисления масла.

Напряжение пробоя масляного промежутка в однородном поле зависит от внешнего давления. Эта зависимость различна для дегазированного и недегазированного масел. Дело в том, что масло при его соприкосновении с воздухом растворяет в себе газ. Например, в обычных условиях в 1 л масла может быть растворено до 100 см³ воздуха. На рис. 3.3, а, б показаны зависимости электрической прочности дегазированного (кривая 1) и недегазированного (кривые 2) масла от давления. Так как жидкость сжата молекулярными силами примерно до 200 МПа, при изменении давления в пределах нескольких мегапаскалей плотность жидкости не меняется. Поэто-

му изменение электрической прочности жидкости в зависимости от давления связывают с влиянием газовой фазы — пузырьков и полостей. Под влиянием поля высокой напряженности растворенный в масле газ выделяется в виде пузырьков. Выделению газа могут способствовать изменение температуры, давления при циркуляции масла, вибрация в масле твердых деталей. Разложение масла и появление пузырьков наблюдаются также при слабых частичных разрядах. Напряженность поля в пузырьке увеличена по отношению к средней напряженности в масле, что облегчает его пробой

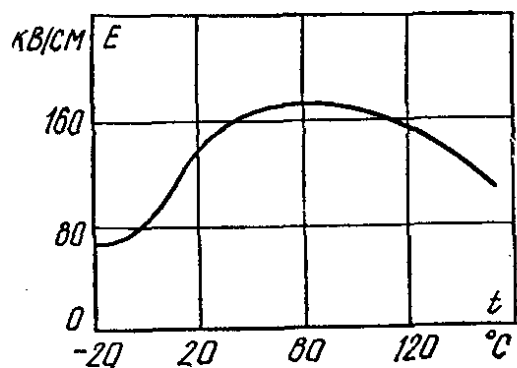


Рис. 3.4. Зависимость пробивной напряженности увлажненного масла от температуры.

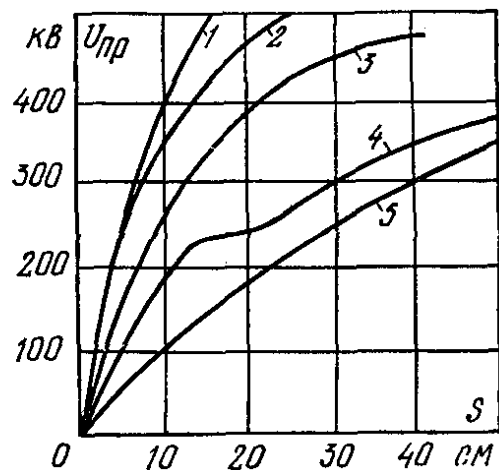


Рис. 3.5. Напряжение пробоя масляных промежутков шар — плоскость (кривые 1, 2, 3, 4 — соответственно для шаров диаметром 50, 25, 15 и 5 см) и стержень — плоскость (кривая 5).

и развитие частичных разрядов в пузырьке. Ионизированный пузырек представляет проводящее включение, поэтому он растягивается вдоль силовых линий поля, напряженность у его концов резко возрастает, что облегчает развитие ударной ионизации в масле и пробой.

В негерметизированных трансформаторах масло насыщено воздухом. В герметизированных конденсаторах, маслonaполненных кабелях тщательной дегазацией и применением систем повышенного давления можно значительно увеличить допустимые напряженности в изоляции.

Электрическая прочность сильно увлажненного масла заметно зависит от температуры (рис. 3.4). Рост прочности при увеличении температуры и максимум при 70–80 °C объясняются переходом эмульгированной воды в молекулярно растворенную. При температуре более 100 °C прочность начинает резко падать — появляется газ вследствие вскипания легкокипящих примесей (воды) и фракций масла.

Как видно из рис. 3.5, с увеличением степени неоднородности поля напряжение пробоя масляных промежутков существенно снижается и достигает минимальных значений в системе электродов стержень — плоскость. При этом в резконеоднородных полях уже не наблюдается заметных зависимостей пробивных напряжений от

количества и характера примесей, т. е. от электрической прочности масла, определенной в стандартном разряднике. Поэтому для технически чистого трансформаторного масла оценку пробивных напряжений промежутков стержень — стержень, стержень — плоскость можно делать по эмпирическим формулам: для промежутка стержень — плоскость $U_{пр} = 39S^{0,7}$ кВ_{мах}; для промежутка стержень — стержень $U_{пр} = 30S^{0,7}$ кВ_{мах} или в общем виде $U_{пр} = BS^m$, где S — расстояние между электродами; B, m — опытные коэффициенты.

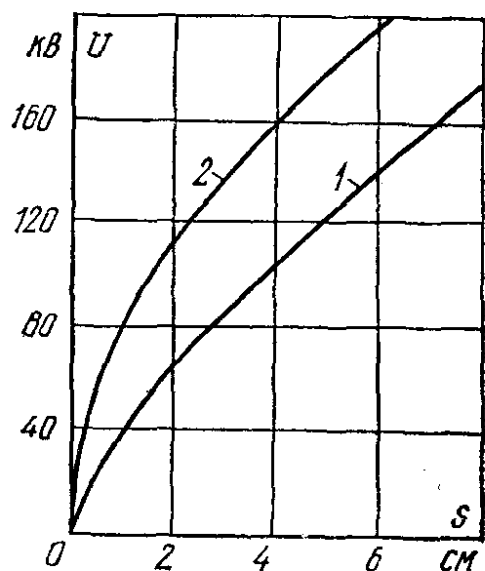


Рис. 3.6. Зависимость напряжения пробоя трансформаторного масла от расстояния для промежутка стержень — плоскость при положительной (1) и отрицательной (2) полярности стержня (амплитудные значения).

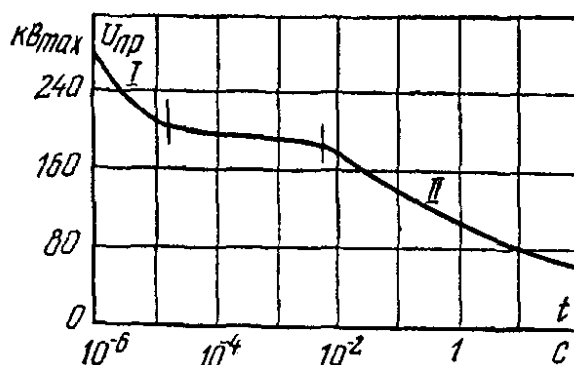


Рис. 3.7. Зависимость пробивного напряжения масла от времени воздействия напряжения.

Слабая зависимость $U_{пр}$ от степени загрязнения масла наблюдается также в слабонеоднородных полях при значительных расстояниях между электродами.

При постоянном напряжении в системе электродов стержень — плоскость в масле имеет место эффект полярности такой же, как и для воздушных промежутков (рис. 3.6).

Импульсная прочность масляных промежутков значительно выше, чем прочность при 50 Гц и при постоянном напряжении, и практически не зависит от количества и характера примесей. Коэффициент импульса $k_{и}$ при стандартных волнах для резконеоднородных полей лежит в пределах 1,4—1,5, а для однородных полей его величина достигает 3 и более. На импульсах также имеет место и эффект полярности. В системе стержень — плоскость пробивное напряжение при положительной полярности импульса ниже, чем при отрицательной.

Упрочнение масляных промежутков на импульсах и вообще при уменьшении времени воздействия напряжения в системах с однородным и слабонеоднородным полями объясняется тем, что процесс деформации капелек, пузырьков и образования цепочек из примес-

ных частиц требует времени. Чем меньше время воздействия напряжения, тем меньше и вероятность образования слабого звена, по которому развивается разряд. При очень малом времени воздействия напряжения порядка 10^{-5} — 10^{-7} с имеет место запаздывание разряда, подобно тому как это наблюдается в воздушных промежутках. Разброс пробивных импульсных напряжений достаточно велик (десятки процентов).

Зависимость напряжения пробоя масляного промежутка от времени воздействия напряжения можно наглядно проследить по вольт-секундным характеристикам, приведенным на рис. 3.7. Участок *I* соответствует чисто электрическому пробую масляного промежутка. Возникновение пробоя на участке *II* определяется сравнительно медленными электромеханическими процессами — образованием цепочек, перемещением и деформацией капелек и пузырьков, вскипанием легкокипящих примесей. Непрерывное снижение напряжения пробоя в диапазоне времени от 1 до 100 с и более особенно характерно для увлажненного и загрязненного масла. По мере роста степени очистки масла вольт-секундная характеристика становится более полой.

Чем выше скорость подъема напряжения, тем больше напряжение пробоя масляного промежутка. Эта зависимость естественно вытекает из приведенной выше вольт-секундной характеристики. Поэтому скорость подъема напряжения при испытании маслонеполненных аппаратов нормируется. Следует отметить сходство механизмов, приводящих к снижению $U_{пр}$ масла в однородных и слабонеоднородных полях при увеличении площади электродов, «активного» объема масла (объем масла между электродами, напряженность поля в котором близка к максимальной, например не меньше $0,9 E_{max}$), при увеличении времени воздействия напряжения или скорости замены (перемешивания, потока) масла в промежутке. Все эти условия приводят к росту вероятности образования «слабого звена» и, следовательно, способствуют возникновению пробоя, т. е. связаны со статистическими закономерностями пробоя масляных промежутков.

3.3. ТВЕРДЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

3.3.1. Общие сведения

Твердые диэлектрики широко распространены в электроизоляционной технике не только вследствие высоких электрических свойств, но и потому, что они используются в качестве конструктивных материалов. При создании и эксплуатации твердых изоляционных конструкций необходимо максимально использовать электрические, механические и термические возможности материала. Точный учет этих возможностей в конкретных конструкциях осложняется многими факторами (форма поля, воздействие перенапряжений, температуры, механических нагрузок, внешней среды и т. д.). Поэтому здесь, как, впрочем, и в других видах изоляции,

приходится в значительной мере ориентироваться на экспериментальные результаты исследований на образцах и моделях и результаты накопленного опыта. Однако знание электрических, механических, термических и других свойств различных твердых материалов облегчает задачу конструирования изоляции и в некоторых случаях позволяет произвести ее расчет.

Механические характеристики (прочность на разрыв, сжатие и изгиб, твердость, вибростойкость и т. д.) зависят от вида материала и всегда важны при его выборе для изоляции.

Тепловые свойства материала (нагревостойкость, теплопроводность) тесно взаимосвязаны с электрическими характеристиками и в значительной степени определяют срок службы, условия и надежность работы изоляционных конструкций.

Классы нагревостойкости для материалов (по ГОСТ 8865—70) приведены ниже:

Класс нагревостойкости Максимальная допустимая температура, °С	У	А	Е	В	Ф	Н	С
	90	105	120	130	155	180	Свыше 180

Удельная объемная проводимость твердых материалов лежит в пределах 10^{-8} — 10^{-16} См/м и зависит от температуры: $\gamma_T = \gamma_0 \exp[\alpha \cdot (T - 293)]$, где γ_0 — проводимость при 20 °С; γ_T — проводимость при данной температуре; α — температурный коэффициент, колеблется в пределах 0,01—0,04 в зависимости от вида материала. Рост проводимости наблюдается и при высоких напряженностях поля:

$$\gamma_E = \gamma_0 \exp [a (E - E_0)],$$

где γ_0 — проводимость в слабых полях (при $E < E_0$).

Проводимость в твердых диэлектриках, так же как и в жидкостях, определяется в основном перемещением ионов и зависит от вида диэлектрика, примесей, нарушений кристаллической решетки. При высоких напряженностях поля быстрое нарастание тока вызывается электронной проводимостью.

Поверхностная проводимость твердых материалов зависит от состояния поверхности, степени ее увлажнения и загрязнения и колеблется для одного и того же материала в пределах нескольких порядков. При этом токи утечки по поверхности иногда могут значительно превысить объемные токи.

Относительная диэлектрическая проницаемость неполярных ($\epsilon = 2$ —4) и слабополярных ($\epsilon = 3$ —6) твердых диэлектриков в допускаемых диапазонах температур меняется в сравнительно нешироких пределах.

Диэлектрическая проницаемость при переменном напряжении оказывает определяющее влияние на распределение напряженностей по слоям многослойного диэлектрика, и это часто используется для выравнивания поля и целесообразного распределения напряженностей (см. градирование изоляции в § 4.4).

Удельные потери p в диэлектрике при переменном напряжении выражаются формулой

$$p = \omega \varepsilon E^2 \operatorname{tg} \delta,$$

где ω — угловая частота, с^{-1} ; E — напряженность поля, В/см; δ — угол диэлектрических потерь.

Тангенс угла диэлектрических потерь, а следовательно, и удельные потери p_T с ростом температуры возрастают по экспоненциальному закону:

$$p_T = \omega \varepsilon E^2 (\operatorname{tg} \delta)_{T_0} \exp [\alpha (T - T_0)], \quad (3.2)$$

где $(\operatorname{tg} \delta)_{T_0}$ соответствует начальной условной температуре T_0 ; α — температурный коэффициент.

Пробой твердых изоляционных конструкций сопровождается обычно образованием сквозного канала или значительным разрушением структуры диэлектрика. Пробой может носить характер: быстрого лавинно-стримерного процесса — **электронный пробой**; нарастающего разогрева до температур, превышающих нагревостойкость материала с последующим его разрушением (проплавление, прогар), — **тепловой пробой**; сравнительно медленного процесса разрушения вследствие воздействия частичных разрядов в локальных, ослабленных участках твердой изоляции (газовые включения, примеси) — **ионизационный пробой**.

3.3.2. Тепловой пробой

Рост потерь в твердом диэлектрике при увеличении температуры приводит к дальнейшему разогреванию материала. С увеличением температуры возрастает и теплоотдача. Однако если при этом темп нарастания тепловыделения превысит темп нарастания отвода тепла, то может наступить необратимый процесс, который закончится или термическим разрушением материала, или пробоем его. Такой пробой называется **тепловым**.

Качественная теория теплового пробоя была предложена немецким ученым Вагнером. Допустим, тепловыделение в узком канале (рис. 3.8) определяется соотношением, вытекающим из формулы (3.2):

$$P_{T_1} = \omega \varepsilon E^2 (\operatorname{tg} \delta)_{T_0} \exp [\alpha (T - T_0)] S a, \quad (3.3)$$

а теплоотдача пропорциональна температуре и длине канала:

$$P_{T_2} = k (T - T_0) a.$$

Зависимости эти для разных напряжений $U_1 > U_2 > U_3$ изображены на рис. 3.9. Точка 2, для которой справедливо соотношение

$$\frac{\partial P_{T_1}}{\partial T} = \frac{\partial P_{T_2}}{\partial T},$$

определяет минимальное напряжение U_2 , при котором наступают тепловая неустойчивость и затем тепловой пробой данной конструкции. При меньших напряжениях, например U_3 , в точке 1 при температуре T_1 наступает тепловое равновесие, а точка 3 соответствует неустойчивому равновесию. При больших напряжениях, например U_1 , возникновение теплового пробоя неизбежно.

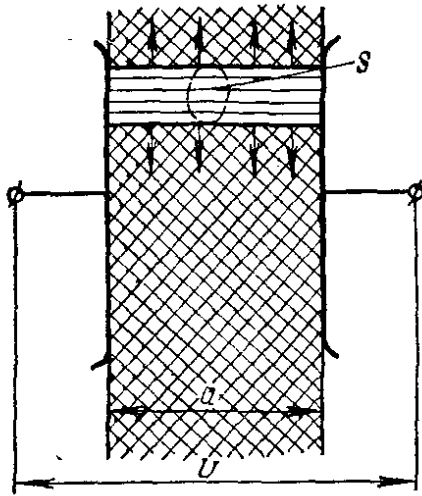


Рис. 3.8. Схема для расчета теплового пробоя.

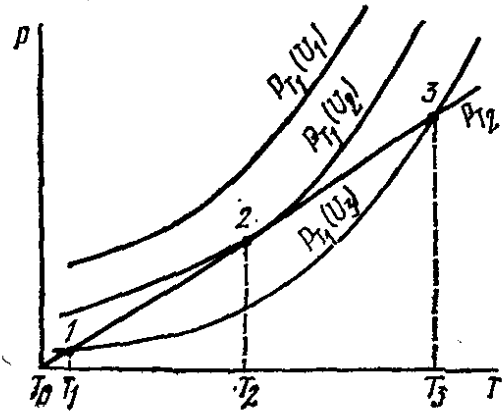
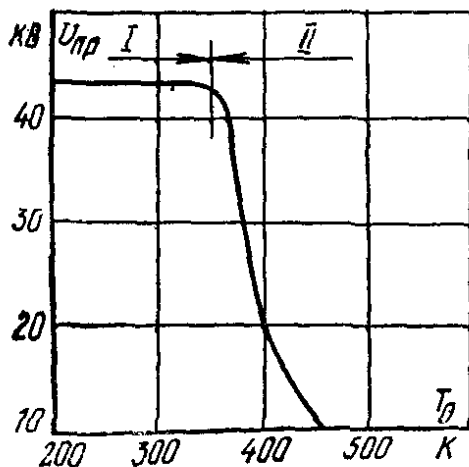


Рис. 3.9. Температурные зависимости мощности, выделяемой в канале (P_{T_1}), и мощности отводимой (P_{T_2}).

Из приведенных формул следует, что пробивные напряженности снижаются при увеличении толщины изоляции, уменьшении коэффициента теплопроводности k , увеличении $(\text{tg } \delta)_{T_0}$, ϵ , ω и a .

При возрастании температуры окружающей среды увеличивается $(\text{tg } \delta)_{T_0}$ и напряжение теплового пробоя снижается. Типичная зависимость $U_{\text{пр}} = f(T_0)$ приведена на рис. 3.10.

Величина $(\text{tg } \delta)_{20^\circ\text{C}}$ является электрической характеристикой, которая определяет возможности материала в отношении теплового пробоя. Значительный рост $(\text{tg } \delta)_{20^\circ\text{C}}$ изоляции в процессе эксплуатации, который возможен, например, при увлажнении изоляции, может привести в конечном итоге к тепловому пробояю. Для предотвращения развития теплового пробоя важно обеспечить низкую температуру охлаждающихся поверхностей T_0 и хороший теплоотвод. Это учитывается при проектировании и эксплуатации изоляции — применяются системы форсированного охлаждения, в тол-



ще изоляции предусматриваются каналы для циркуляции теплоносителей (масла, воздуха, водорода), уменьшается по возможности толщина изоляции и т. п. При высоких частотах для предупреждения теплового пробоя приходится использовать специальные ма-

Рис. 3.10. Зависимость напряжения пробоя фарфора от температуры окружающей среды: I — область температур, при которых тепловой пробой не наступает; II — область теплового пробоя.

териалы с очень малыми $\operatorname{tg} \delta$. При постоянном напряжении потери в диэлектрике определяются проводимостью, и вместо выражения (3.3) в этом случае следует записать:

$$P_{T_1} = E^2 \gamma_0 \exp[\alpha(T - T_0)] Sa.$$

В остальном теории теплового пробоя при постоянном и переменном напряжениях почти не отличаются друг от друга. Так как проводимость твердых диэлектриков очень мала, то возникновение теплового пробоя в здоровой, неувлажненной изоляции при постоянном напряжении маловероятно.

Приведенные выше расчеты $U_{\text{пр}}$ выполнены для установившихся, стационарных условий. При кратковременных воздействиях заданной формы вопрос о развитии теплового пробоя решается экспериментально, так как теоретическое решение этой задачи вызывает значительные трудности. Опыт показывает, что даже при напряжениях, намного превышающих $U_{\text{пр}}$, время, необходимое для развития теплового пробоя, исчисляется минутами. Однако есть указания и на то, что тепловые процессы могут играть в некоторых случаях заметную роль в развитии пробоя также при весьма кратковременных и даже импульсных воздействиях.

3.3.3. Электрический пробой и пробой при кратковременных воздействиях

Если обеспечить невысокую температуру диэлектрика путем хорошего теплоотвода в окружающую среду или низких потерь, напряжение теплового пробоя должно стремиться к бесконечности, т. е. тепловой пробой наступить не может. Маловероятно развитие теплового пробоя и при кратковременных воздействиях напряжения, например на импульсах. В таких условиях наблюдается **электрический пробой**. Напряженность равномерного поля, при которой наступает электрический пробой, определяется физической структурой материала и является его характеристикой. Для большинства диэлектриков эта напряженность лежит в пределах 10^6 — 10^7 кВ/см. Определяется она с помощью образцов специальной формы (рис. 3.11, а), исключающей возможность возникновения частичных разрядов, и иногда называется **внутренней** или **истинной электрической прочностью**. Следует, однако, иметь в виду, что «истинность» этой величины относительна. Совершенствование техники эксперимента приводит к дальнейшему увеличению «истинной» прочности.

Имеется много теорий электрического пробоя твердых диэлектриков. Хотя количественные выводы большинства этих теорий не совпадают с опытом на один-два порядка, наиболее признанные из них (Хиппеля, Фрелиха, Франца), по-видимому, правильно отражают физику процесса пробоя простых кристаллических структур и иногда дают близкие к опыту результаты.

Согласно этим теориям, энергия свободных электронов проводимости с ростом напряженности поля возрастает. Продвигаясь в толще диэлектрика, свободные электроны рассеивают свою энер-

гию взаимодействия с молекулами кристаллической решетки. При некоторой напряженности накапливаемая электроном энергия становится больше рассеиваемой энергии и возникают условия для непрерывного нарастания энергии электрона и ионизации, т. е. появления новых свободных электронов в результате нарушения структуры кристаллической решетки. Развитие пробоя носит ла-

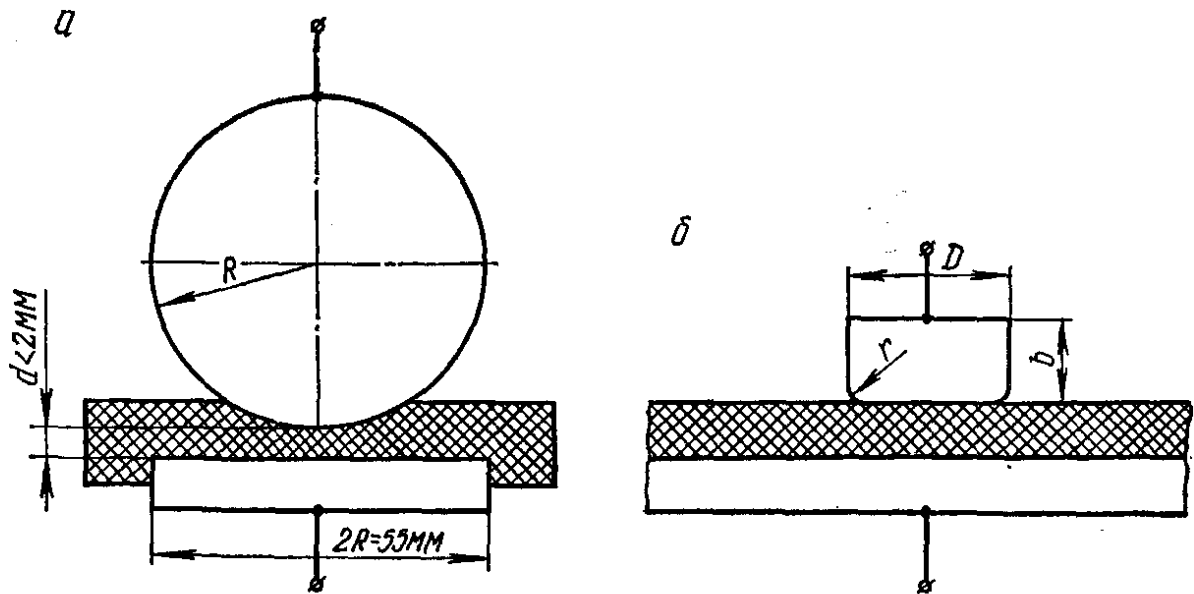


Рис. 3.11. Электроды для определения истинной (а) и средней (б) электрической прочности твердых диэлектриков. Приняты следующие размеры: $D=10, 25$ и 50 мм; $r=0,5; 2; 2,5$ мм соответственно; $b=25$ мм.

вино-стримерный характер. Пробой завершается проплавлением канала в диэлектрике.

В соответствии с описанным механизмом пробоя внутренняя электрическая прочность твердых диэлектриков не зависит от времени воздействия напряжения вплоть до очень малых значений времени ($t=10^{-7}$ с), напряжение пробоя возрастает пропорционально толщине диэлектрика и несколько снижается при повышении температуры диэлектрика. В очень тонких слоях (порядка микрон) должно наблюдаться значительное увеличение электрической прочности. Перечисленные закономерности подтверждаются опытом.

Напряжение электрического пробоя твердого диэлектрика снижается при прочих равных условиях с увеличением степени неоднородности поля. В системе острие — плоскость наблюдается эффект полярности — при отрицательном острие $U_{пр}$ возрастает на 20—30 %. $U_{пр}$ может быть увеличено использованием барьеров из высокопрочных пленок, заложенных в толщу материала вблизи острия. Последние два обстоятельства подтверждают лавинно-стримерный характер электрического пробоя.

Практически твердые диэлектрики работают в неоднородных полях. В этих условиях трудно полностью исключить влияние внешней среды и частичных разрядов. Поэтому для сравнения материалов, кроме понятия истинной электрической прочности, пользуются понятием **средней электрической прочности** $E_{ср}$, которая является характеристикой материала при определенных, но близких к тех-

нически реальным условиям. Находится $E_{\text{ср}}$ с помощью специальных электродов (рис. 3.11, б). При непрерывном подъеме напряжения вначале появляются разряды от края цилиндрического электрода в среде, в которую помещен испытуемый образец. Разряды вдоль поверхности еще больше искажают поле и облегчают пробой твердого материала. Это явление называется **краевым эффектом**. Действие краевого эффекта в реальных конструкциях и при постановке экспериментов может быть ослаблено подбором среды с определенными электрическими характеристиками (ϵ , γ , $E_{\text{пр}}$). Естественной мерой борьбы с краевым эффектом в практических конструкциях является увеличение радиуса закругления электродов.

В резконеоднородных полях увеличение пробивного напряжения наблюдается при длительностях импульсов 10^{-5} — 10^{-6} с. При многократных воздействиях импульсов пробой твердого диэлектрика возможен при амплитудах напряжения U_n , меньших, чем при однократном воздействии U_1 . Полный пробой развивается вследствие последовательных разрушений отдельных участков диэлектрика. Это явление называется **кумулятивным эффектом**, а отношение U_n/U_1 — **коэффициентом кумулятивности**. Коэффициент кумулятивности для твердых диэлектриков изменяется в пределах 1—0,5. Восстановление прочности или же отсутствие последствия ($U_n/U_1 \approx 1$) характерно, например, для некоторых стекол, компаундированной изоляции машин. В большинстве же изоляционных конструкций и материалов частичные разрушения при отдельных воздействиях накапливаются ($U_n/U_1 < 1$), и, следовательно, кумулятивный эффект должен быть учтен при проектировании изоляции и ее испытаниях (рис. 3.12).

При экспериментальном определении кратковременной прочности $U_{\text{пр}}$ твердых изоляционных конструкций обычно наблюдается значительный разброс величин, который связан чаще всего

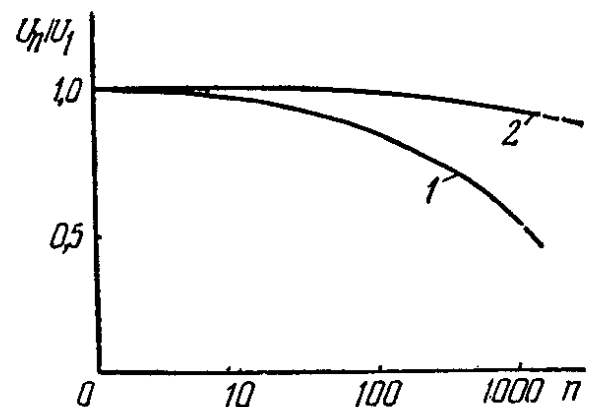


Рис. 3.12. Кумулятивный эффект при импульсных испытаниях твердой изоляции:
1 — $U_n/U_1 < 1$; 2 — кумулятивный эффект практически отсутствует: $U_n/U_1 \approx 1$.

с неоднородностью диэлектрика. Включения, нарушения структуры материала вызывают местные усиления поля, способствующие полному пробую. Увеличение площади S или объема испытуемого образца изоляции приводит к увеличению вероятности появления ослабленных мест, и среднее пробивное напряжение $\bar{U}_{\text{пр}}$, а также разброс пробивных напряжений σ по мере роста S уменьшаются. Поэтому результаты, полученные для небольших образцов и маке-

тов, нельзя переносить на подобные изоляционные конструкции больших размеров. Пользуясь специальными методами пересчета, можно дать приблизительную оценку $\bar{U}_{пр}$ и σ изоляции по результатам испытаний малых образцов и макетов.

3.3.4. Частичные разряды и ионизационный пробой твердой изоляции

В неоднородной твердой изоляции местные включения в виде газовых или просто инородных вкраплений, пор, полостей, трещин являются участками с пониженной электрической прочностью. По-

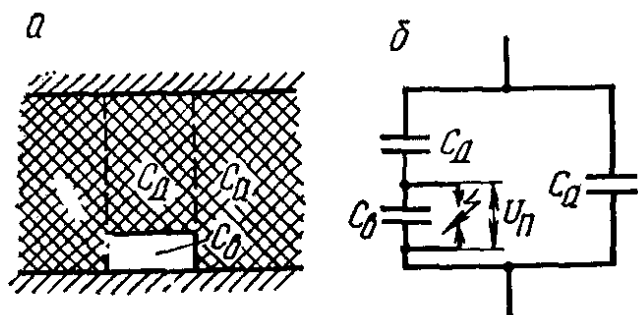


Рис 3.13. Диэлектрик с воздушным включением (а) и его эквивалентная схема (б).

ле в этих включениях или вблизи них может иметь повышенные напряженности по отношению к средним. Поэтому в неоднородной изоляции возникают ионизационные процессы в виде частичных разрядов (ЧР), короны или скользящих разрядов в отдельных элементах изоляции. Под их воздействием происходит постепенное местное разрушение изоляции, при этом часто такое раз-

рушение сопровождается выделением проводящих и химически активных веществ, например озона или окислов азота при ЧР в воздушной поре, которые способствуют дальнейшему развитию дефекта. В итоге наступает **ионизационный пробой** изоляции.

Эквивалентная схема диэлектрика с газовым включением (порой) (рис. 3.13) позволяет произвести оценку ионизационных процессов в подобных конструкциях. Допустим, каждый частичный разряд, который наступает при напряжении на поре $U_{пр}$, сопровождается нейтрализацией некоторого заряда: $\Delta Q = \Delta U_{пр} C_b$. Это приводит к изменению напряжения на электродах всего диэлектрика на некоторую величину

$$\Delta U_x = \frac{q_x}{C_x},$$

где $C_x = C_a + \frac{C_b C_d}{C_b + C_d}$ — емкость всего диэлектрика.

Величина q_x называется **кажущимся зарядом** единичного частичного разряда и связана с реализуемым зарядом ΔQ , $\Delta U_{пр}$ и C_b соотношением

$$q_x = \Delta U_x C_x = \Delta Q \frac{C_d}{C_d + C_b} = \Delta U_{пр} C_b \frac{C_d}{C_d + C_b}. \quad (3.4)$$

Так как емкости C_b и C_d , как правило, неизвестны, но известна емкость C_x , по рекомендации МЭК при оценке интенсивности единичного ЧР пользуются величиной q_x (Кл), которую можно найти, замерив с помощью специальных схем изменение напряжения на всем образце ΔU_x .

При переменном напряжении ЧР следуют в виде серий повторяющихся импульсов (рис. 3.14). Скачок напряжения на включении от $U_{пр.в}$ до напряжения погасания разряда во включении $U_{пог.в}$ происходит практически мгновенно ($t \approx 10^{-8}$ с). Поэтому, как видно из рис. 3.14, для симметричной пары, у которой $U_{пр.в}$ не зависит от полярности, число разрядов во включении за полупериод

$$n_{T/2} = \frac{2U_{вм} - 2U_{пог.в}}{U_{пр.в} - U_{пог.в}} = 2 \frac{U_{вм} - U_{пог.в}}{\Delta U_{пр}};$$

число разрядов в пóре за 1 с

$$n_{\sim} = 2fn_{T/2}.$$

Учитывая, что напряжения на включении и на всем диэлектрике C_x при отсутствии ЧР пропорциональны друг другу (см. рис. 3.14), можем записать:

$$n_{\sim} = 4f \frac{U - U_{п}}{U_{чр} - U_{п}}, \quad (3.5)$$

где

$$U = \frac{U_{вм}}{\sqrt{2}} \frac{C_{в} + C_{д}}{C_{д}} \quad (3.6)$$

есть действующее значение напряжения, приложенного к диэлектрику; $U_{чр}$, $U_{п}$ — действующие значения напряжения на всем образце: $U_{чр}$ — напряжение появления ЧР; $U_{п}$ — напряжение погасания ЧР.

При единичном ЧР во включении рассеивается энергия

$$\begin{aligned} W_{чр} &= \frac{C_{в} U_{пр.в}^2}{2} - \frac{C_{в} U_{пог.в}^2}{2} = C_{в} \Delta U_{пр} \frac{U_{пр.в} + U_{пог.в}}{2} = \\ &= \Delta Q \frac{U_{пр.в} + U_{пог.в}}{2}. \end{aligned}$$

Переходя к напряжению на C_x , при $U_{пог.в} \approx (0,4-0,6) U_{пр.в}$ с учетом выражений (3.4) и (3.6) получим для примерных оценок

$$W_{чр} \approx q_x U_{чр}.$$

При этом мощность потерь при ЧР в рассматриваемом включении

$$P_{чр} = n_{\sim} W_{чр} \approx 4f \frac{U - U_{п}}{U_{чр} - U_{п}} q_x U_{чр}. \quad (3.7)$$

Из соотношения (3.7) видно, что мощность потерь на ЧР во включении нарастает пропорционально частоте f и величине приложенного к диэлектрику напряжения U . Так как $n_{чр} = f(U)$ при возрастании U увеличивается дискретно, функция $P_{чр} = f(U)$ должна также иметь дискретный характер.

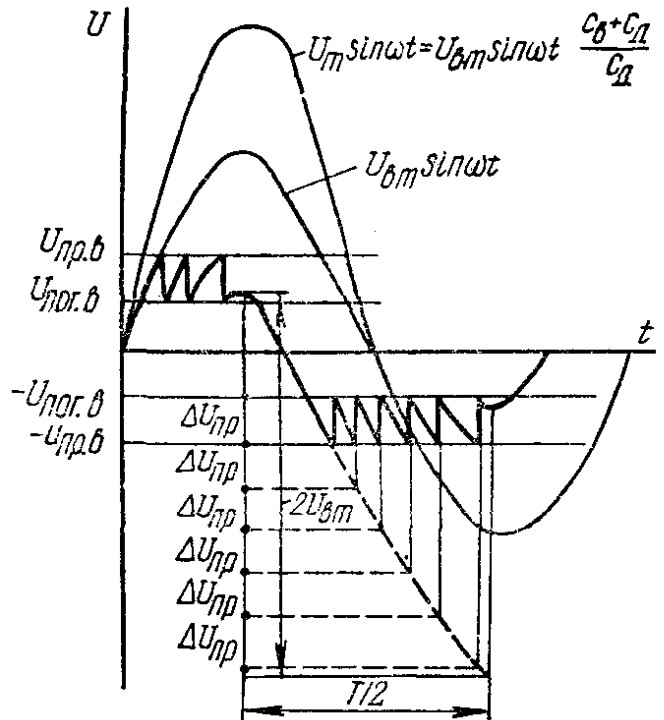


Рис. 3.14. Изменение напряжения на газовом включении при ЧР.

В реальных конструкциях изоляции ЧР могут происходить одновременно в большом числе включений разных размеров и, возможно, различных по природе. Поэтому мощность ЧР оценивают по средним величинам числа ЧР в секунду $n_{\text{ср}}$ и кажущегося заряда единичного ЧР $q_{\text{ср}}$:

$$P_{\text{ЧР}} \approx n_{\text{ср}} W_{\text{ср}} \approx n_{\text{ср}} q_{\text{ср}} U_{\text{ЧР}} \approx I_{\text{ср}} U_{\text{ЧР}}.$$

Величина $I_{\text{ср}} = n_{\text{ср}} q_{\text{ср}}$ измеряется в амперах, называется **средним током ЧР** и используется для характеристики интенсивности ЧР; $n_{\text{ср}}$, $I_{\text{ср}}$, $U_{\text{ЧР}}$, так же как и $q_{\text{ср}}$, могут быть определены с помощью специальных схем регистрации ЧР.

В твердой изоляции с ростом напряжения вначале возникают ЧР слабой интенсивности ($q_x = 10^{-12} - 10^{-14}$ Кл) — **начальные**. Эти ЧР неустойчивы, могут самопроизвольно затухать и появляться вновь при длительном воздействии напряжения возникновения начальных ЧР $U_{\text{н}}$. Начальные ЧР представляют электронные лавины, развивающиеся во включениях или в местах резкого усиления поля (неровности на электродах, неоднородности в толще диэлектрика и т. д.), и приводят к медленному (тысячи часов и более) разрушению изоляции.

Если продолжать повышать напряжение на изоляции ($U > U_{\text{н}}$), то при некотором напряжении интенсивность ЧР резко увеличивается (q_x и $I_{\text{ср}}$ возрастают на 3—4 и более порядков). Эти ЧР называются **критическими**, а напряжение их возникновения $U_{\text{кр}}$ — **напряжением критических ЧР**. Критические ЧР представляют чаще всего сравнительно мощные стримерные разряды ($q_x = 10^{-6} - 10^{-9}$ Кл), разлагающие некоррозионостойкие органические материалы с выделением газа и образованием полостей, трещин и каналов. Даже кратковременное существование критических ЧР недопустимо, так как они могут привести к полному пробое изоляции за несколько минут и даже секунд. Начавшись при повышенном напряжении, интенсивные ЧР будут продолжаться и при значительном снижении напряжения, например ниже напряжения возникновения начальных ЧР.

Частичные разряды и ионизационный пробой развиваются при длительном воздействии напряжения в твердых изоляционных конструкциях, выполненных из эпоксидных смол и компаундов, в полимерных материа-



Рис. 3.15. Образование дендрита в полиэтилене.

Рис. 3.16. Распределение напряжения после пробоя газового включения при постоянном напряжении.

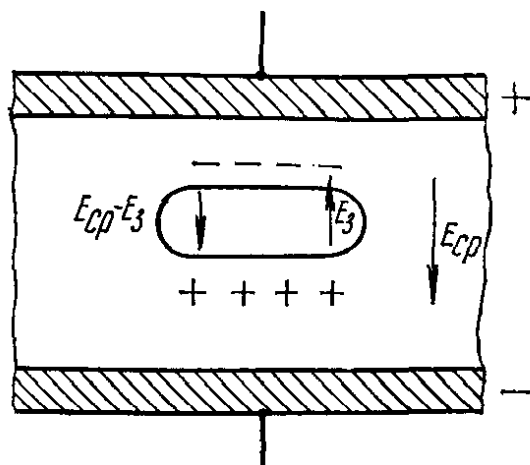
лах, в многослойной и монолитной изоляции машин, в резиновой и других видах твердой изоляции. Например, в полиэтиленовой изоляции разряд возникает от острого края электрода или воздушного включения в виде прорастающих древовидных каналов (дендритов)

(рис. 3.15). Рост каналов, как правило, связан с развитием ЧР, при этом интенсивность ЧР тем больше, чем больше длина каналов. При напряжении, недостаточном для полного пробоя, развитие сильно разветвленного дендрита в резконеоднородном поле может приостановиться, однако при повышении напряжения (перенапряжениях, импульсных воздействиях) каналы будут продолжать расти, что в конечном итоге приведет к электрическому или тепловому пробоям. В изоляции со слабонеоднородным полем возникший дендрит прорастает непрерывно до полного пробоя.

При постоянном напряжении опасные ЧР развиваются при значительно более высоких напряженностях поля, чем при переменном. Пробой газового включения при постоянном напряжении вызывает перераспределение зарядов, и напряжение на включении резко падает (рис. 3.16). Восстановление напряжения на включении происходит медленно (десятки секунд, минуты), так как стекание ионов определяется проводимостью диэлектрика, которая очень мала; ЧР повторяются редко, разрушающее их действие на несколько порядков меньше, чем при соответствующем переменном напряжении. Поэтому допустимые рабочие напряженности в изоляционных конструкциях при постоянном напряжении могут быть значительно больше, чем при переменном.

Частота ЧР и, следовательно, их разрушающий эффект при постоянном напряжении растут при увеличении проводимости диэлектрика. Из этого следует, что в установках высокого постоянного напряжения особенно важно использовать изоляцию с малой удельной проводимостью и не допускать ее увлажнения и перегрева.

Импульсные перенапряжения не приводят к быстрому развитию ионизационного пробоя. Однако в момент импульсного воздействия наблюдаются вспышки ЧР, которые при многократном повторении импульсов могут привести к значительному ухудшению характеристик изоляции. Во избежание такого кумулятивного эффекта импульсные воздействия на изоляцию должны быть ограничены по амплитуде и частоте. Это обстоятельство должно учитываться, например, при выборе формы, величины и длительности воздействия испытательных напряжений.



3.3.5. Некоторые виды твердой изоляции

Электрические и другие характеристики твердой изоляции зависят от ее вида и конкретного исполнения. Разнообразие используемых материалов и конструкций практически исключает возможность подробного рассмотрения большого числа примеров. Ограничимся кратким описанием технологии изготовления и оценкой кратковременной и длительной прочности композиционной изоляции на основе слюды, которая широко используется в высоковольтных электрических машинах.

Изоляция на основе слюды выполняется из наполнителя в виде щипаной слюды или слюдинита на подложке из бумаги или стеклоткани и склеивающих связующих.

Широко распространенная **компаундированная** микалентная изоляция изготавливается из микаленты (слой щипаной слюды, оклеенный с двух сторон тонкой бумагой), плотно намотанной вполнахлеста на проводник. Пропитка битумными компаундами, сушка и опрессовка под вакуумом и при повышенной температуре придают изоляции требуемую однородность, а также механическую и электрическую прочность. Недостатком компаундированной изоляции является ее **термопластичность**, т. е. размягчение связующего компаунда при повышенной ($100\text{—}130\text{ }^\circ\text{C}$) температуре. При этом возможно перетекание компаунда, расслоение изоляции и образование пустот. Кратковременная прочность микалентной изоляции лежит в пределах $10\text{—}20\text{ кВ/мм}$ и характеризуется значительным разбросом величин ($\sigma \approx 15\text{—}20\%$). Со временем под воздействием комплекса эксплуатационных факторов прочность уменьшается, однако компоненты изоляции устойчивы к воздействию сравнительно интенсивных ЧР ($q_x \leq 10^{-9}\text{ Кл}$), и при рабочих напряжениях, обычно не превышающих $2\text{—}3\text{ кВ/мм}$, срок службы компаундированной изоляции достаточно велик ($10\text{—}30\text{ лет}$).

Импульсная прочность новой микалентной изоляции выше кратковременной прочности при промышленной частоте в $1,5\text{—}2$ раза, но у изоляции, длительно находившейся в эксплуатации, прочность на импульсах может стать равной прочности при промышленной частоте и даже меньше ее.

В последнее время в мощных высоковольтных машинах применяются более новые виды **терморезактивной** композиционной изоляции, в которой в качестве связующего применяются эпоксидные компаунды и лаки, не размягчающиеся при рабочих температурах после термической обработки и полимеризации. Эти виды изоляции («Монолит», «Слюдотерм» и др.) при повышенных по сравнению с компаундированной изоляцией электрических и термических характеристиках являются и более устойчивыми к длительным эксплуатационным воздействиям: не расслаиваются и не растрескиваются в процессе работы, меньше подвержены действию ЧР. Применение новых эпоксидных смол, отвердителей и пропитывающих составов без растворителей должно привести к дальнейшему улучшению характеристик и долговечности терморезактивной изоляции.

3.4. МАСЛОБАРЬЕРНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

3.4.1. Маслобарьерная изоляция и ее кратковременная электрическая прочность

В силовых трансформаторах, маслonaполненных вводах и других аппаратах часто применяется изоляция, в которой масляные промежутки чередуются с твердыми перегородками — барьерами. Использование барьеров увеличивает разрядные напряжения в масле и в однородных и неоднородных полях. В сравнительно одно-

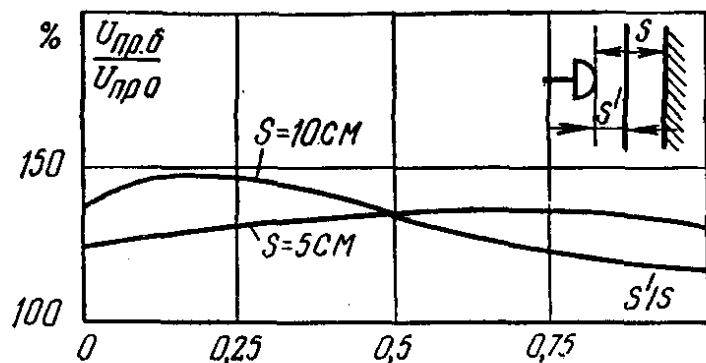


Рис. 3.17. Изменение напряжения пробоя (минимальные значения) маслобарьерной изоляции в зависимости от места установки тонкого барьера. Частота 50 Гц, поле близко к однородному:

$U_{пр.б}$ — пробивное напряжение с барьером;
 $U_{пр.0}$ — без барьера.

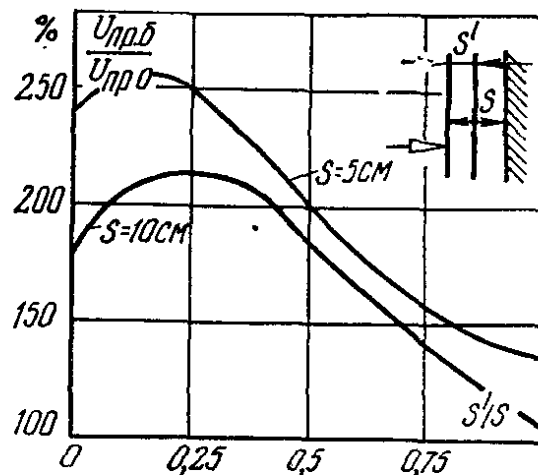


Рис. 3.18. Изменение напряжения пробоя маслобарьерной изоляции в зависимости от места установки тонкого барьера. Частота напряжения 50 Гц, резконеоднородное поле.

родных полях наблюдается упрочнение до 30—50 % при промышленной частоте, которое слабо зависит от места расположения барьера (рис. 3.17). Объясняется оно тем, что барьер препятствует образованию цепочек из примесей, способствующих разряду. В неоднородных полях наибольшее упрочнение наблюдается при установке барьера на расстоянии $S' = 0,1—0,25S$ от электрода с меньшим радиусом кривизны. При этом, как следует из рис. 3.18, в системе стержень — плоскость повышение пробивного напряжения может быть 2—2,5-кратным. Действие барьера в масле в резконеоднородных полях можно объяснить по аналогии с действием барьера в газовой промежутке: распределенный по барьеру объемный заряд выравнивает поле (см. рис. 1.17).

При импульсах применение барьеров в однородных и слабонеоднородных полях неэффективно. В резконеоднородных полях наблюдается упрочняющее действие барьера и на импульсах.

Упрочнение изоляционной конструкции с маслом достигается и при покрытии тонким слоем (не более 1—2 мм) твердого материала электрода с меньшим радиусом кривизны. **Покрyтия**, так же как и барьеры, препятствуют образованию устойчивых цепочек из примесей. Их применение наиболее эффективно в слабонеоднородных полях, когда увеличение прочности в результате использования покрытия может достигать 70 %. При импульсных напряжениях и в

резконеоднородных полях применение покрытий не дает положительного эффекта.

В резконеоднородных полях иногда применяется изолирование, которое отличается от покрытия тем, что толщина слоя твердого диэлектрика, покрывающего электрод с меньшим радиусом кривизны, сравнима с междуэлектродным расстоянием. Изоляция отводов обмоток трансформаторов, намотка на токоведущий стержень проходных маслонаполненных изоляторов — примеры применения изо-

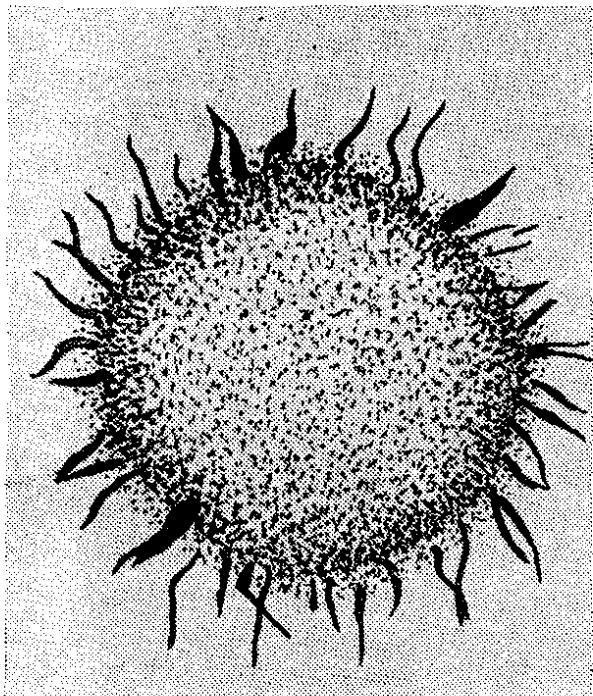


Рис. 3.19. «Черные следы» на карто-
не в результате воздействия критиче-
ских ЧР.

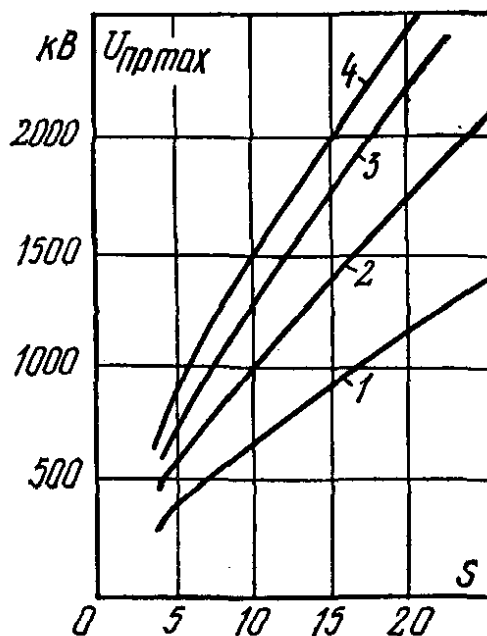


Рис. 3.20. Зависимость $U_{\text{пр max}}$ мас-
лобарьерной изоляции от расстояния
между обмотками S :

1 — $f=50$ Гц, $t=1$ мин; 2 — $t=600/1200$ мкс;
3 — импульс 1,5/40; 4 — срезанный импульс
при $t=2-3$ мкс.

лирования. Изолирование в определенной мере выравнивает поле и уменьшает максимальную напряженность в масле, что и является причиной упрочняющего эффекта изолирования в резконеоднородных полях.

При кратковременном воздействии напряжения появление частичных пробоев масляного промежутка от электрода к барьеру или между барьерами в маслобарьерной изоляции соответствует ЧР с зарядом $q_x = 10^{-5} - 10^{-7}$ Кл. Такие ЧР интенсивно разлагают масло и целлюлозу и оставляют на поверхности бумаги или картона нитевидные «черные следы» (рис. 3.19) обугленной целлюлозы. Эти изменения необратимы, след имеет повышенную проводимость и сильно искажает поле, способствуя развитию разряда вдоль барьера. Поэтому за напряжение пробоя маслобарьерной изоляции обычно принимают не напряжение сквозного пробоя, а напряжение, при котором происходит пробой масляного канала. Наступление пробоя канала может быть зарегистрировано с помощью схем регистрации ЧР. Такой пробой в реальных конструкциях изоляции недопустим даже однократно, например при испытаниях или при воздействии перенапряжений.

Изоляция мощных силовых трансформаторов высокого напряжения состоит из ряда масляных каналов, разделенных барьерами. При испытаниях моделей такой изоляции чаще всего пробивается первый канал, отделяющий обмотку меньшего радиуса от первого барьера. Зависимости пробивного напряжения маслобарьерной изоляции от расстояния между обмотками НН и ВН при ширине первого масляного канала в пределах 15—20 мм приведены на рис. 3.20.

Для большинства реальных конструкций маслобарьерной изоляции упрочнение при воздействии импульсов по отношению к пробивным (выдерживаемым) напряжениям при одноминутной выдержке $k_{и} = U_{и}/U_{50} \approx 1,9—2,05$ для импульса 1,5/40 с и $k_{и} = 1,35—1,5$ для импульсов коммутационных перенапряжений при длительности импульса $10^{-3}—10^{-1}$ с.

3.4.2. Разряд в масле вдоль поверхности твердого диэлектрика

Разряд в масле может развиваться вдоль поверхности твердого диэлектрика. Закономерности развития разряда при этом в основном такие же, как и для поверхностного разряда в воздухе. Характерными являются два случая. В первом (кривая *a* на рис. 3.21) разряд развивается вдоль силовых линий поля, которые почти параллельны поверхности раздела диэлектриков. Напряжение пробоя в этом случае незначительно отличается от напряжения пробоя чисто масляного промежутка при той же форме электродов, обычно оно на 15—30 % ниже при промышленной частоте и почти не уменьшается при воздействии импульсов. Во втором случае (кривая *б* на рис. 3.21) при наличии значительной нормальной составляющей поля к поверхности диэлектрика наблюдается по мере

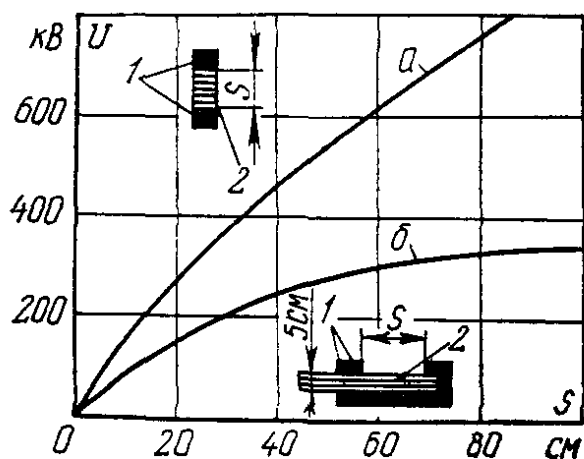


Рис. 3.21. Усредненные значения напряжения поверхностного разряда в трансформаторном масле при частоте 50 Гц:

1 — электроды; 2 — твердый диэлектрик.

роста напряжения коронный разряд, скользящий разряд и, наконец, полное перекрытие. Разрядные напряжения во втором случае значительно меньше, чем в первом. Коронный разряд, который регистрируется как ЧР с $q_x = 10^{-10}—10^{-9}$ Кл, и тем более скользящий разряд под маслом в большинстве случаев недопустимы даже при испытательных напряжениях. Разряды эти разлагают масло и разрушают твердую изоляцию. Напряжение возникновения скользящих разрядов под маслом может быть оценено по формуле $U_{ск} = Ad^b$, где $A = 25—40$; $b = 0,4—0,45$; d — толщина диэлектрика,

см. Для диэлектриков с $\epsilon=4-4,5$ (картон, бумага) $U_{ск}=39d^{0,45}$. При этом для $S>5$ см разрядное напряжение

$$U_p \approx U_{ск} + 13S_{кВ}. \quad (3.8)$$

Поверхностное перекрытие в масле может произойти при значительно меньшем напряжении, чем по формуле (3.8), если скользящие разряды возникают в щели между твердыми диэлектриками. В этом случае выделяющиеся при возникновении скользящих разрядов газы вытесняют масло из щели, и разряд развивается фактически в газе.

3.4.3. Частичные разряды в маслобарьерной изоляции. Ползущий разряд

Частичные разряды слабой интенсивности в маслобарьерной изоляции чаще всего возникают в масляных прослойках, в местах соприкосновения твердых деталей. При переменном напряжении и на импульсах нормальная составляющая напряженности поля в масле $E_{мп}$ на границе твердая изоляция (например, бумага, электрокартон) — масло почти в два раза выше, чем соответствующая напряженность $E_{дп}$ в твердом диэлектрике, так как

$$\frac{E_{мп}}{E_{дп}} = \frac{\epsilon_d}{\epsilon_m} \approx \frac{4,5}{2,3} \approx 2.$$

Поэтому перегруженные по напряженности масляные прослойки могут пробиваться в области повышенных напряженностей поля ($E_{max} \approx 10-15$ кВ/мм), что соответствует начальным ЧР с $q_x = 10^{-12} - 10^{-10}$ Кл. Возникновению таких ЧР способствуют газовые пузырьки, которые появляются в масляных прослойках при резких изменениях давления, температуры, при вибрации твердых деталей. Пузырьки могут остаться или появиться в масле и при недостаточно тщательной пропитке. Катафоретическая проводимость масла, связанная с переносом тока различными, сравнительно крупными примесными частицами, также может быть зарегистрирована как начальные ЧР с $q_x = 10^{-13} - 10^{-12}$ Кл. Примерные расчетные оценки и экспериментальные исследования образцов изоляции показывают, что воздействие начальных ЧР с $q_x = 10^{-12} - 10^{-10}$ Кл не приводит к быстрому разрушению целлюлозной изоляции. При таких ЧР масло разлагается с выделением преимущественно водорода, но образующиеся микропузырьки растворяются в объеме масла. При очень длительном (несколько лет) воздействии начальных ЧР возможно появление нерастворимого шлама и образование газовых полостей в тех местах, откуда затруднен выход выделившегося газа. Существует мнение, что ЧР с $q_x = 10^{-12} - 10^{-10}$ Кл безопасны для маслобарьерной изоляции трансформаторов и допустимы длительно, т. е. даже при рабочих напряженностях. Однако вопрос о влиянии этих ЧР на срок службы маслобарьерной изоляции нельзя считать окончательно решенным. Кратковремен-

ное воздействие ЧР с кажущимся зарядом $q_x \approx 10^{-9}$ Кл приводит к разложению масла и целлюлозы с заметным газовыделением и появлением на электрокартоне или бумаге «белых следов» — участков, пропитанных выделившимся газом. Эти «следы» после прекращения действия ЧР могут исчезнуть без последствий (газ растворится), и изоляция останется работоспособной. Поэтому подобные ЧР можно допустить кратковременно, например при испытаниях, но длительное их действие приведет к необратимым и недопустимым изменениям.

При перенапряжениях или в процессе испытаний в маслобарьерной изоляции могут произойти пробой масляного канала или возникнуть скользящие разряды вдоль барьера. Такие стримерные искровые разряды регистрируются как критические ЧР с $q_x = 10^{-8} - 10^{-5}$ Кл. Как уже отмечалось в п. 3.4.1, даже однократный пробой масляного канала главной изоляции трансформатора оставляет на барьере и в его толще нитевидные «черные следы» обугленной целлюлозы. Эти каналы повышенной проводимости резко искажают поле, усиливая напряженность у концов канала, где возникают ЧР, вызывая медленное прорастание таких каналов вдоль барьера. При этом, начавшись при повышенном напряжении, рост каналов продолжается с нарастающей скоростью и при рабочем напряжении. Такой процесс, получивший название «ползущего разряда» (рис. 3.22), завершается перекрытием изоляции по барьеру.

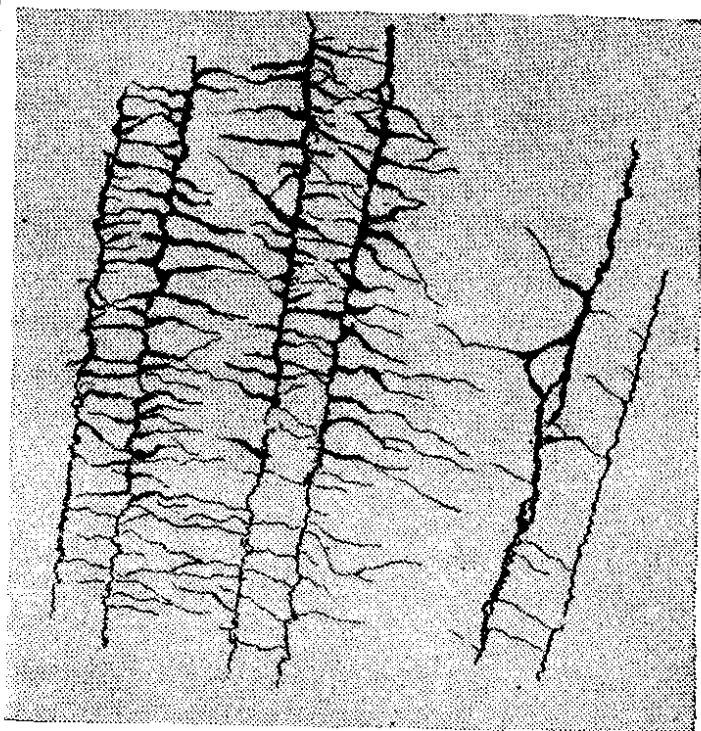


Рис. 3.22. Следы развития ползущих разрядов на поверхности цилиндрического изолирующего барьера высоковольтного трансформатора.

Механизм возникновения и развития ползущего разряда нельзя считать полностью ясным, хотя пульсирующий характер его продвижения может быть пояснен следующим образом. Возникновение ЧР у конца канала вызывает рост тока и увеличение падения напряжения в канале. Это приводит к уменьшению напряженности поля на конце канала, и ЧР прекращаются. Новая вспышка ЧР возникает после того, как напряженность у конца канала снова возрастает до некоторого критического значения. Ползущий разряд развивается предпочтительнее в узких щелях или в толще картона, где выделяющийся при ЧР газ образует пузырьки и полости. Кажущийся заряд ЧР при развитии ползущего разряда лежит в пределах $10^{-8} - 10^{-6}$ Кл, и появление таких ЧР уже свидетельствует о недопустимом повреждении маслобарьерной изоляции.

3.5. БУМАЖНО-МАСЛЯНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

3.5.1. Виды бумажно-масляной изоляции и ее основные характеристики

Бумажно-масляная изоляция состоит из слоев пропитанной маслом бумаги и масляных прослоек, заполняющих зазоры между слоями бумаги. Слой бумажной изоляции может быть выполнен из сплошных листов бумаги, как, например, в изоляции конденсаторов пакетного или рулонного типа, или путем намотки бумажной ленты с положительным или отрицательным перекрытием (рис. 3.23). Ленточная изоляция с положительным перекрытием используется для изоляции отводов в силовых трансформаторах, изоляции трансформаторов тока, напряжения и других аппаратов. Намотка ленты осуществляется не менее чем вполнахлеста вручную или на машине с максимальным натяжением, обеспечивающим высокую плотность прилегания слоев. В кабелях намотка выполняется с зазором (с отрицательным перекрытием) для обеспечения необходимой гибкости кабеля. Ширина зазора пропорциональна ширине ленты и составляет обычно 1,5—3,5 мм при ширине ленты 15—30 мм, толщина бумажных лент 14—120 мкм. Намотку стремятся выполнять так, чтобы избежать наложения зазоров, допустимое число совпадающих зазоров нормируется, так как масляные прослойки значительной толщины являются участками с пониженной электрической прочностью.

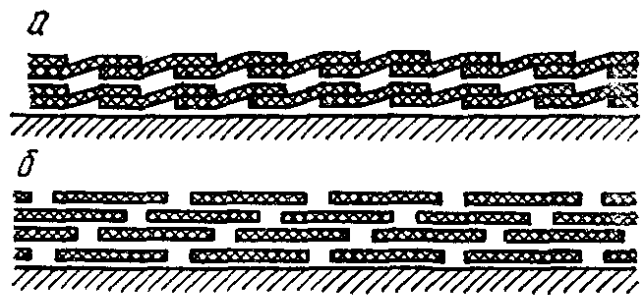


Рис. 3.23. Бумажно-масляная ленточная изоляция с положительным (а) и отрицательным (б) перекрытием.

спечивающим высокую плотность прилегания слоев. В кабелях намотка выполняется с зазором (с отрицательным перекрытием) для обеспечения необходимой гибкости кабеля. Ширина зазора пропорциональна ширине ленты и составляет обычно 1,5—3,5 мм при ширине ленты 15—30 мм, толщина бумажных лент 14—120 мкм. Намотку стремятся выполнять так, чтобы избежать наложения зазоров, допустимое число совпадающих зазоров нормируется, так как масляные прослойки значительной толщины являются участками с пониженной электрической прочностью.

Бумажно-масляная изоляция пропитывается под вакуумом, перед пропиткой готовое изделие тщательно высушивается в вакуумных камерах при повышенной температуре (до 130 °С). Остаточное давление при пропитке и сушке составляет 0,1—10² Па, что обеспечивает устранение пустот в бумаге и почти полную дегазацию масла. Оставшийся в масле воздух при этом составляет менее сотой доли количества воздуха, растворенного в масле в равновесном состоянии при нормальных условиях (растворимости воздуха в масле), равного 10—11 % по объему. Бумажно-масляная изоляция имеет весьма высокую кратковременную прочность $E_{пр}$, равную 50—120 кВ/мм при переменном напряжении и 100—250 кВ/мм при постоянном, и поэтому используется в конструкциях с высокими напряженностями электрического поля.

Электрическая прочность бумажно-масляной изоляции зависит от количества слоев бумаги. Для листовой изоляции из конденсаторной бумаги вначале с ростом числа слоев прочность увеличивается, вследствие того что уменьшается вероятность совпадения слабых, дефектных мест в листах, а затем снижается, так как

ухудшается теплоотвод и возникает возможность теплового пробоя, увеличивается также влияние неоднородности поля у краев электродов. Максимальная пробивная напряженность наблюдается при 6—10 бумажных слоях (рис. 3.24). Прочность изоляции из кабельной бумаги в однородном и слабонеоднородном полях определяется максимальной напряженностью поля и мало зависит от толщины d . В резконеоднородных полях, например у острого края электрода, пробивная напряженность уменьшается с ростом толщины изоляции примерно пропорционально $d^{-0,5}$. При переменном напряжении пробой многослойного бумажно-масляного диэлектрика

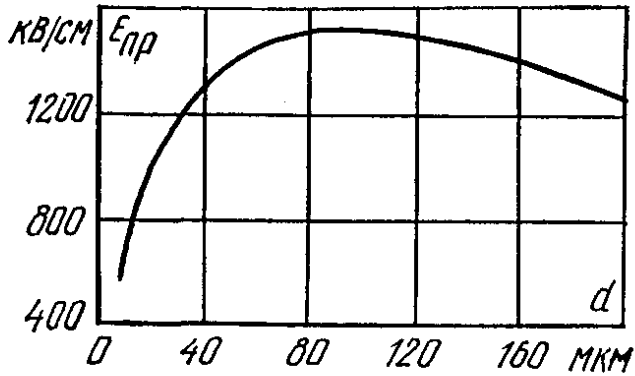


Рис. 3.24. Зависимость пробивной напряженности бумаги 10 мкм от толщины изоляции.

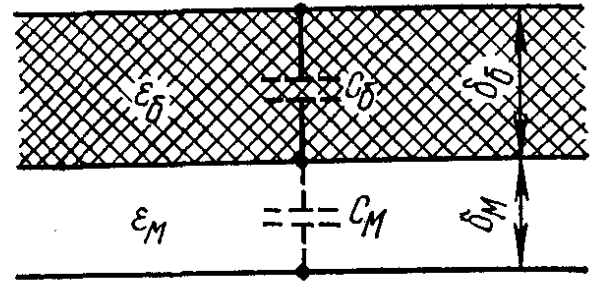


Рис. 3.25. Эквивалентная схема двухслойного бумажно-масляного диэлектрика.

ка всегда начинается с частичных пробоев масляных прослоек. Поэтому при конструировании изоляции стремятся сделать масляные прослойки более тонкими, так как в тонких слоях пробивная напряженность в масле возрастает. Достигается это увеличением плотности намотки, опрессовкой и прежде всего уменьшением толщины бумаги.

Расчет простейшей схемы двухслойного диэлектрика (рис. 3.25) приводит к соотношению

$$\frac{E_m}{E_{ср}} = \frac{\epsilon_b \left(1 + \frac{\delta_m}{\delta_b} \right)}{\epsilon_m + \epsilon_b \frac{\delta_m}{\delta_b}},$$

где E_m — напряженность поля в масле; $E_{ср} = \frac{U}{\delta_b + \delta_m}$.

Для ленточной изоляции практически $\frac{\delta_m}{\delta_b} = 1$ и $\frac{E_m}{E_{ср}} \approx \frac{2\delta_b}{\epsilon_m + \epsilon_b} \approx \approx 1,2$; для листовой $\frac{\delta_m}{\delta_b} \ll 1$ и $\frac{E_m}{E_{ср}} \approx \frac{\epsilon_b}{\epsilon_m} \approx 1,7$.

И в том, и в другом случае отношения δ_m/δ_b и $E_m/E_{ср}$ остаются постоянными. Поэтому как в ленточной, так и в листовой изоляции уменьшение толщины бумаги вызывает уменьшение δ_m . Это увеличивает пробивную напряженность масляных прослоек, затрудняет развитие частичных разрядов и общего пробоя. Применение тонкой

бумаги приводит к заметному росту электрической прочности бумажно-масляной изоляции (рис. 3.26). Рост плотности бумаги приводит к увеличению электрической прочности листов бумаги и ϵ_6 . Поэтому кратковременная прочность бумажно-масляной изоляции возрастает с увеличением плотности бумаги, однако при этом вследствие роста ϵ_6 увеличиваются напряженности в масле, что приводит к снижению прочности и уменьшению срока службы изоляции при длительных воздействиях напряжения, которые связаны с частичными разрядами в масляных прослойках.

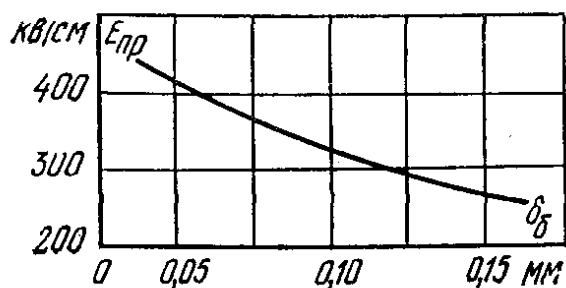


Рис. 3.26. Зависимость пробивной напряженности от толщины бумаги δ_b при промышленной частоте.

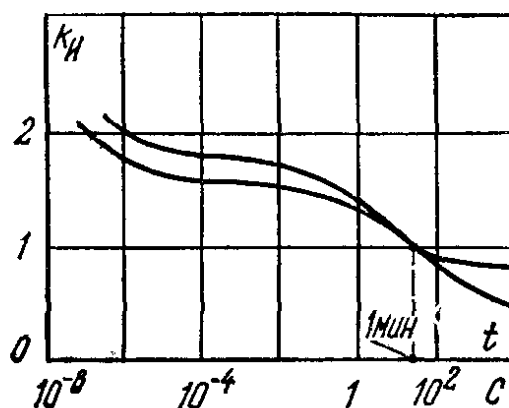


Рис. 3.27. Типичные вольт-секундные характеристики бумажно-масляной изоляции.

Кратковременная и длительная прочность бумажно-масляной изоляции значительно увеличивается при увеличении давления. С ростом давления возрастает прочность масла в прослойках (см. рис. 3.3) и, кроме того, затрудняется развитие разряда в воздушных включениях.

Заметное снижение кратковременной и длительной электрической прочности бумажно-масляной изоляции наблюдается при ее увлажнении. Особенно сильно влияет влага при повышенной температуре.

Импульсная прочность бумажно-масляной изоляции возрастает при уменьшении длительности импульса. Для полного импульса 1,2/50 коэффициент импульса $k_{и} \approx 1,7$, для срезанного $k_{и} \approx 2$. При воздействии импульсов коммутационных перенапряжений $k_{и} \approx 1,7—1,3$ при изменении длительности импульсов от 3—10 мкс до периодических синусоидальных воздействий длительностью 0,1—1 с. Типичные вольт-секундные характеристики для бумажно-масляной изоляции приведены на рис. 3.27.

Влияние плотности бумаги, толщины и количества бумажных слоев на импульсную прочность бумажно-масляной изоляции такое же, как и для напряжения промышленной частоты. Однако рост давления незначительно увеличивает напряжение пробоя при стандартных апериодических импульсах.

Отметим еще, что кратковременная прочность бумажно-масляной изоляции при развитии разряда вдоль слоев в 2—3 раза меньше, чем при напряженностях поля, нормальных к поверхности твердого диэлектрика.

3.5.2. Частичные разряды в бумажно-масляной изоляции

Хорошо высушенная и пропитанная под вакуумом бумажно-масляная изоляция практически не имеет газовых включений. Начальные ЧР в такой изоляции развиваются в виде отдельных электронных лавин в масляных прослойках в местах усиления поля: у микровыступов электродов, у края фольги в листовой конденсаторной изоляции и т. д. Напряженность и напряжение возникновения начальных ЧР относятся к определенной величине q_x , связанной с возможностями (чувствительностью) схемы регистрации. Высокочувствительные специальные схемы с использованием электронных фотоумножителей для регистрации световых излучений лавины позволяют выявить начальные ЧР с $q_x = 10^{-15} - 10^{-14}$ Кл. Такие слабые, неустойчивые начальные ЧР не приводят к видимому разрушению бумаги, хотя все же разлагают масло с выделением преимущественно H_2 . Количество выделившегося при единичном начальном ЧР газа настолько мало ($10^{-15} - 10^{-14}$ см³), что газ не образует пузырьков и сразу растворяется в масле. Разрушающее действие начальных ЧР может проявиться только спустя длительное время (годы, месяцы).

Появление начальных ЧР при непрерывном подъеме напряжения промышленной частоты особенно явно бывает выражено в бумажно-масляной изоляции с резконеоднородным полем у края электрода. Напряженность возникновения ЧР E_H зависит в этом случае от толщины диэлектрика и часто определяется по эмпирическому соотношению

$$E_H = Ad^{-0,58}, \quad (3.9)$$

где d — толщина изоляции, мм; E_H — средняя напряженность поля, кВ/мм. Коэффициент $A = 3,8$ для листовой изоляции из бумаги КОИ-1, 10 мкм; $A = 7$ для кабельной бумаги К-12, 120 мкм. Напряжение возникновения начальных ЧР возрастает при росте избыточного давления масла, несколько уменьшается при увеличении плотности бумаги и заметно зависит от технологии изготовления, пропитки и сушки образцов. Кроме того, следует еще раз подчеркнуть, что величина E_H относится к определенному уровню ЧР (q_x), зависящему от чувствительности схемы регистрации. Приведенные выше значения A получены для образцов большой емкости при уровне ЧР с $q_x = 10^{-12}$ Кл. Обычно наблюдается значительный разброс значений E_H для одних и тех же условий опыта, среднеквадратичные отклонения $\sigma_H = 20 - 30$ %. Дальнейшее увеличение напряжения U сопровождается быстрым ростом числа лавин и q_x , при этом средняя мощность начальных ЧР увеличивается пропорционально U^m :

$$P_{ЧРн} = BU^m. \quad (3.10)$$

При промышленной частоте $m = 5 - 8$. Увеличение частоты f приводит, естественно, к росту $P_{ЧРн}$, однако для бумажно-масляной изо-

ляции зависимость не прямо пропорциональная f [как, например, в формуле (3.7)], а несколько меньшая:

$$P_{\text{ЧРН}}(f) = P_{\text{ЧРН}}(f = 50) \left(\frac{f}{50} \right)^{0,62}.$$

При определенном напряжении мощность ЧР бумажно-масляной изоляции резко (скачком) возрастает на 3—5 порядков. Возникают критические ЧР, которые сопровождаются интенсивным выделением газа. Критические ЧР представляют разряды с $q_x = 10^{-10}—10^{-8}$ Кл в воздушных полостях или скользящие разряды от края электрода ($q_x = 10^{-8}—10^{-7}$ Кл). Даже кратковременное существование критических ЧР недопустимо: разлагаются масло и целлюлоза с активным выделением H_2 , CH_4 , C_2H_2 , CO_2 и CO . Газ вытесняет масло, образуя полости, бумага обугливается. Начавшись при повышенном напряжении, интенсивные критические ЧР будут продолжаться и при значительном снижении его, например ниже напряжения возникновения начальных ЧР или рабочего напряжения. Однако в случае перенапряжений при очень кратковременном существовании критических ЧР образующееся количество включений или полостей ограничено, и после «отдыха», при котором газовые полости растворяются в масле, напряжение возникновения критических ЧР может восстановиться до исходной величины (рис. 3.28). Зависимость $E_{\text{кр}}$ от толщины d изоляции имеет такой же характер, как и для $E_{\text{н}}$. Например, для листовой изоляции из бумаги КОН-I, 10 мкм $E_{\text{кр}} \approx 10 d^{-0,58}$ кВ/мм; для ленточной изоляции из кабельной бумаги $E_{\text{кр}} \approx 18 d^{-0,58}$ кВ/мм. Разброс значений $E_{\text{кр}}$ меньше, чем для $E_{\text{н}}$.

Возникновение критических ЧР облегчается при плохой дегазации масла, при повышенной влажности изоляции. Избыточное давление затрудняет разряды в газовых включениях и, следовательно, приводит к повышению $E_{\text{кр}}$.

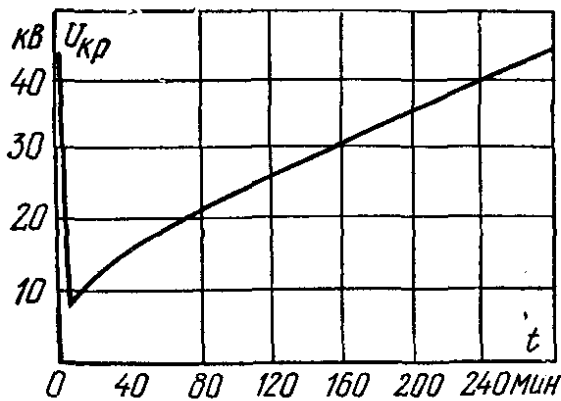


Рис. 3.28. Изменение напряжения возникновения критических ЧР в процессе «отдыха» изоляции.

Возникновение и развитие частичных разрядов в кабельной изоляции, пропитанной маслом или компаундом, приводит к своеобразной форме пробоя кабеля — ионизационному, ветвистому пробоя. Пробой начинается с ЧР слабой интенсивности в масляных прослойках или в газовых включениях. Последние могут остаться в изоляции при изготовлении вследствие нека-

чественной пропитки или появиться в результате переменных тепловых нагрузок кабеля. Нагрев и охлаждение приводят к необратимым деформациям оболочки, и в кабелях с вязкой пропиткой образуются газовые полости и пузырьки. Частичные разряды в газовом включении, расположенном вблизи жилы, приводят к непрерывному газовыделению, которое происходит вследствие раз-

ложения пропиточной массы под действием ионной бомбардировки и тепловыделения. Если выделяющийся газ не может или не успевает растворяться в пропитывающем составе, объем газового включения будет увеличиваться, дробиться, образуя пену, и распространяться в толщину изоляции между бумажными слоями и в зазоры соседних слоев. Продукты разложения вместе с пузырьками газа образуют полупроводящую эмульсию, искажающую поле, увеличиваются тангенциальные составляющие поля, действующие вдоль слоев бумаги, и происходит дальнейшее усиление ЧР. Разрушается целлюлоза бумажных лент, и каналы разряда в виде науглероженных древовидных побегов развиваются между слоями в глубь изоляции, захватывая большие участки вдоль оси кабеля (рис. 3.29). При рабочих напряжениях развитие этого, характерного для кабелей с вязкой пропиткой, ветвистого разряда происходит сравнительно медленно. По мере роста напряжения скорость развития быстро возрастает.

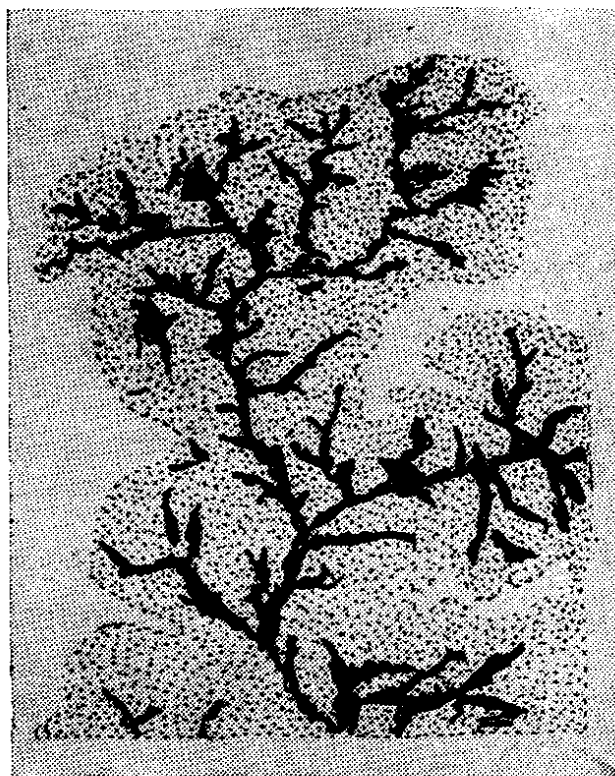


Рис. 3.29. Следы ветвистого разряда на слоях бумаги изоляции кабеля.

При постоянном напряжении ЧР в конструкциях бумажно-масляной изоляции появляются при значительно более высоких напряжениях, их интенсивность, частота и разрушающее действие намного меньше, чем при переменном напряжении. Например, для конденсаторной изоляции КОИ-II $d=8 \times 10=80$ мкм, при $t=20-40^\circ\text{C}$ $E_n=100-150$ кВ/мм. Средняя мощность начальных ЧР выражается, так же как и при переменном напряжении, соотношением (3.10), но при этом $m=10-12$.

Как уже отмечалось в п. 3.3.4, развитие ЧР при постоянном напряжении зависит от проводимости компонентов изоляции. Так как проводимость и масла, и бумаги быстро увеличивается при росте температуры и степени увлажнения, то и интенсивность ЧР при этом быстро возрастает, а E_n уменьшается.

3.5.3. Некоторые другие виды бумажнопропитанной и комбинированной изоляции

Вместо масла для пропитки бумаги могут использоваться другие жидкости. Для пропитки конденсаторов применяются хлорированные дифенилы. Полихлордифенилы (совол, совтол) и специальные пропиточные смеси на их основе (КЖ-30, КЖ-40) совместимы с бумагой, имеют повышенную диэлектрическую проницаемость ($\epsilon=5-6$), достаточно высокую электрическую прочность и стойки к воздействию ЧР. При промышленной частоте поле между слоями бумаги и жидкостью в этом случае распределяется более равномерно и напряжение

возникновения начальных ЧР в 1,5—2 раза выше, чем у аналогичных конструкций изоляции, пропитанной маслом.

Как и другие полярные жидкости, хлорированные дифенилы имеют нестабильные при изменении температуры ϵ и $\operatorname{tg} \delta$. Проводимость ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ у них резко возрастают при самых незначительных загрязнениях. Однако главные ограничения в применении хлорированных жидкостей связаны с их высокой токсичностью. Возможность загрязнения окружающей среды ядовитыми веществами приведет, по-видимому, к полному запрещению их технического использования.

Для пропитки кабельной изоляции перспективно применение синтетических жидких углеводородов (октол, додецебензол и др.). Характеристики ЧР в конструкциях с применением синтетических жидкостей изучены еще недостаточно.

Делаются многочисленные и часто успешные попытки использовать в кабелях и конденсаторах вместо бумаги синтетические пленки или комбинированную бумажно-пленочную изоляцию, пропитанную маслом или другими изолирующими жидкостями. Бумага в таких системах играет роль фитиля, втягивающего пропиточную массу в глубь изоляции. Пропитка чисто полимерных пленок затруднена вследствие их плохой смачиваемости.

3.6. ГАЗОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

3.6.1. Требования к газовой изоляции.

Высокопрочные газы

Газовая внутренняя изоляция обладает некоторыми очевидными преимуществами по сравнению с рассмотренными выше видами твердой и комбинированной изоляции. Газ имеет низкую проводимость, малые диэлектрические потери. Электрическая прочность газовой изоляции может быть увеличена при росте давления воздуха или при использовании высокопрочных газов под давлением до величин, превышающих прочность трансформаторного масла и обычных твердых материалов (рис. 3.30). Кроме того, газовая изоляция практически не стареет и в большинстве случаев самовосстанавливается после пробоя.

К газовой изоляции в зависимости от специфики ее использования могут предъявляться дополнительные требования. Газ или продукты его разложения не должны быть токсичными и химически активными, пожаро- или взрывоопасными, газ должен обеспечивать необходимый теплоотвод, иметь низкую температуру кипения. Для массового применения газ должен быть недорогим и недефицитным.

Наиболее доступный газ — воздух. Однако его применение для внутренней изоляции не всегда оправданно: прочность воз-

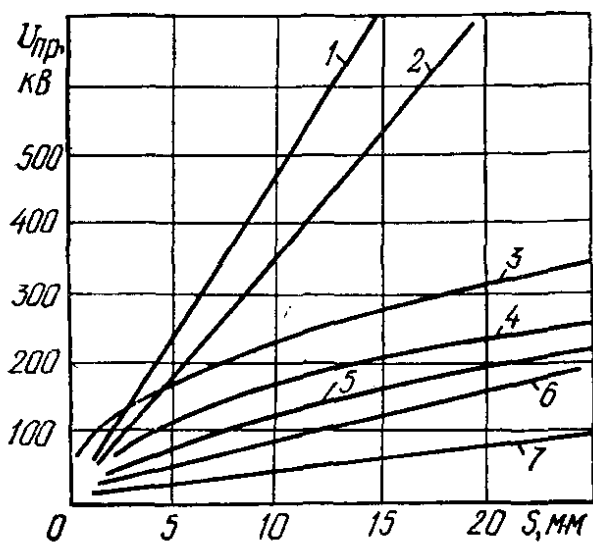


Рис. 3.30. Зависимость напряжения пробоя от межэлектродного расстояния в однородном поле:

для воздуха при давлении 2,8 МПа (1) и атмосферном давлении (7); для элегаза при давлении 0,7 МПа (2) и атмосферном (6); трансформаторного масла (4); фарфора (5) и глубокого вакуума (3).

духа при увеличении давления растет, но не настолько, чтобы изоляционные конструкции имели приемлемые габариты. Кроме того, воздух при воздействии короны разлагается с образованием химически активных окислов азота, а кислород воздуха оказывает окисляющее действие на твердые материалы, вызывая их старение или коррозию.

Существует значительное число газов, электрическая прочность которых в нормальных условиях и при соответствующем увеличении давления выше, чем электрическая прочность воздуха. Некоторые из них приведены в табл. 3.1.

Табл. 3.1. Относительная электрическая прочность и температура кипения некоторых газов

Газ	Относительная электрическая прочность $E_{пр}/E_{пр.возд}$	Точка кипения при нормальном давлении, °C
Трихлормонофторметан CCl_3F	3—4	23,8
Дихлордифторметан (фреон) CCl_2F_2	2,4—2,5	—28
Хлорметан CCl_4	6,3	76
Монохлортрифторметан $CClF_3$	1,4	—81
Монохлорпентафторэтан C_2ClF_5	2,8	—38
Гексафторэтан C_2F_6	1,5—1,8	—78
Октафторпропан C_3F_8	1,8—2,4	—37
Октафторциклобутан C_4F_8	2,6	— 6
Додекафторпентан C_5F_{12}	3	25
Шестифтористая сера (элегаз) SF_6	2,4—2,5	—63
Шестифтористый селен SeF_6	4,5	—49
Азот N_2	1	—195,8
Углекислый газ CO_2	0,9	— 78,5*
Гелий He		—268,8

* Температура возгонки.

Однако большинство высокопрочных газов обладает недостатками, исключающими или затрудняющими возможность их использования в электрическом оборудовании. Например, SeF_6 токсичен, а C_5F_{12} , CCl_3F или CCl_4 при нормальной температуре находятся в жидком состоянии. Использование других газов также затрудняется сравнительно высокой температурой их сжижения (C_4F_8), хотя при нормальной температуре и давлении они могут находиться в газообразном состоянии, но при сравнительно невысоких повышенных давлениях также переходят в жидкое состояние. Некоторые газы, разлагаясь, выделяют свободный углерод, который, оседая на поверхности твердой изоляции, увеличивает поверхностную проводимость.

Исследования и опыты эксплуатации оборудования с газовой изоляцией показали, что наиболее полно требованиям к электрической внутренней изоляции отвечает элегаз (SF_6). Элегаз в 2,5 раза прочнее воздуха, химически нейтрален, обладает хорошей тепло-

проводностью, активно гасит дугу, сравнительно доступен и недорог. Поэтому применение оборудования (герметизированные РУ, выключатели, трансформаторы, кабели, токопроводы и т. д.) с элегазовой изоляцией быстро расширяется.

В отдельных случаях оправданно применение газовых смесей, например N_2 и SF_6 , N_2 или CO_2 под давлением, представляют интерес CCl_2F_2 (фреон), C_3F_8 и некоторые другие фторуглероды. Особый интерес представляет использование в качестве внутренней изоляции глубокого вакуума.

3.6.2. Особенности механизма разряда в элегазе. Пробой в однородном поле

Элегаз является электроотрицательным газом. Развитие разряда в элегазе в однородном и слабонеоднородном полях носит лавинно-стримерный характер. Однако наряду с процессами ударной ионизации электронами, которые характеризуются коэффициентом ударной ионизации α , в элегазе резко выражен процесс захвата свободных электронов нейтральными молекулами — прилипания электронов. Этот процесс характеризуется коэффициентом прилипания η , т. е. числом электронов, захваченных молекулами на пути 1 см в направлении поля, отнесенным к одному первичному электрону. Процесс прилипания электронов с образованием малоподвижных электроотрицательных ионов затрудняет развитие разряда.

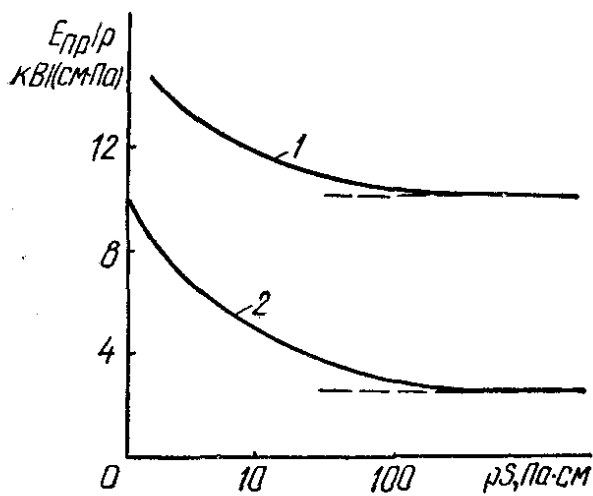


Рис. 3.31. Зависимость $\frac{E_{пр}}{\rho} = f(\rho S)$ для элегаза (кривая 1) и воздуха (кривая 2).

Условие самостоятельного разряда с учетом η в соответствии с теорией развития разряда в однородном поле (см. п. 1.3.1) можно записать в виде

$$\frac{\alpha}{\alpha - \eta} [\exp(\alpha - \eta) - 1] \gamma \geq 1. \quad (3.11)$$

Расчеты показывают, что условие (3.11) выполняется вблизи $\alpha - \eta = 0$ или $\left(\frac{\alpha}{\rho} - \frac{\eta}{\rho}\right) = f\left(\frac{E}{\rho}\right) = 0$. При этом для элегаза критическое значение $\left(\frac{E}{\rho}\right)_к = 8,9 \cdot 10^{-4}$ кВ/(см·Па), для воздуха соответственно $\left(\frac{E}{\rho}\right)_к = 2,7 \cdot 10^{-4}$ кВ/(см·Па). Таким образом, для выполнения условия возникновения самостоятельного разряда в элегазе требуется напряженность поля примерно в три раза больше, чем в воздухе.

Для практических расчетов в реальных конструкциях аппаратов

($pS > 0,5 \cdot 10^5$ см · Па) можно считать, что $\left(\frac{E}{p}\right)_k = \frac{E_{пр}}{p}$, и пробивное напряжение элегазового промежутка с однородным полем оценивается по соотношению

$$U_{пр} = 8,9 \cdot 10^{-4} pS. \quad (3.12)$$

Для меньших значений pS зависимости $\frac{E_{пр}}{p} = f(pS)$ для элегаза и воздуха приведены на рис. 3.31. Обычно вследствие влияния местных усилений поля (неровности на электродах, пылинки и т. п.) напряжение пробоя реальных высоковольтных конструкций с элегазом заметно меньше, чем определенное по соотношению (3.12).

3.6.3. Пробой газов под давлением в неоднородных полях.

Аномалии в зависимостях $U_{пр} = f(p)$

В слабонеоднородных полях для воздуха, элегаза и других высокопрочных газов имеет место закон подобия (см. § 1.3), но по мере увеличения степени неоднородности наблюдается возрастающее отклонение от этого закона. Поэтому увеличивается ценность и необходимость накопления экспериментальных данных по пробивным напряжениям для конкретных изоляционных конструкций и условий.

Особенно ярко проявляется возможность непредвиденных отклонений от монотонных зависимостей $U_{пр} = f(pS)$ в резконеоднородных полях, где при росте давления имеют место так называемые аномалии газового разряда (рис. 3.32).

При положительной полярности стержня в системе стержень — плоскость при некотором давлении p_m наблюдается максимум, затем при дальнейшем росте p следует спад $U_{пр}$ до минимального значения при давлении p_c и снова монотонное нарастание $U_{пр}$ после p_c .

Такой ход зависимости $U_{пр} = f(p)$ при росте давления объясняется условиями образования и влиянием положительного объемного заряда у стержня. На участке до p_m разрядное напряжение увеличивается с ростом p при стабилизирующем влиянии короны, начальное напряжение возникновения которой намного меньше, чем напряжение пробоя. При этом положительный объемный заряд, возникающий возле стержня при коронировании, как бы увеличивает радиус кривизны электрода, выравнивая поле и затрудняя пробой. По мере роста давления усиливаются фотоионизация и образование лавин в объеме газа. При $p > p_m$ положительный объемный заряд у острия начинает частично нейтрализоваться за счет электронов лавин, образующихся в глубине промежутка, формируется стример, и напряжение пробоя уменьшается, приближаясь к начальному напряжению возникновения короны. При давлении p_c и выше наступает полная нейтрализация объемного заряда, и возникновение стримерной короны и пробой происходят при одном и том же напряжении.

В случае переменного напряжения пробой возникает при положительной полярности стержня, поэтому такие же аномалии наблюдаются и при промышленной частоте. На импульсах (+1,5/40) аномалии в зависимости $U_{пр} = f(p)$ выражены меньше, чем при постоянном напряжении или при промышленной частоте, так как образование и нейтрализация объемных зарядов требуют времени (рис. 3.33). При отрицательной полярности стержня зависимости $U_{пр} = f(p)$ монотонные и аномалий не наблюдается.

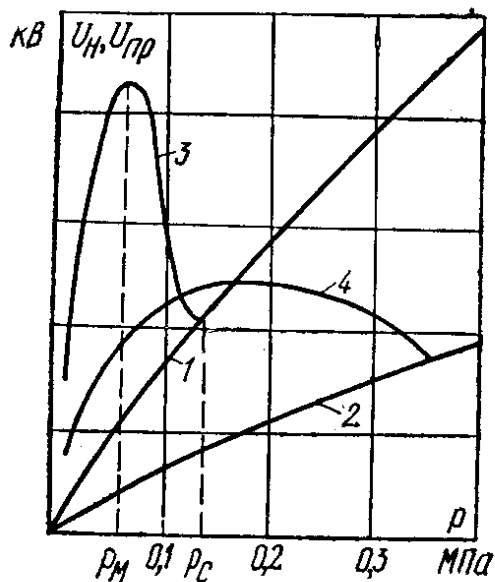


Рис. 3.32. Зависимость начального (1, 2) и пробивного (3, 4) напряжений от давления для элегаза (1, 3) и воздуха (2, 4). Положительный шар диаметром 1 см — плоскость, $S=10$ см.

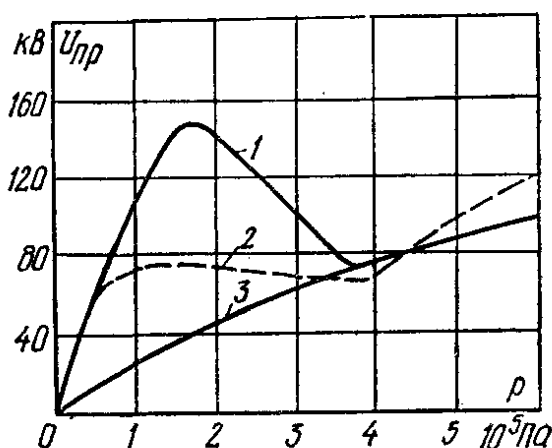


Рис. 3.33. Зависимость напряжения пробоя элегаза от давления для промежутка с резконеоднородным полем: 1 — 50 Гц; 2 — 1,5/40; 3 — начальное напряжение короны при промышленной частоте.

Наличие описанных аномалий требует осторожности при выборе давления изолирующего газа в конструкции. Необходимо также принимать меры к устранению общих или локальных неравномерностей поля (применение экранов, закругление электродов, устранение кромок и т. д.) При этом не только повышается пробивное напряжение, например импульсное, которое часто является определяющим при выборе размеров газовых промежутков, но также затрудняется или исключается коронирование, которое может приводить к образованию опасных для изоляции химически активных соединений, в частности низших фторидов при короне в элегазе. Значительное увеличение прочности промежутков в слабонеоднородных и однородных полях может быть достигнуто покрытием электродов тонким слоем твердого диэлектрика.

3.6.4. Разряд вдоль поверхности твердого диэлектрика в сжатых газах

Токоведущие и другие находящиеся под высоким напряжением части в конструкциях с внутренней газовой изоляцией крепятся с помощью твердых изолирующих элементов. Твердые элементы необходимы также для управления подвижными деталями, механиз-

мами и т. п. Граница раздела твердый диэлектрик — газ, как правило, оказывается ослабленным местом в устройствах с внутренней газовой изоляцией.

Явление и закономерности, описанные при рассмотрении поверхностного разряда в воздухе, имеют место и при развитии разряда вдоль поверхности твердого диэлектрика в сжатом газе, например элегазе. Отличие заключается в том, что процесс перекрытия в сжатом элегазе особенно чувствителен к искажениям поля и появ-

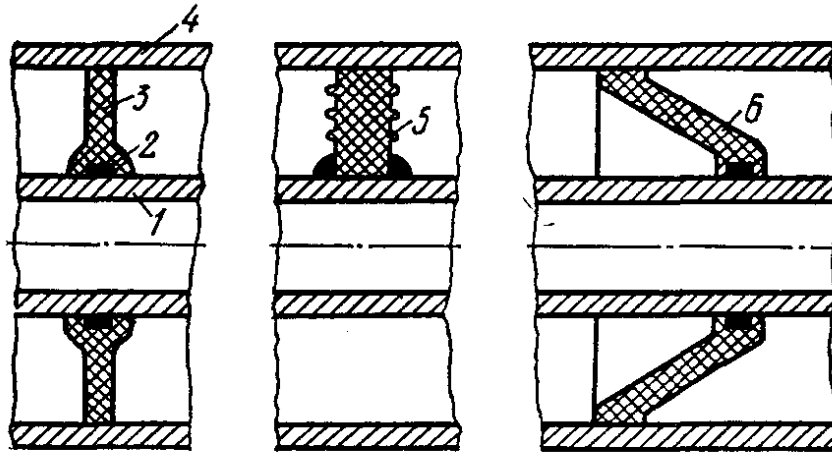


Рис. 3.34. Виды изоляторов для коаксиальных токопроводов, заполненных газом под давлением:
 1 — токопровод; 2 — внутренний экран; 3, 5, 6 — соответственно стержневой, дисковый и конический изоляторы;
 4 — герметизирующая внешняя оболочка.

лению на поверхности твердых материалов даже самых незначительных загрязнений и влаги. Местные усиления поля металлической пылью, частицами, жировые пятна на поверхности изолятора, оставленные при монтаже, остаточная влага в газе, неудачное расположение изоляторов или сочетание материалов в изоляторе, неплотное прилегание диэлектрика к электроду — все это вызывает заметное, иногда недопустимое снижение напряжения перекрытия.

Примеры изоляторов в конструкции коаксиального токопровода приведены на рис. 3.34. Выполняются они часто из эпоксидных смол с минеральными наполнителями (окись алюминия, кварц). В толщу диэлектрика могут быть заложены конденсаторные обкладки или внутренние экраны для регулирования поля, регулировать поле можно также формой изолятора, ребристостью, применением покрытий поверх пластика с волокнистой структурой. Пробивные напряжения в неоднородных полях и напряжения перекрытия в газовой изоляции теоретически рассчитать невозможно, и выбор промежутков и расстояний производится на основании опытного материала для конкретных конструкций и условий. В однородном поле разрядное напряжение U_p вдоль диэлектрика в элегазе может быть оценено (с погрешностью до 15 %) по эмпирическому соотношению $U_p \approx 40 + 1,67 \cdot 10^{-4} p h$ кВ ($1 < h < 5$), где p — абсолютное давление, Па; h — высота цилиндрического диэлектрика, см.

3.6.5. Применение вакуума для внутренней изоляции

Интерес к вакуумной изоляции в последнее время значительно возрос. Глубокий вакуум ($p \leq 10^{-3}$ Па) обладает достаточно высокой электрической прочностью (см. кривую 3 на рис. 3.30), низкой теплопроводностью и является хорошей дугогасящей средой. Поэтому вакуумная изоляция давно и широко применяется в выключателях, различного рода электровакуумных приборах, перспективна для криогенных и сверхпроводящих кабельных линий и устройств. Вакуум также широко используется в электрофизических установках, например в ускорителях элементарных частиц.

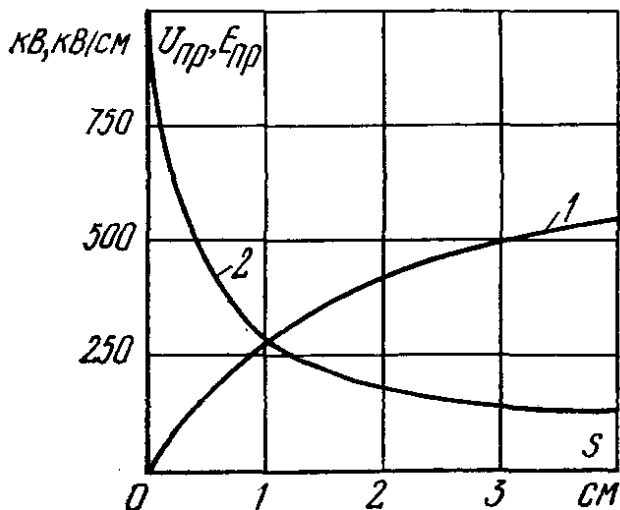


Рис. 3.35. Зависимость пробивного напряжения (кривая 1) и пробивной напряженности (кривая 2) глубокого вакуума от межэлектродного расстояния в однородном поле (усредненные данные).

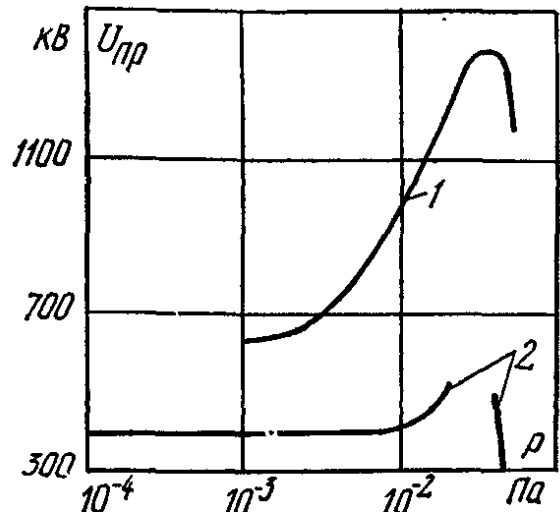


Рис. 3.36. Зависимость напряжения пробоя от остаточного давления газа при расстоянии между электродами 20 см (кривая 1) и 5 см (кривая 2).

Существует ряд теорий электрического пробоя вакуума. Все они связывают механизм возникновения пробоя с автоэлектронной эмиссией, которая облегчается микровыступами и присутствием загрязнений на поверхности электродов. Пробой возникает, когда начинается лавинообразно нарастающий обмен электронами и ионами между электродами вследствие вторичной эмиссии. При этом возможен локальный разогрев электродов с высвобождением газа или пара.

Вакуумный характер пробоя имеет место в случае, если длина свободного пробега электронов λ_e больше межэлектродного расстояния. Тогда процесс ионизации в объеме не играет существенной роли, а развитие разряда определяют явления на поверхности электродов. Это требование выполняется уже при $pS \leq 10^{-2}$ Па·см (см. соотношение (1.14) и рис. 1.6). Прочность вакуумной изоляции в тонких слоях очень велика (до 10^6 В/см при $S \approx 10^{-3}$ см), но быстро убывает при увеличении межэлектродного расстояния (10^4 В/см при $S \approx 10$ см) (рис. 3.35). Напряжение пробоя зависит от полировки и материала электродов, формы поля, вида воздействующих

напряжений. Значение $U_{пр}$ для гладких полированных электродов намного больше, чем для необработанных; загрязнения, даже самые незначительные, резко снижают $U_{пр}$. При больших межэлектродных расстояниях существует зависимость напряжения пробоя от давления; $U_{пр}$ при $p < 10^{-3}$ Па постоянно, заметно увеличивается при дальнейшем росте давления и резко падает при $p > 5 \cdot 10^{-2}$ Па (рис. 3.36).

Выполнение вакуумной изоляции невозможно без применения дистанционных изоляторов. К сожалению, введение в промежуток твердых изолирующих деталей резко снижает электрическую прочность системы. Здесь еще больше, чем в случае газовой изоляции, напряжение пробоя (перекрытия) зависит от материала диэлектрика, размеров, формы и количества изоляторов, наличия и характера загрязнений. Появляется заметная зависимость от времени воздействия напряжения (старение системы). Все это требует тщательных исследований и обоснованных конкретных решений при разработке и эксплуатации внутренней вакуумной изоляции. Опубликованный фактический материал по этому вопросу пока недостаточен.

Примеры выполнения отдельных видов газовой и вакуумной внутренней изоляции рассмотрены в гл. 4.

3.7. СТАРЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ И ВЫБОР ДОПУСТИМЫХ ВЕЛИЧИН РАБОЧИХ И ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

3.7.1. Старение изоляции

Под воздействием электрического поля, повышенных температур, механических нагрузок и окружающей среды с течением времени изоляция постепенно стареет. Старение может проявляться в химическом перерождении изоляции, возникновении в ней местных дефектов в виде трещин, каверн, местного или общего увлажнения, загрязнения, накопления пузырьков газа и т. д. При этом ухудшаются электрические и механические свойства изоляции, и в случае неблагоприятных обстоятельств (перенапряжение, короткое замыкание) она будет пробита и разрушена.

Особенно быстро органическая изоляция стареет под действием высокой температуры. Существует практически верное правило десяти градусов: увеличение рабочей температуры на 8—12 градусов вдвое сокращает срок службы изоляции. Это правило хорошо согласуется с известным законом Аррениуса, по которому скорость химических реакций k зависит от температуры T :

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{W_a}{RT}\right), \quad (3.13)$$

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

Если предположить, что срок службы изоляции τ обратно пропорционален k , то с учетом выражения (3.13)

$$\tau = A \exp\left(\frac{B}{T}\right), \quad (3.14)$$

где A, B — постоянные.

Используя формулу (3.14), нетрудно показать, что в нешироком интервале температур

$$\tau_T \approx \tau_{T_0} \cdot 2^{\frac{T_0 - T}{\Delta T}},$$

где τ_T — срок службы изоляции при температуре T ; τ_{T_0} — известный срок службы изоляции при некоторой нормированной температуре T_0 ; $\Delta T \approx 10$ — величина, постоянная для данного типа изоляции, численно равная приращению температуры, при которой срок службы изоляции сокращается вдвое.

Тепловое старение основных видов органической изоляции проявляется прежде всего в потере механической прочности. Бумага, картон, полимерные пленки и изделия теряют эластичность, становятся хрупкими, хотя кратковременная электрическая прочность при этом заметно не уменьшается. Однако хрупкая изоляция не выдерживает механических нагрузок, вибраций и рассыпается или растрескивается, что в конечном итоге приводит к пробое.

Тепловому старению способствует увлажнение. Влага увеличивает проводимость, $\operatorname{tg} \delta$, уменьшает электрическую прочность и напряжение возникновения ЧР изоляции. Процессы старения при этом резко ускоряются. Поэтому правильный расчет теплового режима изоляционной конструкции и недопущение длительных перегревов и увлажнения в процессе работы — необходимое условие надежной и длительной работы изоляции.

Старение изоляции не надо принимать как неотвратимое явление. Целесообразным выбором материалов, допустимых рабочих напряженностей, охлаждения, защиты от неблагоприятных влияний окружающей среды можно предотвратить недопустимо быстрое старение твердых изоляционных конструкций. Для маслобарьерной изоляции, которая особенно подвержена старению, кроме того, необходимо в процессе эксплуатации осуществлять систематический и тщательный контроль за состоянием масла и поддерживать его на уровне требуемых норм (ГОСТ 982—68 и ПТЭ).

Масло в процессе эксплуатации окисляется и разлагается с выделением воды, твердых нерастворимых осадков (шлама) и водорастворимых кислот. Окислительные реакции особенно интенсивно протекают при повышенной температуре, наличии контакта с воздухом; каталитическое действие оказывают некоторые металлы (медь, свинец, железо). Электрические характеристики окисленного, состарившегося масла резко снижены.

Для увеличения стабильности свежего масла используются антиокислительные присадки, которые связывают кислород, значи-

тельно снижая скорость окислительных реакций. Такие присадки называются **ингибиторами** или **антиокислителями**.

Окисление масла в работающем трансформаторе может быть замедлено применением индивидуального термосифонного фильтра непрерывной регенерации. Масло, медленно циркулируя через слой сорбента (чаще всего силикагеля SiO_2), очищается не только от механических примесей и воды, но и от химических продуктов окисления и распада молекул. Окисление масла также замедляется при предотвращении контакта масла с кислородом воздуха (герметические системы), использовании специальных расширителей, заполненных азотом (системы азотной защиты), и дыхательных патронов, заполненных сорбентами, поглощающими влагу и агрессивные примеси из воздуха.

Очистка больших количеств масла от механических примесей и воды осуществляется с помощью центрифуг и фильтр-прессов. Тщательное обезвоживание и дегазирование масла можно осуществить распылением его в вакууме.

Старение бумажно-масляной изоляции в герметичных аппаратах, например конденсаторах, определяется в основном развитием ионизационных процессов. Длительное существование начальных ЧР приводит к разложению масла и клетчатки и газовыделению. Выделившийся газ будет растворяться в дегазированном масле. Когда количество выделившегося газа $V_{г.н}$ превысит $V_{г.н}$ — максимальное количество, которое способно при заданных условиях раствориться в масле, наступит насыщение, и при дальнейшем выделении газ будет уже образовывать пузыри и полости. Интенсивность ЧР возрастает до критических значений, что быстро приводит к полному пробою. Время такого процесса старения может быть оценено по соотношению

$$\tau = \frac{V_{г.н}}{\gamma P_{\text{ЧРН}}} \approx \frac{V_{г.н}}{\gamma BU^m}, \quad (3.15)$$

где $\gamma \approx 10^{-3}$ — удельное газовыделение, т. е. объем выделившегося газа при разложении масла, отнесенный к единице энергии начальных ЧР, $\text{см}^3/\text{Дж}$; $P_{\text{ЧРН}}$ — мощность начальных ЧР, определяемая по соотношению (3.10). Из выражения (3.15) следует, что при изготовлении конденсаторов необходима тщательная пропитка изоляции дегазированным маслом, при этом выбирается такое, которое не склонно выделять газ при воздействии ЧР (масла, содержащие значительное количество ароматических углеводородов).

В негерметичных конструкциях бумажно-масляной изоляции происходят процессы увлажнения и окисления пропитывающего состава и бумаги, которые, так же как и в маслобарьерной изоляции, снижают электрические характеристики изоляции и срок ее службы.

При постоянном напряжении ЧР и тепловыделение в изоляции развиваются значительно слабее, но изоляция также стареет в основном вследствие протекания электролитических процессов. Электролиз приводит к химическому перерождению диэлектрика, увели-

чению его проводимости и постепенному снижению пробивного напряжения. Примеси, особенно ионные (вода, кислоты), способствуют химическому старению при постоянном напряжении.

3.7.2. Влияние процесса старения изоляции на ее электрическую прочность.

Обобщенная вольт-секундная характеристика

Процесс старения изоляции влияет на ее электрическую прочность при длительном и кратковременном воздействиях напряжения. При длительном воздействии напряжения зависимость

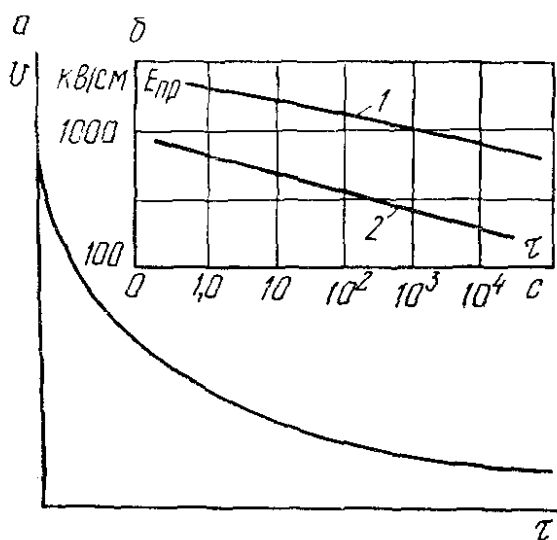


Рис. 3.37. Характер зависимости срока службы изоляции от величины воздействующего напряжения (а) и опытные результаты (б) для конденсаторной изоляции при постоянном (1) и переменном (2) напряжениях.

$t_{пр} = f(U)$ строится при условии непрерывной выдержки испытываемой изоляции при заданной величине U и заданных условиях опыта до момента пробоя $t_{пр}$. Так как интенсивность старения зависит от величины воздействующего напряжения, то кривая $U = f(\tau)$, построенная по точкам для разных значений U и средних $\tau_{пр} = \tau$, будет иметь характер, показанный на рис. 3.37. Эта кривая иногда называется «кривой жизни» и является вольт-временной зависимостью, определяющей срок службы изоляции τ при длительном воздействии заданного напряжения.

Экспериментальное определение «кривой жизни» — задача крайне трудоемкая. Поэтому оценку зависимостей $\tau = f(U)$ или $\tau = f(E)$ для реальных изоляционных конструкций часто выполняют по формулам, полученным в результате ускоренных и длительных испытаний образцов изоляции. Общепринята и хорошо оправдывается на практике почти для всех видов внутренней изоляции эмпирическая формула для «кривой жизни»:

$$\tau = aE^{-n}; \lg \tau = \lg a - n \lg E, \quad (3.16)$$

где a , n — коэффициенты, зависящие от типа изоляции, а также от формы и величины воздействующего напряжения. Формула (3.16) может быть получена и расчетным путем, если считать, что разрушение изоляции происходит под воздействием ЧР. Для бумажно-масляной изоляции $n = 5-8$ при промышленной частоте и $n = 10-12$ при постоянном напряжении. Эти величины найдены экспериментально (см., например, рис. 3.37, б) и хорошо согласуются с соотношениями (3.10) и (3.15), которые определяют соответственно мощность начальных ЧР и время воздействия ЧР до появления пузырей и полостей в изоляции. При большом диапазоне измене-

ния E один механизм разрушения может переходить в другой (например, начальные ЧР — в критические ЧР), при этом постоянные a и n в формуле (3.16) меняются и «кривая жизни» претерпевает излом.

Влияние процесса старения на величину кратковременной электрической прочности менее заметно. Характер зависимости указан на рис. 3.38. Как видно из рисунка, даже при значительных предварительных выдержках под напряжением кратковременная проч-

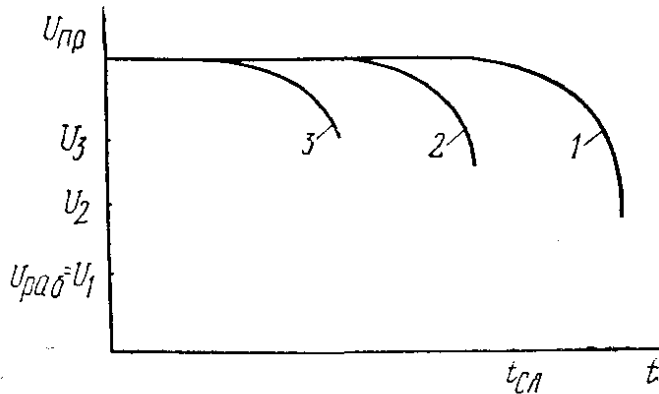


Рис. 3.38. Характер зависимости кратковременной электрической прочности от предварительной выдержки изоляции под напряжением U :

1, 2, 3 — соответственно для $U_1 < U_2 < U_3$;
 $t_{сл}$ — средний срок службы изоляции.

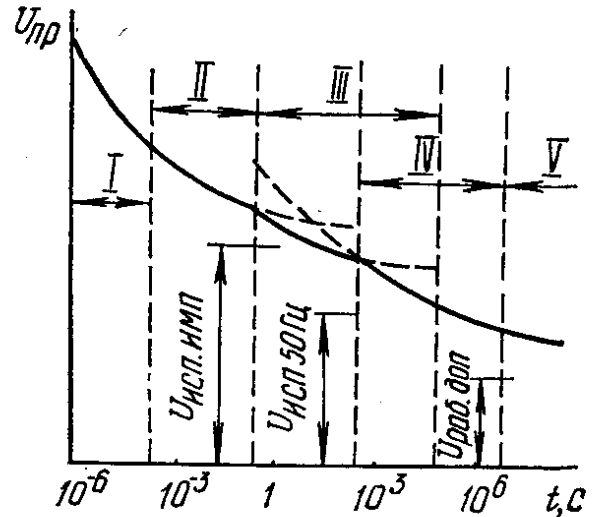


Рис. 3.39. Качественная вольт-секундная характеристика для бумажно-масляной изоляции.

ность меняется незначительно, а затем быстро падает до недопустимо низких величин. Поэтому, как указывалось в § 3.1, кратковременная прочность является ненадежным параметром для оценки степени старения изоляции. Вместе с тем способность изоляции противостоять перенапряжениям сохраняется в течение почти всего срока ее службы при рабочем напряжении. Отметим, что все рассматриваемые процессы и величины подчиняются статистическим закономерностям и наблюдаемый разброс значений очень велик.

Таким образом, в твердой и комбинированной изоляции возможны различные формы пробоя в зависимости от времени воздействия напряжения.

На рис. 3.39 приведена качественная вольт-секундная характеристика для бумажно-масляной изоляции. При малых значениях времени, соответствующих воздействию импульсных перенапряжений (область I) и кратковременных коммутационных перенапряжений (область II), развивается электрическая форма пробоя. При времени 10^{-1} — 10^6 с, включающем по длительности внутренние перенапряжения и испытательные напряжения, пробой носит характер ионизационного при интенсивных (критических) ЧР (область III) или теплового пробоя (область IV). В области V постепенное снижение электрической прочности обусловлено медленным старением изоляции или вследствие слабых начальных ЧР, или под воздействием температуры, окисления масла и т. д. Подобные вольт-секундные характеристики имеют и другие виды твердой и комбинированной изоляции.

3.7.3. Выбор допустимых рабочих и испытательных напряженностей

Выбор допустимых напряженностей поля в изоляции при рабочем напряжении — задача очень ответственная и сложная. Излишние запасы (толщины) изоляции приведут к неоправданному перерасходу материалов, росту стоимости и габаритов аппарата или машины. Недопустимо высокие рабочие напряженности снизят надежность и срок службы изоляции. Сложность задачи заключается в необходимости очень длительных многофакторных исследований на макетах или реальных конструкциях с последующей проверкой в эксплуатации.

Для большинства видов твердой и комбинированной изоляции рабочая напряженность $E_{\text{раб. доп}}$ принимается такой, при которой интенсивность или мощность начальных ЧР является допустимой при принятом сроке службы, т. е. $E_{\text{раб. доп}} \leq E_{\text{ЧР н. доп}}$. С учетом возможного разброса $E_{\text{ЧР н}}$ принимают $E_{\text{раб. доп}} = E_{\text{ЧР н}} - 3\sigma$, где σ — среднеквадратичное отклонение напряженности, при которой возникают начальные ЧР заданной интенсивности. Например, для бумажно-масляной изоляции допустимая рабочая напряженность может быть определена из выражения (3.15), если принять, что в этой формуле τ равно заданному сроку службы изоляции, т. е. $\tau = \tau_{\text{сл}}$ (15—30 лет):

$$E_{\text{раб. доп}} = \left(\frac{V_{\text{г.н}}}{\gamma V \tau_{\text{сл}}} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (3.17)$$

К сожалению, в формуле (3.17) коэффициенты γ , V и m необходимо найти экспериментально, что сильно снижает ценность такого рода формул. Конкретные величины $E_{\text{раб. доп}}$ сильно зависят от рода изоляции и технологии ее изготовления.

Способность изоляции противостоять перенапряжениям, т. е. ее кратковременная прочность, определяет допустимые испытательные напряжения $U_{\text{исп}}$. При испытательных напряжениях в изоляции не должен наблюдаться пробой или необратимые изменения, способные развиваться в пробой при последующем длительном воздействии рабочего напряжения. Поэтому при выборе $U_{\text{исп}}$ обычно руководствуются следующими соотношениями:

$$U_{\text{исп}} < U_{\text{пр}}; U_{\text{исп}} < U_{\text{кр}}; U_{\text{исп}} > U_{\text{пер}}, \quad (3.18)$$

где $U_{\text{исп}}$ — испытательное напряжение (импульсное или промышленной частоты); $U_{\text{пр}}$, $U_{\text{кр}}$ — соответственно напряжение пробоя или критических ЧР; $U_{\text{пер}}$ — амплитуда возможных грозových или внутренних перенапряжений. Из условий (3.18) с учетом возможных статистических разбросов значений $U_{\text{пр}}$ и $U_{\text{кр}}$ могут быть найдены допустимые напряженности в изоляции при импульсных испытаниях:

$$E_{\text{исп. и}} = \bar{E}_{\text{пр. и}} - 3\sigma_{\text{пр}}$$

или при одноминутных испытаниях промышленной частоты

$$E_{\text{исп } 50 \text{ Гц}} = \bar{E}_{\text{кр}} - 3\sigma_{\text{кр}}.$$

Определение $\bar{E}_{\text{пр.и}}$ и даже $\bar{E}_{\text{кр}}$ для дорогих крупногабаритных изделий — операция практически невыполнимая, и величина $E_{\text{исп}}$ находится в этом случае по минимальным значениям $E_{\text{пр}}$ и $E_{\text{кр}}$ отдельных образцов с определенным коэффициентом запаса. Величины испытательных напряжений для различных видов изоляционных конструкций указаны далее в табл. 5.1 и 5.2. На рис. 3.39 показано также, что значения $U_{\text{исп.и}}$, $U_{\text{исп } 50 \text{ Гц}}$ и $U_{\text{раб.доп}}$ должны располагаться соответственно ниже $U_{\text{пр.и}}$, $U_{\text{кр}}$ и $U_{\text{чрп}}$.

4. ИЗОЛЯЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

4.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Внешняя изоляция высоковольтного оборудования подстанций и распределительных устройств (РУ) состоит из воздушных промежутков, опорных и проходных изоляторов. Характеристики, конструкции и выбор внешней изоляции РУ рассмотрены в гл. 2. Выполнение внутренней изоляции тесно связано с функциональным назначением оборудования. Изоляция, как правило, служит и для механического крепления конструкции, и для отвода тепла, а иногда несет и рабочие функции, например накопителя энергии в конденсаторах. Поэтому конструктивное выполнение внутренней изоляции отдельных видов оборудования специфично. Однако выбор материалов и размеров изоляционных конструкций определяется прежде всего необходимостью обеспечить требуемую кратковременную и длительную электрическую прочность при минимально возможных габаритах. Уровень внутренней изоляции и ее соответствие требованиям устанавливаются с помощью заводских и профилактических испытаний.

4.2. ПРОХОДНЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ 35 кВ И ВЫШЕ (ВВОДЫ)

При напряжении 35 кВ и выше для получения приемлемых габаритов проходных изоляторов их внутреннюю изоляцию приходится делать достаточно сложной. Такие проходные изоляторы называются **вводами**, так как используются чаще всего для ввода токопроводов внутрь аппаратов или помещений. Бумажно-бакелитовые вводы (рис. 4.1) изготавливаются путем намотки на токоведущий стержень слоев бумаги, пропитанной бакелитовым лаком. После полимеризации лака получается монолитная и достаточно прочная изоляция.

Для регулирования поля в толщу изоляции через некоторое число слоев бумаги в процессе ее намотки закладываются металлизи-

рованные обкладки. В результате изолятор получается в виде многослойного цилиндрического конденсатора. Длина обкладок и расстояние между ними выбираются такими, чтобы получить наиболее рациональное распределение радиальных составляющих напряженности поля в промежутке стержень — фланец и продольных составляющих вдоль поверхности изолятора и в его толще. Такой метод

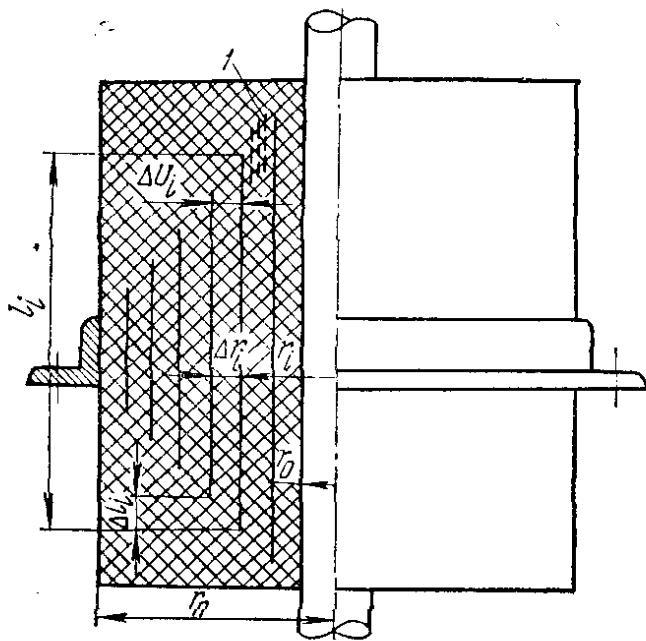


Рис. 4.1. Бумажно-бакелитовый ввод и регулирование поля с помощью конденсаторных обкладок:

1 — дополнительные обкладки-манжеты.

Если радиус обкладки цилиндрического конденсатора r_i много больше расстояния между обкладками, $\Delta r_i = r_{i+1} - r_i$, то, допуская незначительную погрешность, емкость C_i можно рассчитывать по формуле для плоского конденсатора:

$$C_i = \frac{\epsilon \cdot 2\pi r_i l_i}{\Delta r_i}.$$

Следовательно, равенство емкостей при одинаковой толщине изоляции между обкладками ($\Delta r_i = \text{const}$) возможно при $l_i r_i = \text{const}$.

Таким образом, изменяя длину обкладок обратно пропорционально радиусам, можно добиться равномерного распределения напряжения по слоям: $\Delta U_i = U/n$. Напряженность в пределах каждого слоя будет меняться по известному закону

$$E_r = \frac{U}{nr \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}},$$

а наибольшая и наименьшая напряженности определяются соотношениями:

$$E_{r \max} = \frac{U}{nr_i \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}; \quad E_{r \min} = \frac{U}{nr_{i+1} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}.$$

регулирования поля применяется не только в рассматриваемых вводах, но и в конденсаторных вводах с бумажно-масляной изоляцией, а также маслобарьерных вводах. Поэтому рассмотрим этот метод подробнее.

В типичной конструкции ввода из бакелизированной бумаги (см. рис. 4.1) условием равномерного распределения переменного напряжения U по слоям изоляции является равенство емкостей, образующих многослойный конденсатор: $C_1 = C_2 = \dots = C_i = \dots = C_n$. Если радиус обкладки цилиндрического конденсатора r_i много больше расстояния между обкладками, $\Delta r_i = r_{i+1} - r_i$, то, допуская незначительную погрешность, емкость C_i можно рассчитывать по формуле для плоского конденсатора:

Из рис. 4.2 хорошо видно, что при большом числе конденсаторных обкладок максимальная напряженность E_{\max} намного меньше, чем напряженность при отсутствии обкладок E'_{\max} , и может быть приближена к средней напряженности:

$$E_{\text{ср}} = \frac{U}{r_n - r_0}.$$

Снижение максимальной напряженности позволяет уменьшить толщину изоляции при данном рабочем напряжении U или увеличить рабочее напряжение при данной толщине изоляции.

Рассмотренное регулирование радиальных напряженностей приводит к неравномерному распределению напряжения U в осевом направлении. Равенство продольных напряженностей по слоям осуществляется при условии $E_l = dU/dl = \text{const}$. Это возможно, например, при $\Delta l_1 = \Delta l_2 = \dots = \Delta l_i = \dots = \Delta l_n$. Тогда средняя продольная напряженность по слоям

$$E_{l_i} = \frac{U}{n\Delta l_i} = \text{const}.$$

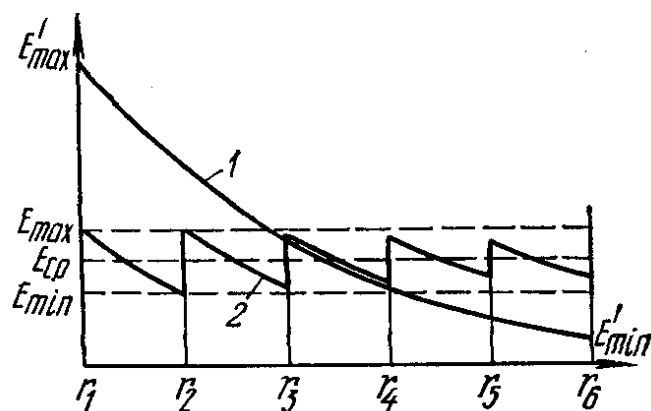


Рис. 4.2. Распределение радиальных напряженностей в изоляции проходного изолятора при отсутствии (кривая 1) и наличии (кривая 2) конденсаторных обкладок.

В конденсаторных вводах принимается обычно $E_{l_i} = \text{const}$ и делаются равными уступы Δl . При этом равномерное распределение радиальных напряженностей несколько нарушается, однако поле в радиальном направлении остается более однородным, чем при отсутствии обкладок. Наибольшие радиальные напряженности наблюдаются у крайних внешней и внутренней обкладок, а в средних слоях величины E_r уменьшаются. Для изоляции это часто благоприятно, так как средние слои хуже охлаждаются.

У края конденсаторных обкладок наблюдается резкое увеличение напряженности поля (краевой эффект). Это может вызвать развитие интенсивных ЧР и скользящих разрядов, разрушающих изоляцию. Для ослабления краевого эффекта используются дополнительные короткие обкладки-манжеты (см. рис. 4.1) или специальные разделки с увеличением радиуса кривизны края обкладки.

Наружная поверхность бумажно-бакелитового ввода покрывается водоотталкивающими лаками. Однако при появлении трещин в лаковом покрытии происходит увлажнение изоляции, что вызывает рост $\text{tg } \delta$ и как следствие тепловой пробой. Поэтому такие вводы применяются только в закрытых сухих помещениях.

Бумажно-бакелитовые проходные изоляторы, предназначенные для работы в наружных установках, выполняются с фарфоровой крышкой. Пространство между бумажно-бакелитовой изоляцией

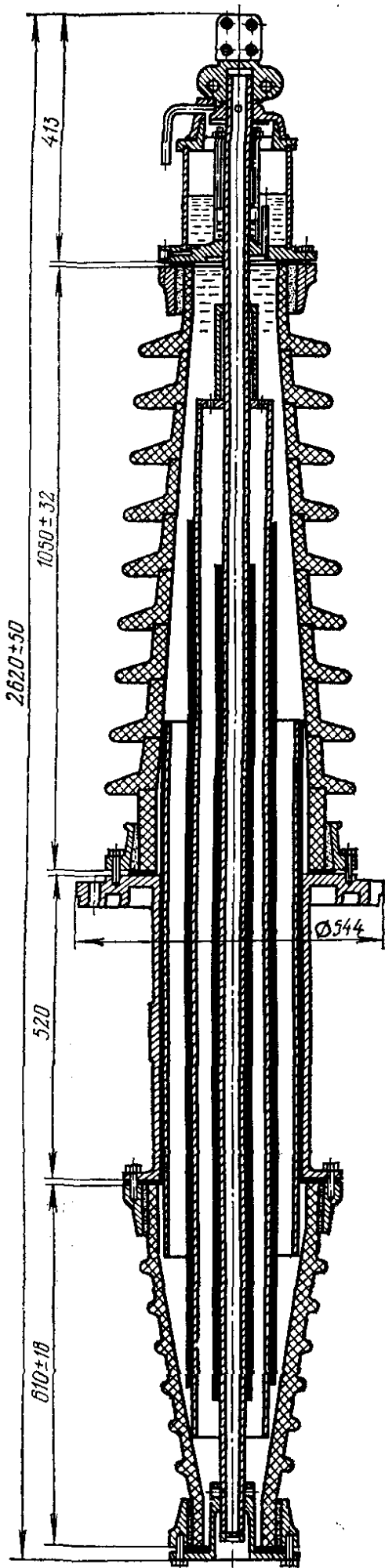


Рис. 4.3. Проходной изолятор на напряжение 110 кВ с маслобарьерной изоляцией.

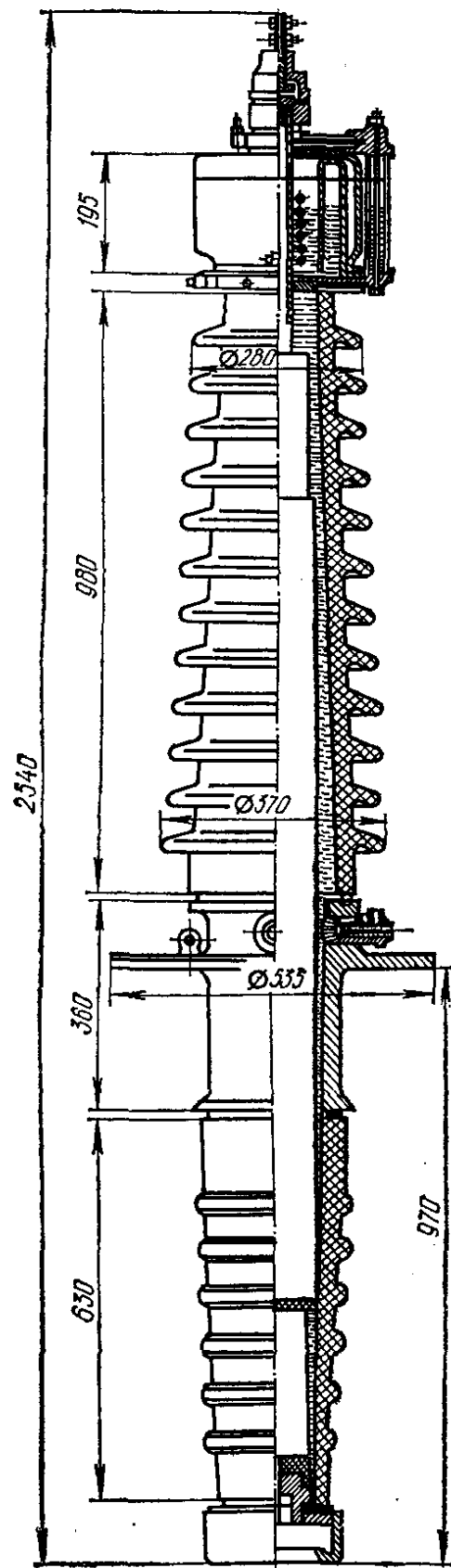


Рис. 4.4. Проходной изолятор на напряжение 110 кВ с бумажно-масляной изоляцией.

и фарфоровой крышкой заливается компаундом. Внутренняя часть должна быть надежно герметизирована для предупреждения попадания влаги внутрь ввода.

Маслобарьерные вводы (рис. 4.3) выпускаются на напряжение 110 кВ и выше. Конструктивно выполняются в виде двух фарфоровых крышек, которые крепятся на заземленном фланце. Внутреннее пространство заполнено маслом. Цилиндрические бумажно-бакелитовые барьеры покрыты металлическими обкладками для выравнивания напряженностей поля. В верхней части ввода располагается расширитель для компенсации температурных колебаний объема масла. Недостаток маслобарьерных вводов — сравнительно большие радиальные размеры изоляции, особенно при напряжениях 330, 500 кВ и более. Поэтому они вытесняются более совершенными конденсаторными вводами с бумажно-масляной изоляцией.

Бумажно-масляные конденсаторные вводы (рис. 4.4) выполняются, так же как и бумажно-бакелитовые проходные изоляторы, путем непрерывной намотки изоляционной бумаги на токоведущий стержень. По мере намотки между слоями закладываются металлизированные обкладки для регулирования поля. Стержень с бумажной намоткой помещается внутрь резервуара, выполненного из фарфоровых крышек, закрепленных на металлическом фланце, и залитого трансформаторным маслом. Перед пропиткой бумажная изоляция тщательно сушится и заливается дегазированным маслом под вакуумом. Высокая электрическая прочность изоляции таких вводов определяется хорошими изоляционными свойствами бумажно-масляной изоляции (см. § 3.5). Важно только не допустить увлажнения изоляции в процессе работы.

4.3. ИЗОЛЯЦИЯ СИЛОВЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Внутренняя изоляция трансформаторов, т. е. изоляция обмоток, отводов и других деталей, находящихся под напряжением и расположенных внутри корпуса (бака трансформатора), разделяется на главную и продольную. **Главная** изоляция обеспечивает изоляцию обмоток разных напряжений и фаз друг относительно друга и относительно заземленных частей (магнитопровода, бака). **Продольная** изоляция включает изоляцию между отдельными витками, катушками, отводами и другими элементами одной и той же фазы.

Основной изолирующей средой, применяемой в высоковольтных силовых трансформаторах, является трансформаторное масло в комбинации с твердыми материалами. Твердые материалы используются в виде покрытий, изолирования и барьеров. Особенности такого применения твердых и жидких материалов, а также основные качества маслобарьерной изоляции при воздействии различного рода напряжений рассматривались в гл. 3.

Назначение и номинальное напряжение трансформатора, конструктивное выполнение его обмоток, величина и характер возмож-

Табл. 4.1. Основные изоляционные размеры главной изоляции трансформаторов напряжением 3—35 кВ, мм

Номинальное напряжение обмотки ВН, кВ	A	B	E	b	d	$d_{м.ф}$
3—6	8—10	20—25	10	10	2,5	2
10	12	30	14	16	3,0	2
15	16	40	17	22	3,5	2
35	27	70	30	50	5,0	3

ных перенапряжений — вот те факторы, которые в основном определяют уровень и конструкцию главной и продольной изоляции трансформаторов.

Главная изоляция силовых трансформаторов напряжением 35 кВ и ниже выполняется сравнительно несложно (рис. 4.5). Изоляция состоит из масляного канала, разделенного одним барьером. В качестве барьера в промежутке между обмоткой высокого 5 и низкого 3 напряжений, а также между обмоткой низкого напряжения 3 и магнитопроводом 1 используются цилиндры 2, 4 из бумаги или электрокартона, в промежутке между фазами — плоская междуфазовая перегородка из электрокартона 6. Изолирующая шайба 7 отделяет обмотку высокого напряжения от магнитопровода.

Напряженность поля у торца обмотки высокого напряжения в 3—4 раза превышает напряженность в средней цилиндрической

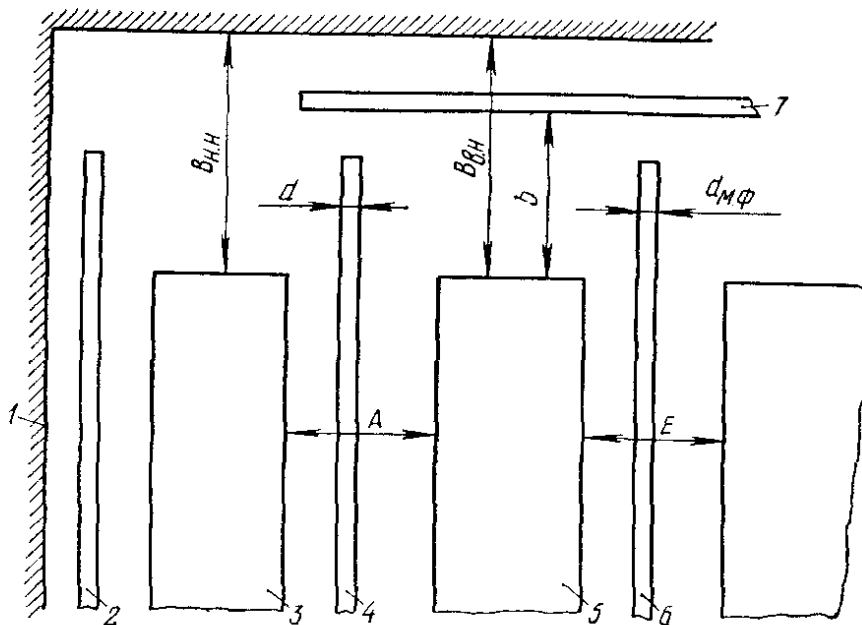


Рис. 4.5. Схема главной изоляции трансформаторов напряжением 3—35 кВ с вводом на конце обмотки.

части, поэтому этой зоне изоляции уделяется особое внимание. Однако при напряжениях 3—35 кВ принятая конструкция изоляции и изоляционные расстояния, указанные в табл. 4.1, обеспечивают необходимый уровень изоляции.

Резконеоднородное поле у края обмотки при напряжении 110 кВ требует значительного усиления изоляции в этой части. Достигает-

ся это (рис. 4.6) применением Г-образных шайб 2, которые тщательно перекрывают зазоры между цилиндрическими барьерами 1 с одной стороны и междуфазовой перегородкой 4 и барьерами 3 с другой. Первые катушки с торцов обмотки высокого напряжения имеют усиленную изоляцию и меньшие размеры, что также способствует снижению напряженности поля и увеличению электрической

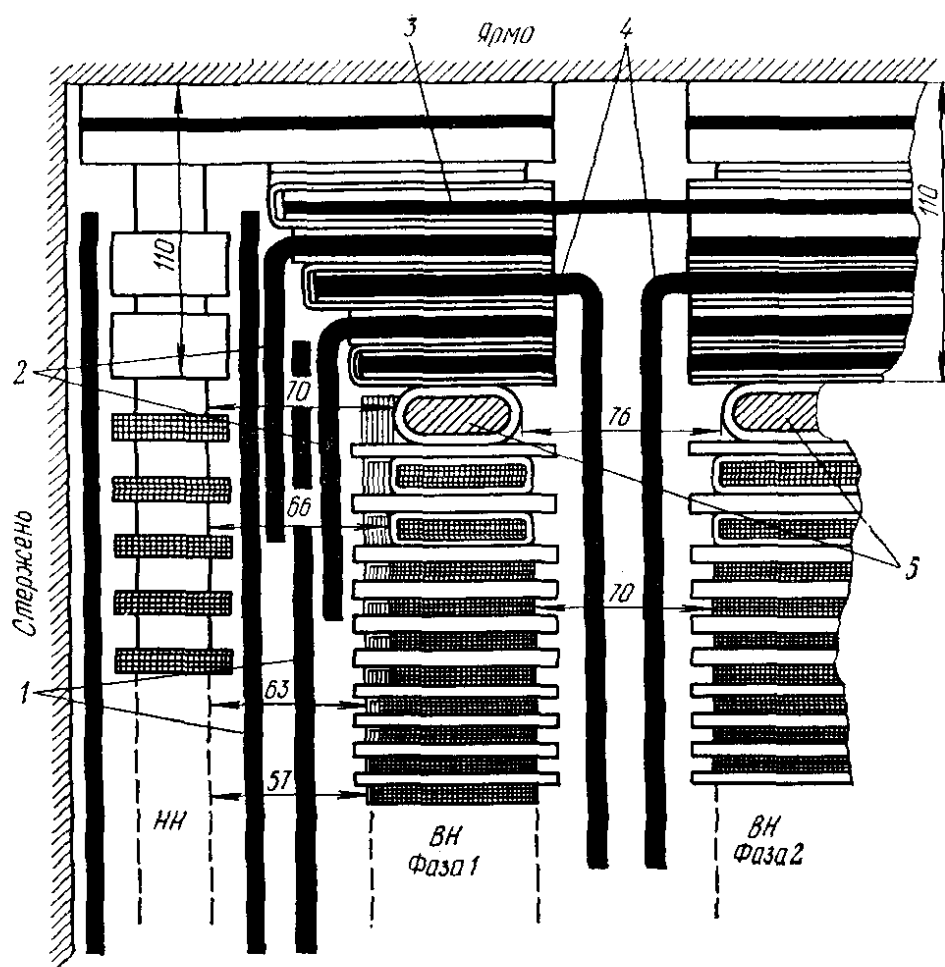


Рис. 4.6. Схема главной изоляции трансформатора на напряжением 110 кВ.

прочности у края обмотки. Емкостное кольцо 5 улучшает распределение напряжения вдоль обмотки при перенапряжениях, а также способствует снижению степени неоднородности поля. В средней части обмотки трансформаторов напряжением 110 кВ поле сравнительно однородно, и на пути разряда устанавливаются только два цилиндра толщиной 6 мм.

При напряжении 220 кВ и выше конструктивное выполнение изоляции трансформаторов еще более усложняется. Особенно трудно выполнить надежную изоляцию у края обмотки. Для облегчения этой задачи применяют обмотки с выводом высокого напряжения от средней точки. Обмотка разделяется на две параллельные ветви. Два конца обмотки, имеющих выводы в торцевой части, соединяются вместе и, соединяясь с концами обмоток других фаз, образуют нейтраль трансформатора. Поскольку в системах с заземленной нейтралью напряжение на нейтрали невелико, выполнение изоляции у торцов обмотки облегчается. В зоне линейного

ввода электрическое поле сравнительно равномерное, что упрощает проблему изолирования частей обмотки, находящихся под наибольшим потенциалом.

За рубежом выпускаются высоковольтные трансформаторы с бумажно-масляной главной изоляцией. Электрическая прочность бумажно-масляной изоляции выше, чем маслобарьерной. Однако при выполнении такой изоляции возникает ряд затруднений: необходимо осуществить плотную намотку бумаги; поле должно быть перпендикулярно к слоям бумаги; затрудняется циркуляция масла и ухудшается теплоотвод; сложно выполнить сушку, пропитку и дегазацию изоляции.

Имеются также специальные силовые трансформаторы с воздушной или элегазовой изоляцией для работы во взрывоопасных или пожароопасных помещениях (шахты и т. п.). Плохие условия теплоотвода в таких сухих трансформаторах ограничивают их мощность. Более компактны и перспективны конструкции с испарительным охлаждением при использовании легкокипящих жидкостей, например фреона.

Для изоляции отводов и перемычек обмотки их располагают в масле на необходимых расстояниях от конструктивных деталей и обмоток. Расстояния определяются по опытным кривым. Проводники отводов, находящиеся под высоким напряжением, имеют изолирование — относительно толстый слой бумажно-масляной изоляции или изоляции из лакоткани (в местах резких изгибов). Например, в изоляции трансформаторов напряжением 110 кВ толщина изолирования отвода высокого напряжения 20 мм; расстояние по маслу от отвода до заземленной части в области однородного поля порядка 100 мм, в области резконеоднородного поля 180—190 мм, расстояние по дереву до заземленной части 435 мм.

Продольная изоляция обмоток трансформаторов изготавливается из тех же материалов, что и главная. Обмоточные провода имеют бумажную или хлопчатобумажную оплетку, которая изолирует виток от витка. Выполнение продольной изоляции в целом зависит от конструкции обмотки и схемы ее соединения.

Обмотки высокого напряжения трансформаторов 6—35 кВ небольшой мощности часто выполняются цилиндрическими многослойными (рис. 4.7, а). Обмотка спирально наматывается из провода 2 круглого сечения на бумажно-бакелитовый цилиндр 1. Между слоями находится изоляция 3 из кабельной бумаги. Слои для улучшения условий охлаждения разделяются на группы (обычно две) масляными каналами.

Более широкое распространение (трансформаторы напряжением 6—35 кВ повышенной мощности и трансформаторы 110 кВ и выше) получили непрерывные катушечные обмотки (рис. 4.7, б). Витки катушек 1 наматываются из провода 2 прямоугольного сечения, изолированного бумагой. Катушка состоит из группы витков (до нескольких десятков). Между катушками (рис. 4.7, в) изоляция обеспечивается прокладками 1 из электрокартона и масляными каналами 2, которые одновременно улучшают охлаждение обмотки.

Наряду с непрерывными катушечными применяются также дисковые обмотки, которые собираются из отдельных дисков с усиленной витковой и междудисковой изоляцией.

В нормальном установившемся режиме напряженности поля в продольной изоляции обмоток невелики. Однако они резко увеличиваются, достигая опасных величин, в переходных режимах, особенно при падении на обмотку трансформатора импульсных волн

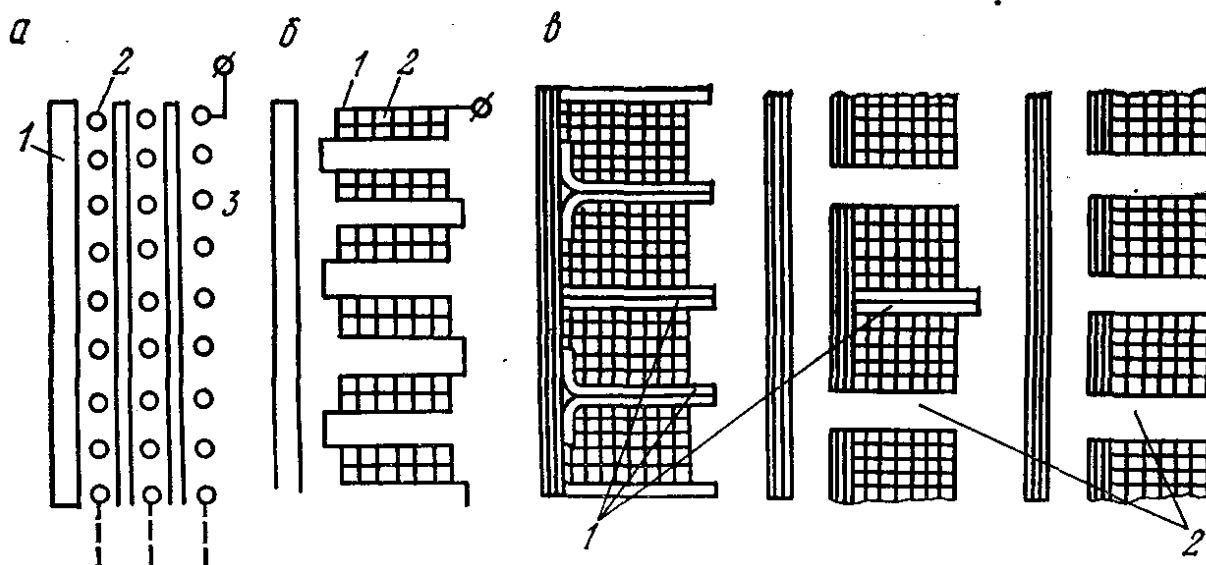


Рис. 4.7. Конструкции обмоток и их продольная изоляция.

атмосферных перенапряжений. Именно эти условия определяют уровень и особенности конструкции изоляции трансформаторов. Правильным, рациональным конструированием трансформатора можно значительно снизить опасные перенапряжения в элементах главной и продольной изоляции. Переходные процессы в обмотках трансформатора при воздействии грозových волн, способы снижения опасных перенапряжений и методы выравнивания распределения напряжения вдоль обмотки рассмотрены далее, в § 8.8.

4.4. ИЗОЛЯЦИЯ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

4.4.1. Общие принципы выполнения кабельной изоляции. Методы повышения допустимых рабочих напряженностей

Кабельные линии значительно дороже воздушных и поэтому применяются в основном в сильно застроенных районах городов, на территории промышленных предприятий, при переходах через протяженные водные преграды, т. е. там, где сооружение воздушных линий или экономически невыгодно, или просто невозможно.

Изоляция жил кабеля друг от друга и от наружной металлической защитной оболочки осуществляется с помощью слоя изолирующего материала, который должен обладать определенной электрической и механической прочностью. Чаще всего изолирующим материалом служит кабельная бумага, плотно намотанная на

жилу и пропитанная минеральным маслом или маслом с добавками, увеличивающими его вязкость и стабильность. Выполнение и технология пропитки и сушки такой изоляции описаны в п. 3.5.1. Имеются кабели, в которых для пропитки используется газ при высоком давлении. При напряжениях 3—35 кВ применяются также кабели с пластмассовой и резиновой изоляцией.

На напряжения до 35 кВ силовые высоковольтные кабели выпускаются чаще всего трехжильными, на напряжения 110—500 кВ и выше — одножильными.

Бумажно-масляная изоляция кабелей подвергается воздействию рабочих напряжений, коммутационных, а иногда (если кабель связан с воздушными сетями) грозовых перенапряжений. Характеристики и механизм пробоя бумажно-масляной изоляции достаточно подробно рассматривались в § 2.5.

Пробой изоляции кабеля носит тепловой или ионизационный характер, и для увеличения допустимых рабочих напряженностей в кабельной изоляции применяются следующие методы.

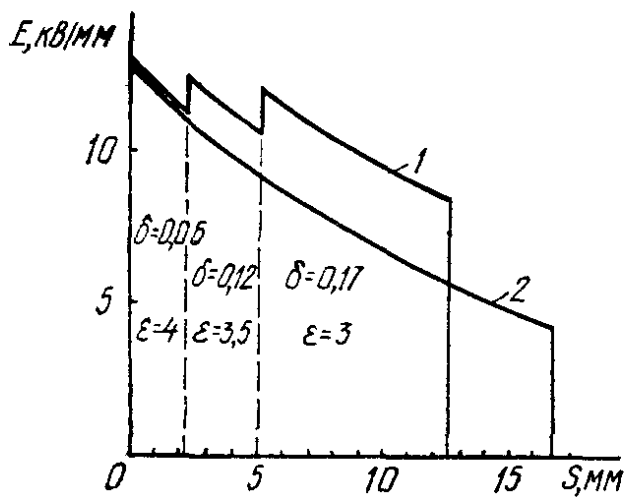


Рис. 4.8. Распределение напряженности по толщине градированной (кривая 1) и неградированной (кривая 2) изоляции кабеля 110 кВ. Неградированная изоляция выполнена из бумаги толщиной $\delta = 0,06$ мм с $\epsilon = 4$.

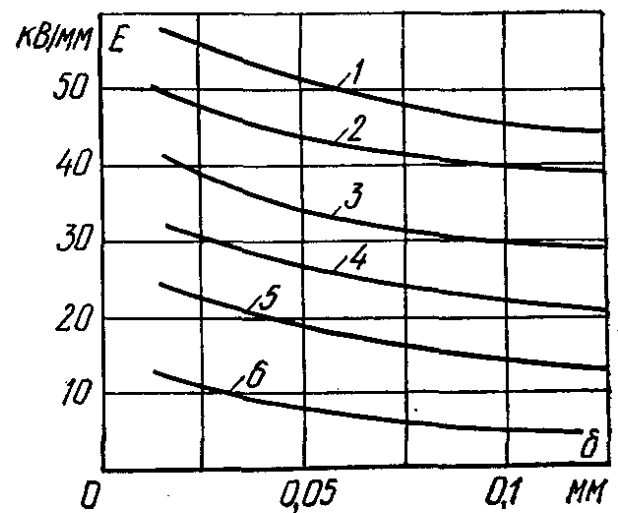


Рис. 4.9. Зависимость пробивной напряженности от толщины лент пропитанной бумаги при давлениях 1,6; 1,1 и 0,2 МПа (кривые 1, 2 и 3) и обедненно пропитанной бумаги при давлениях азота 3,0; 1,6 и 0,6 МПа (кривые 4, 5 и 6).

1. Регулирование поля путем применения проводящих или полупроводящих экранов, устраняющих местные увеличения напряженности, например на поверхности многопроволочных жил.

2. Применение поверх изоляции каждой жилы собственных металлических оболочек или экранов из полупроводящей бумаги, а также выполнение одножильных кабелей. Эти меры приводят к радиальному полю, т. е. устраняют тангенциальную относительно окружности жил составляющую поля, которая неизбежно присутствует в трехфазных кабелях с поясной изоляцией, снижая их прочность. Кроме того, применение экранов способствует устранению ЧР в зазорах между изоляцией и металлической оболочкой, а полупроводящая бумага поглощает продукты старения масла.

3. Градирование изоляции, которое выполняется в кабелях 110 кВ и выше с помощью бумаги различной плотности и толщины. Более тонкая и плотная бумага имеет бóльшую диэлектрическую проницаемость и электрическую прочность (рис. 4.8) и навивается слоем, ближайшим к жиле. Последующие слои выполняются из более дешевой, имеющей меньшую электрическую прочность бумаги. Градирование изоляции позволяет снизить напряженности у жилы или уменьшить толщину изоляции, осуществив более равномерное распределение напряженности по толщине изоляции. Как видно из рис. 4.8, применение трехслойного градирования уменьшает толщину изоляции маслонаполненного кабеля 110 кВ с 16,8 до 12,6 мм.

4. Применение масла или газа под давлением, которое затрудняет возникновение и развитие ЧР и значительно увеличивает электрическую прочность бумажно-масляной или бумажно-газовой изоляции (рис. 4.9). Повышение давления снижает также зависимость пробивной напряженности от времени приложения напряжения и позволяет стабилизировать электрическую прочность изоляции на высоком уровне.

4.4.2. Конструкции силовых кабелей высокого напряжения

Кабели с вязкой пропиткой. Пропитка бумаги в этих кабелях выполняется масляно-канифольным компаундом. Добавка в масло канифоли (10—30 % объема масла) обеспечивает повышенную вязкость пропитываемой массы, что необходимо для предотвращения вытекания компаунда из концов кабеля и перетекания компаунда в кабеле при наклонных трассах. Ленты бумаги плотно навиваются на жилу кабеля по спирали с зазором. Зазоры необходимы для предупреждения разрывов ленты при изгибании кабеля (см. п. 3.5.1 и рис. 3.23).

Трехфазные кабели на напряжение не выше 15 кВ обычно выполняются с поясной изоляцией. Конструкция такого кабеля приведена на рис. 4.10. Для лучшего использования сечения кабеля жилам 1 придается секторная форма, каждая жила охватывается фазовой изоляцией 2, повторяющей секторную форму жилы. Поверх фазовой изоляции все три жилы охватываются поясной изоляцией 3. Пространство между изолированными жилами заполняется низкосортной изоляцией (жгуты, скрученные из бумаги) 4. Поверх поясной изоляции накладываются герметическая свинцовая или алюминиевая оболочка 5 и защитная броня из стальных лент или проволок 6. Броня защищается от коррозии битумным составом и пропитанной пряжей 7.

Толщина поясной изоляции несколько меньше, чем фазовой, так как наибольшие тангенциальные составляющие напряженности наблюдаются в пространстве между жилами. Кроме того, междуфазовая изоляция работает все время под линейным напряжением, в то время как линейное напряжение между фазой и оболочкой может появиться лишь на время при металлическом замыкании одной

из фаз на землю (применительно к системе с изолированной нейтралью). Неизбежное наличие газовых включений и значительные тангенциальные составляющие напряженности поля, связанные с развитием ветвистого разряда, являются причинами того, что допустимые напряженности в кабелях с вязкой пропиткой и поясной изоляцией приняты сравнительно низкими (табл. 4.2).

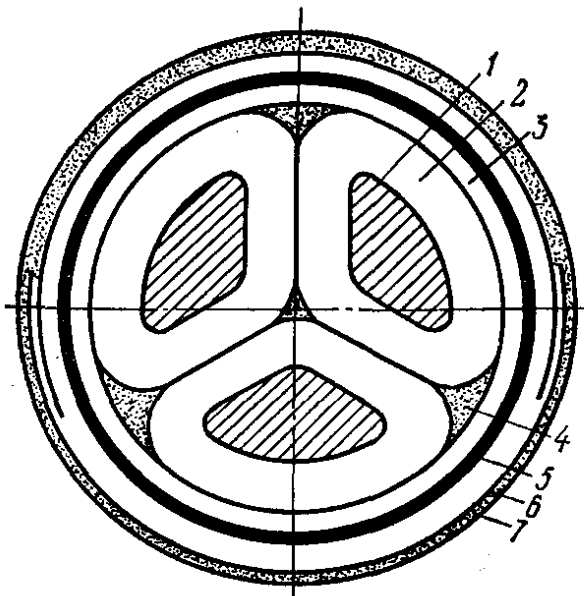


Рис. 4.10. Трехжильный кабель с поясной изоляцией.

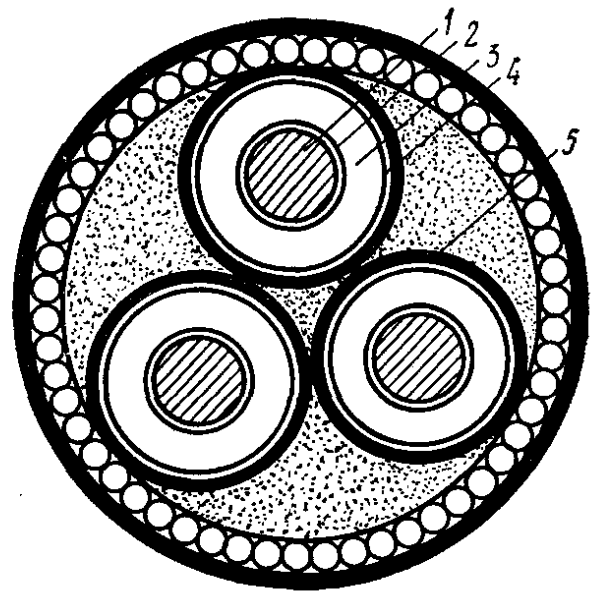


Рис. 4.11. Трехфазный кабель на напряжение 35 кВ с отдельно свинцованными жилами.

При напряжениях 20 и 35 кВ применяются кабели с отдельно свинцованными жилами или кабели с экранированными жилами. В этих кабелях (рис. 4.11) для создания радиального поля и устранения местного усиления поля у многопроволочной круглой жилы поверх жилы 1 и фазовой изоляции 3 накладывают экраны 2, 4 из фольги или металлизированной бумажной ленты. Радиальность поля позволяет увеличить напряженность в изоляции кабелей рассматриваемых типов почти в два раза по сравнению с кабелями с поясной изоляцией (см. табл. 4.2). Кабели с отдельно свинцованными жилами допускают увеличение токовых нагрузок по сравнению с кабелями с поясной изоляцией и с тем же сечением жил на 10—20%. Это объясняется тем, что наличие трех свинцовых оболочек 5 улучшает условия отвода тепла.

Табл. 4. 2. Толщина изоляции и допустимые рабочие напряженности электрического поля кабелей с вязкой пропиткой

Номинальное напряжение, кВ	Толщина изоляции, мм		Допустимая рабочая напряженность, кВ/мм
	фазовой	поясной	
1	0,75—0,95	0,5—0,6	1,0
3	1,35	0,7	1,5—2,0
6	2,0	1,0	1,5—2,0
10	3,0	1,4	1,5—2,0
20	6—7	—	2,5—3,5
35	8—10	—	2,5—3,5

Нормальные кабели на напряжения 3—35 кВ с вязкой пропиткой нельзя использовать для вертикальных прокладок при разности уровней больше 10—15 м или на протяженных сильно наклонных трассах, так как пропиточная масса будет стекать, и оболочка кабеля деформируется. Для вертикальных прокладок используются специальные кабели с обедненной пропиткой изоляции. Изоляция таких кабелей пропитывается обычным способом, а затем кабель подвергается дополнительному нагреву до 70 °С, в течение которого 70 % пропиточной массы из кабеля вытекает. Оставшаяся масса не стекает при вертикальной прокладке, так как удерживается капиллярными силами. Обедненная изоляция имеет худшие электрические характеристики, поэтому толщина ее должна быть увеличена по сравнению с изоляцией кабелей нормальной пропитки. Для кабелей на напряжение 6—10 кВ это увеличение составляет примерно 40 %.

Выпускаются также кабели с пропиткой бумаги битумными составами или составами на основе синтетических смол, не стекающими даже при высоких температурах.

Маслонаполненные кабели. При напряжении 110 кВ и выше бумажная изоляция жилы кабеля пропитывается чистым дегазированным, имеющим повышенную стабильность и газостойкость маслом, находящимся в кабеле под избыточным давлением. Маслонаполненные кабели выпускаются обычно одножильными и в зависимости от давления масла бывают низкого (до 0,2 МПа), среднего (0,4—0,6 МПа) и высокого (1,0—1,6 МПа) давления.

Масло проникает в изоляцию через зазоры в жиле из масляного канала в центре жилы, а также (в кабелях высокого давления на напряжения 220—500 кВ) из масляных каналов, выполненных в виде выточек в свинцовой оболочке. Типичная конструкция маслонаполненного кабеля приведена на рис. 4.12. Для непрерывного поддержания в проложенном кабеле необходимого избыточного давления и компенсации температурных колебаний объема масла вдоль трассы кабеля через 1—2,5 км устанавливаются специальные баки питания и давления, которые подключаются к кабелю в концевых и стопорных муфтах. С помощью последних масляный канал разделяется на отдельные герметичные по отношению друг к другу участки.

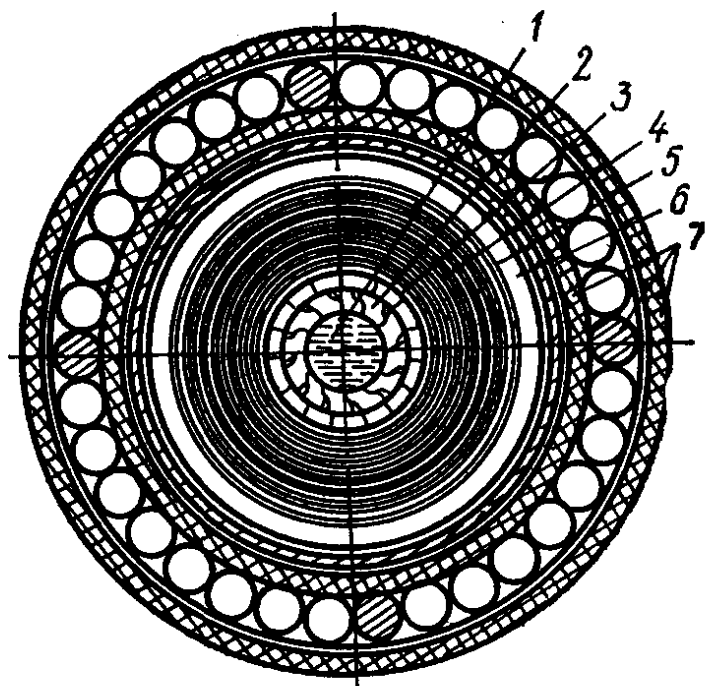


Рис. 4.12. Маслонаполненный кабель среднего давления на напряжения 110—220 кВ:

1 — маслопроводящий канал; 2 — жила; 3 и 5 — экраны из полупроводящей бумаги; 4 — изоляция; 6 — свинцовая оболочка; 7 — усиливающие и защитные покрытия.

Радиальное поле, градирование изоляции (см. рис. 4.8) и поддержание в кабеле избыточного давления позволяют повысить допустимые напряженности в маслонаполненных кабелях и получить приемлемые толщины изоляции (см. табл. 4.3). Естественно, что с ростом номинального напряжения кабеля целесообразно применять и более высокие избыточные давления масла.

Табл. 4.3. Толщина изоляции и допустимые рабочие напряженности для маслонаполненных кабелей

Номинальное напряжение, кВ	Кабели низкого и среднего давления		Кабели высокого давления	
	толщина изоляции, мм	рабочая напряженность, кВ/мм	толщина изоляции, мм	рабочая напряженность, кВ/мм
110	12—9	6—7	—	—
220	20—16	7—10	18—12	8—12
500	—	—	28—24	11—13

Образование газовых включений и развитие ионизационного пробоя при рабочих напряженностях в маслонаполненных кабелях практически не наблюдаются. Опасность представляет возможность теплового пробоя. Поэтому в маслонаполненных кабелях надо применять материалы с низким $\operatorname{tg} \delta$, следить за уровнем электрических потерь и температурным режимом кабеля в эксплуатации.

Недопустимо ухудшение характеристик масла или снижение его давления в результате утечки. Первая опасность может быть устранена применением конструкций кабеля с постоянной циркуляцией масла сквозь изоляцию, что позволяет следить за его качеством, вести дополнительную очистку и дегазацию и улучшить охлаждение изоляции; вторая опасность предотвращается автоматической сигнализацией о недопустимых изменениях давления на каждом участке кабельной трассы.

Характеристики маслонаполненного кабеля ухудшаются при низких температурах — ниже 0°C , так как при повышенных вязкостях ухудшается прочность. Это затрудняет применение маслонаполненных кабелей в северных районах.

Кабели в стальных трубах с маслом или газом под давлением (рис. 4.13). Эти кабели могут конкурировать с маслонаполненными и находят применение при напряжениях 110—500 кВ. Давление масла в трубе до 1,6 МПа.

В трубу 2, предварительно вакуумированную и высушенную, протягиваются все три изолированные фазы 5. Труба, диаметр которой в 2,6—2,8 раза больше, чем диаметр кабеля, надежно защищает изолирующий слой, и поэтому оболочка кабеля выполняется облегченной — две медные перфорированные ленты 4 поверх полупроводящего бумажного экрана. Для предотвращения повреждения кабеля при затягивании в трубу на медные ленты спирально накладываются медные или бронзовые полукруглые проволоки 1. После монтажа трубопровод заполняется под давлением маслом 3, кото-

рое пропитывает изоляцию 6. Давление в трубопроводе поддерживается автоматическими насосными подпитывающими станциями, которые располагаются на расстоянии 10—15 км друг от друга.

Транспортируются кабели в тонкой свинцовой или полиэтиленовой оболочке, которая снимается перед затягиванием кабеля в трубу. Эта герметизирующая изоляция оболочка может быть и не снята. В таком случае масло, заполняющее трубопровод и передающее давление на кабель, не будет соприкасаться непосредственно с изоляцией кабеля, не несет функций изолирующей среды и может иметь более низкие электрические характеристики. Вместо масла для заполнения трубы может быть применен азот под давлением 1,6 МПа. Давление затрудняет ионизацию в обедненно пропитанной изоляции таких кабелей.

Электрические характеристики кабелей в стальных трубах с маслом или газом под давлением находятся на уровне характеристик маслонаполненных кабелей, а стоимость кабельных трасс в стальных трубах даже несколько ниже стоимости маслонаполненных кабельных линий. Недостаток кабелей в трубах с маслом под давлением — большие объемы масла и сравнительно сложные подпитывающие станции; недостаток кабелей в трубах с газом под давлением — ухудшенные условия теплоотвода, что приводит к снижению допустимых токовых нагрузок.

Газонаполненные кабели. Кабели этого типа применяются на напряжения 35—220 кВ при прокладке на крутонаклонных трассах. Конструкция одножильного кабеля напоминает конструкцию маслонаполненного. Осушенный азот или азот с примесью 20 % элегаза под давлением заполняет газопроводящий канал в центре жилы и проникает в обедненно пропитанную изоляцию. Давление газа увеличивает электрическую прочность изоляции и затрудняет развитие ионизационных процессов. Применяют кабели низкого (до 0,3 МПа), среднего (0,4—0,7 МПа) и высокого (1,2—1,6 МПа) давления. Давление в кабелях поддерживается автоматически от баллонов со сжатым газом, соединенных с кабелем с помощью специальных муфт. Арматура подпитки, однако, здесь дешевле и проще, чем на трассах маслонаполненных кабелей.

На напряжение 35 кВ выпускаются также трехжильные кабели (рис. 4.14). Газопроводящие каналы 1 расположены между жилами 2 вблизи свинцовой оболочки 3.

Кабели с пластмассовой и резиновой изоляцией. Все более широкое распространение находят кабели со сплошной полиэтилено-

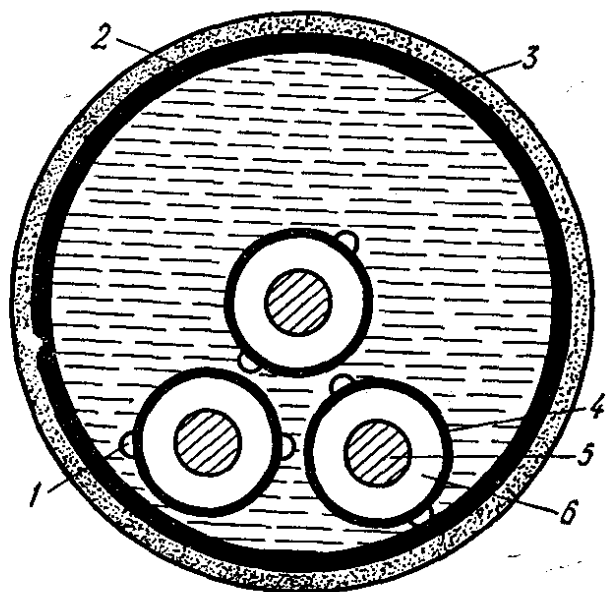


Рис. 4.13. Маслонаполненный кабель в стальной трубе.

вой изоляцией, накладываемой на жилу методом выдавливания. Хотя допустимые напряженности в изоляции этих кабелей невелики — до 2—2,3 кВ/мм, они могут успешно конкурировать с кабелями с вязкой пропиткой и выпускаются на напряжение до 35 кВ. Полиэтиленовые кабели легче, не требуют сложных влагонепроницаемых оболочек, полиэтилен обладает высоким удельным сопротивлением и имеет малые диэлектрические потери. Низкие допустимые напряженности вызваны

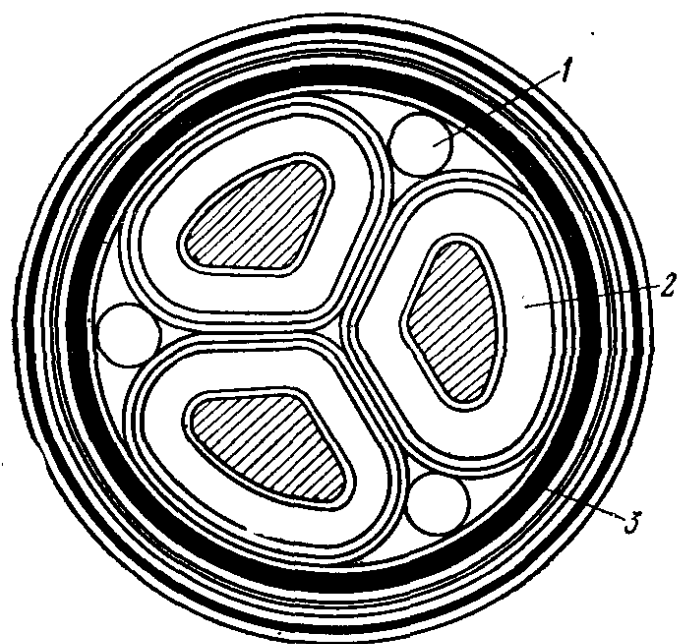


Рис. 4.14. Трехжильный газонаполненный кабель среднего давления на напряжении 35 кВ.

возможностью развития ионизационного пробоя (возникновения и прорастания дендритов) в изоляции этих кабелей при наличии воздушных включений и местных усилений поля. Последние в кабелях на напряжения 10 и 35 кВ стараются устранить применением полупроводящих и проводящих экранов поверх жилы и фазовой изоляции кабеля.

Кабели с полихлорвиниловой и резиновой изоляцией выпускаются на напряжения до 6 кВ и имеют худшие электрические характеристики, чем кабели с полиэтиленовой изоляцией.

Кабели постоянного напряжения. Развитие ионизации и ветвистых разрядов в бумажно-масляной изоляции при постоянном напряжении затруднено (см. п. 3.5.2). Поэтому допустимые напряженности в кабелях с вязкой пропиткой при постоянном напряжении могут быть увеличены до 25—35 кВ/мм, т. е. в 5—7 раз по отношению к амплитудному значению допустимой напряженности при переменном напряжении. Это позволяет значительно уменьшить толщину изоляции и изготавливать кабели с вязкой пропиткой на постоянное напряжение до 220 кВ. При постоянном напряжении 400 кВ и выше возможно применение маслонаполненных кабелей и кабелей в стальных трубах с маслом под давлением.

Новые разработки высоковольтных кабелей. Воздушные линии 1150 кВ и выше переменного напряжения и 1500 кВ и выше постоянного напряжения являются, по-видимому, не единственным решением для передачи больших потоков энергии на очень дальние расстояния. Разрабатываются герметизированные токопроводы с газовой (элегаз) изоляцией под давлением. Внешняя (защитная) и внутренняя (токоведущая) металлические трубы укреплены твердыми изолирующими распорками. При напряжении 750 кВ и давлении элегаза 0,35 МПа диаметр такого однофазного «кабеля» составит примерно 1 м. Преимуществом таких кабелей являются малые диэлектрические потери, малая емкость на единицу длины,

самовосстановление изоляции после случайного пробоя. По сравнению же с ВЛ такие линии имеют все преимущества кабельных — минимальное влияние на окружающую среду, отсутствие значительных потерь на корону, независимость характеристик изоляции от метеорологических условий и т. д.

Активно разрабатываются также криогенные кабели (охлаждение жил жидким азотом до температуры 77 К) и сверхпроводящие (охлаждение жидким гелием до 5 К). Эти кабели при сравнительно невысоких (10—110 кВ) напряжениях способны пропускать большие мощности за счет увеличения токовых нагрузок, и их предполагается использовать для глубоких вводов и транспортировки энергии в пределах крупных городов и промышленных предприятий.

Высокие электрические характеристики бумажно-масляной изоляции при постоянном напряжении делают технически возможным изготовление маслonaполненных кабелей на напряжение до 1 млн. В и более. Такие сверхвысоковольтные кабельные линии могут также явиться оправданным вариантом по сравнению с ВЛ постоянного тока 1500 кВ и выше.

Проводятся испытания кабелей 110 и 220 кВ с монолитной полиэтиленовой изоляцией. Эти кабели дешевле традиционных маслonaполненных, однако трудности, связанные с устранением образования пустот в полиэтилене при его наложении на жилу и развития дендритов в процессе работы, еще не вполне преодолены.

4.4.3. Кабельные муфты

Соединение отдельных участков кабеля между собой и разделка его концов осуществляется с помощью соединительных и концевых муфт. Монтируются они, как правило, при прокладке кабеля, т. е. в условиях, существенно отличающихся от заводских. Поэтому выполнение их требует особо высокой квалификации, и допустимые напряженности для изоляции соединительных муфт принимаются примерно в два раза меньшими, чем для собственной изоляции кабеля. Соединительные муфты для кабелей с вязкой пропиткой выполняются в металлическом кожухе, герметически связанном с оболочкой кабеля. Изоляция жил осуществляется намоткой кабельной

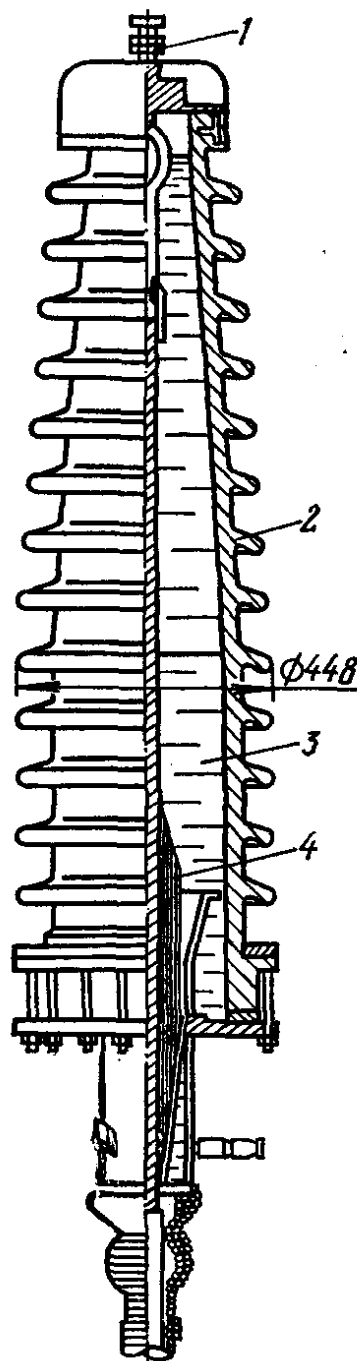


Рис. 4.15. Концевая муфта маслonaполненного кабеля 110 кВ:

1 — токовыводные устройства; 2 — фарфоровый изолятор; 3 — масло; 4 — пропитанная маслом бумага.

бумаги, перекрывающей ступенчатую или коническую разделку заводской изоляции. Пространство между изолированными жилами и корпусом заливается разогретой битумной мастикой или эпоксидным компаундом.

Концевые муфты кабелей на напряжения 6—10 кВ выполняются в виде заполненных битумным или эпоксидным компаундом воронок; в сухих помещениях распространена сухая разделка с применением полихлорвиниловой ленты и специальных клеящих лаков.

Стопорные и полустопорные соединительные муфты масло- и газонаполненных кабелей имеют сложную конструкцию, так как должны обеспечивать герметичность при высоких давлениях и необходимую электрическую прочность. Конструкции концевых муфт этих кабелей близки к конструкциям проходных изоляторов (рис. 4.15).

4.5. ИЗОЛЯЦИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

4.5.1. Основные сведения

Назначение и режим работы различных типов конденсаторов в значительной мере определяют их конструктивное выполнение и изоляцию. По виду рабочего напряжения силовые конденсаторы можно разделить на следующие группы.

1. Конденсаторы, длительно работающие при напряжении промышленной частоты. К этой группе относятся, например, конденсаторы, предназначенные для повышения $\cos \varphi$ промышленных установок (косинусные конденсаторы), конденсаторы продольной компенсации, устанавливаемые на длинных ВЛ. Изоляция этих конденсаторов может подвергаться воздействию внутренних и грозовых перенапряжений и должна иметь уровень и надежность, соответствующие остальной подстанционной аппаратуре.

2. Конденсаторы постоянного напряжения, применяемые в лабораторных и промышленных выпрямительных установках. Изоляция этих конденсаторов подвергается воздействию постоянного напряжения и пульсаций выпрямленного напряжения.

3. Конденсаторы, используемые в промышленных установках повышенной частоты, например в контурах высокочастотных электротермических установок.

4. Импульсные конденсаторы, работающие в режиме чередования медленной зарядки и быстрой разрядки. При этом разряд конденсатора может быть апериодическим или колебательным. Применяются они в лабораторных и промышленных установках для получения кратковременных импульсов напряжения или тока.

Силовой высоковольтный конденсатор собирается обычно из секций, соединенных перемычками в параллельную, последовательную или комбинированную схему (рис. 4.16). Секции в некоторых конструкциях подключаются к перемычкам через собственные предохранители. В этом случае пробой изоляции одной или нескольких секций еще не приводит к выходу из строя всего конден-

сатора. Секции 2 помещаются в герметический металлический или изолирующий (фарфоровый, бакелитовый) корпус 3. Вывод напряжения осуществляется с помощью проходных изоляторов 1. Изоляторы не применяются в случае изготовления бака из изоляционного материала.

Выделяющееся в конденсаторе тепло отводится от корпуса, поэтому конструкция конденсатора, а также размеры и компоновка

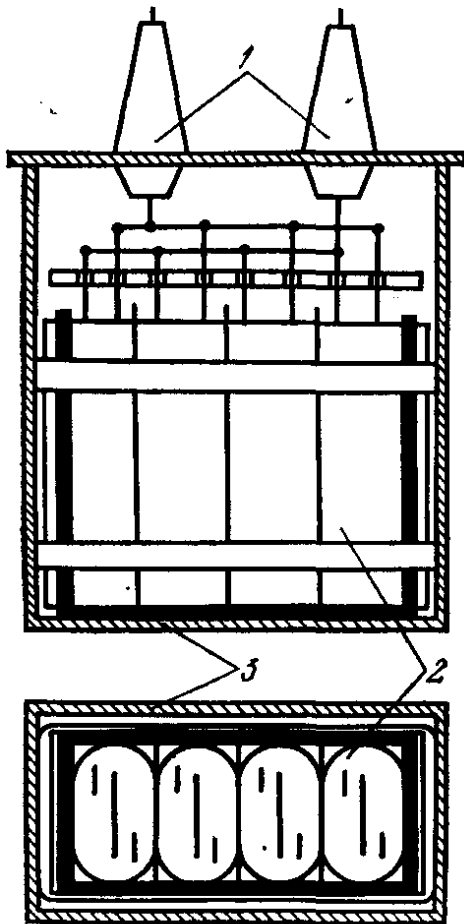


Рис. 4.16. Устройство силового конденсатора для повышения коэффициента мощности.

секций зависят от режима его работы и условий охлаждения. Для улучшения охлаждения конденсаторов, работающих в тяжелых режимах (высокочастотные конденсаторы), используются радиаторы на корпусе или змеевик водяного охлаждения, вмонтированный в корпус конденсатора.

Секции конденсаторов бывают пакетного и рулонного типов. Секции

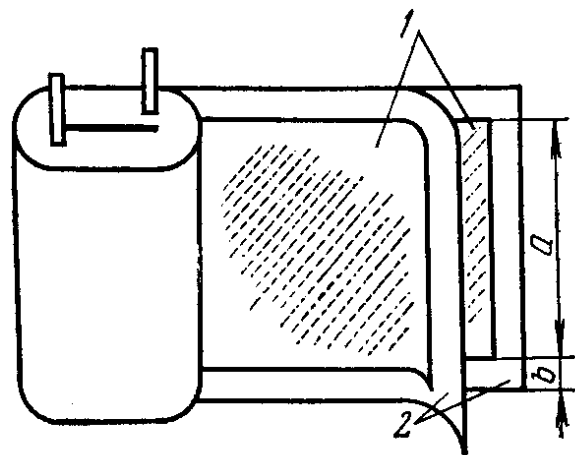


Рис. 4.17. Плоскопрессованная рулонная секция.

рулонного типа используются практически для всех видов высоковольтных конденсаторов и представляют рулон из лент диэлектрика 2 и алюминиевой фольги 1, обе стороны которой выполняют роль электродов (рис. 4.17). Рулон наматывается на цилиндр с относительно большим внутренним диаметром, а затем после снятия с оправки сплющивается. Такие секции удобно располагать в корпусе конденсатора.

Ёмкость отдельной рулонной секции

$$C_c = \frac{\epsilon a l}{d},$$

где a , l — соответственно ширина и длина электрода; d — толщина диэлектрика между электродами.

Энергия, запасенная в секции,

$$W = \frac{C_c U^2}{2} = \frac{\epsilon a l E^2 d^2}{2d} = \frac{1}{2} \epsilon V_c E^2,$$

где $E = U/d$ — напряженность поля в диэлектрике; V_c — объем активной части диэлектрика секции.

Полный объем конденсатора приблизительно пропорционален V_c , поэтому для уменьшения объема конденсатора и увеличения запасаемой в нем энергии (реактивной мощности для косинусных конденсаторов) необходимо использовать материалы с большей диэлектрической проницаемостью ϵ , допускающие по возможности большие рабочие напряженности. Важными характеристиками являются также $\operatorname{tg} \delta$ диэлектрика и его допустимая температура, так как от $\operatorname{tg} \delta$ зависят тепловыделение и нагрев конденсатора, а от температуры — допустимая напряженность и вольт-временная характеристика изоляции. Желательно, чтобы материал обладал наиболее благоприятным сочетанием перечисленных свойств, имел необходимые механические характеристики и невысокую стоимость.

4.5.2. Изоляция конденсаторов

Наиболее подходящим материалом, широко используемым при изготовлении конденсаторов всех типов, до настоящего времени является пропитанная конденсаторная бумага высокой плотности ($1\text{—}1,2 \text{ г/см}^3$), толщиной от 5 до 30 мкм. Для конденсаторов постоянного напряжения применяется также менее дорогая кабельная бумага толщиной 0,08—0,17 мм. Конденсаторная бумага выпускается двух сортов: КОН-I и КОН-II. Бумага КОН-II более плотная, имеет большие диэлектрические потери и применяется чаще в конденсаторах постоянного напряжения. Вместо бумаги могут быть использованы пленки из полимеров (полиэтилена, полипропилена) или полимерные покрытия наносятся непосредственно на фольгу. Пленки полимера могут чередоваться с листами бумаги. Пропитка бумаги значительно увеличивает ее электрическую прочность и повышает ее диэлектрическую проницаемость. В комбинированной бумажно-полимерной изоляции бумажные листы служат еще в качестве фитиля для втягивания пропитывающих жидкостей в глубь конструкции.

Для пропитки бумаги и заполнения корпуса конденсатора используется конденсаторное масло, имеющее повышенную химическую и термическую стойкость. Диэлектрическая проницаемость бумажно-масляной конденсаторной изоляции составляет примерно 3,8. При постоянном напряжении используется для пропитки также касторовое масло, имеющее более высокую диэлектрическую проницаемость ($\epsilon = 4,5$) по сравнению с минеральным и почти такую же электрическую прочность. При переменном напряжении касторовое масло не используется, так как оно имеет диэлектрические потери в 5—7 раз больше, чем минеральное.

В последнее время получили распространение конденсаторы, заполненные хлорированными жидкостями. Хлордифенилы (например, совол) имеют $\epsilon = 5\text{—}5,5$, стойки к действию ЧР, это позволяет увеличить допустимые напряженности и снизить вес и объем конденсатора в 2—2,5 раза по сравнению с конденсатором, заполненным минеральным маслом при той же величине реактивной мощ-

ности. Однако, как уже указывалось выше, пары хлорированных жидкостей токсичны. Это должно сильно ограничить или, возможно, совсем исключить их применение.

Основные свойства бумажно-масляной изоляции рассматривались в § 3.5. Несмотря на высокую кратковременную электрическую прочность, бумажно-масляная изоляция конденсаторов постепенно разрушается при напряжениях, лежащих значительно ниже кратковременной электрической прочности, вследствие воздействия ЧР при переменном напряжении и электрохимических явлений при постоянном.

Напряжение секции высоковольтного конденсатора определяется оптимальным числом листов бумаги в изолирующем слое (см. п. 3.5.1) и напряженностью, допустимой для данной конденсаторной изоляции заданной толщины. Слабые начальные ЧР у края обкладки (электрода) конденсаторов нормальной технологии пропитки и давления возникают при очень низких напряжениях. Напряжение возникновения начальных ЧР в листовой конденсаторной изоляции на уровне $q_x \approx 10^{-12}$ Кл определяется формулой (3.9). Более чувствительные методы исследования (см. п. 3.5.2) позволяют зафиксировать возникновение электронных лавин в масляной прослойке у края электрода при еще более низких напряжениях. В соответствии с результатами этих исследований напряженность возникновения начальных ЧР на уровне 10^{-14} — 10^{-15} Кл определяется соотношением

$$E_H = (1,8 - 1,6) d^{-0,58} \text{ кВ/мм}, \quad (4.1)$$

где d — толщина изоляции между обкладками.

Средние значения рабочей напряженности для изоляции конденсаторов, длительно работающих при промышленной частоте (изоляция выполняется из бумаги КОИ-I толщиной 10—12 мкм), рекомендуется рассчитывать по формуле

$$E_{\text{раб}} = 3d^{-0,58} \text{ кВ/мм}. \quad (4.2)$$

Принятые в соответствии с выражением (4.2) допустимые напряженности (10—14 кВ/мм при толщине изоляции 0,05—0,11 мм, т. е. 1—2 кВ на секцию) оказываются выше напряженностей возникновения начальных ЧР, определенных из соотношения (4.1).

Следовательно, слабые ЧР наблюдаются в конденсаторной изоляции в течение всего срока эксплуатации. Выделяющийся при этом газ растворяется в масле или химически связывается маслом. Однако постепенно масло насыщается газом, бумага подвергается эрозии, стареет и электрические характеристики изоляции снижаются. Скорость старения и срок службы конденсатора зависят от интенсивности ЧР и, следовательно, от рабочей напряженности. Указанные выше допустимые напряженности обеспечивают надежную работу конденсаторов в течение принятых сроков эксплуатации (20—30 лет). При сокращении этих сроков допустимые напряженности могут быть увеличены.

Внутренние и грозовые импульсные перенапряжения должны также учитываться при расчетах и проектировании конденсаторной

изоляции. Вспышки ЧР, которые возникают при перенапряжениях, приводят к постепенному накоплению дефектов (кумулятивный эффект), и поэтому рабочие напряженности в конденсаторах, которые подвергаются воздействию перенапряжений, должны быть снижены. Например, рабочие напряженности для конденсаторов продольной компенсации приняты в пределах 8—10 кВ/мм, для конденсаторов связи, емкостных трансформаторов напряжения, делителей напряжения на выключателях — в пределах 7—8 кВ/мм.

Интенсивность ЧР и тепловыделение в конденсаторах повышаются с ростом частоты приложенного напряжения. Для конденсаторов, длительно работающих при частоте 0,1—10 кГц, при естественном охлаждении рабочие напряженности снижаются до 5—6 кВ/мм, искусственное водяное охлаждение позволяет увеличить напряженности в изоляции таких конденсаторов до 8—10 кВ/мм.

При постоянном напряжении характеристики ЧР в бумажно-масляной конденсаторной изоляции значительно лучше, чем при переменном, а диэлектрические потери очень малы, поэтому для конденсаторов постоянного напряжения, работающих длительно при наличии небольших (до 10 %) пульсаций, рабочие напряженности увеличиваются до 25—40 кВ/мм, а при ограниченном сроке службы (конденсаторы для лабораторных установок и др.) — до 100 кВ/мм.

Конденсаторы, предназначенные для работы в импульсных установках, находятся под напряжением, как правило, кратковременно и чаще используются при пониженных напряжениях, поэтому рабочие напряженности для этих конденсаторов принимаются в пределах 40—100 кВ/мм.

Конденсаторы допускают кратковременные перегрузки по напряжению. Величина и длительность этих перегрузок регламентируются заводскими инструкциями, а для конденсаторов косинусных и продольной компенсации допускается длительная работа при напряжениях на 10 % выше номинального.

Допустимые рабочие напряженности в конденсаторах могут быть повышены при использовании избыточного давления в корпусе. Выпускаются силовые конденсаторы для длительной работы при промышленной частоте с избыточным давлением 0,4—0,6 МПа, $E_{\text{раб}}$ в таких конденсаторах обычно принимается равным 15—18 кВ/мм.

Кроме бумажнопропитанных конденсаторов, для высокочастотных установок используются керамические конденсаторы. Материалы, применяемые в них, имеют низкий $\text{tg } \delta$, величина которого снижается по мере повышения частоты.

Эталонные высоковольтные и высокочастотные конденсаторы должны иметь минимальные потери и стабильную емкость. Эти требования лучше всего обеспечивает газовая изоляция. Используя высокопрочные газы (элегаз, фреон) при повышенных давлениях (до 1,5 МПа и выше), получают достаточно компактные устройства на очень высокие напряжения — до 1,5 МВ включительно. В высоковольтных конденсаторах иногда как изоляция применяется также вакуум.

4.6. ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

4.6.1. Требования, предъявляемые к изоляции машин, и основные изолирующие материалы

Размеры изоляции статорных обмоток вращающихся машин жестко ограничиваются. Чем выше коэффициент заполнения паза медью, тем выше мощность машины при одинаковых габаритах. Уменьшение размеров изоляционного промежутка требует использования наиболее электрически прочных изоляционных материалов и проведения мероприятий по выравниванию поля в изоляции. Для обеспечения надежной и длительной работы изоляции машин необходимо учитывать сложные эксплуатационные условия и электрические, тепловые и механические характеристики изоляции.

Высокие напряженности в изоляции возможны при большом ее сопротивлении, низких диэлектрических потерях, высокой короностойкости и значительном напряжении возникновения ЧР. Непрерывное воздействие механических нагрузок и вибраций требует от изоляции электрических машин достаточной механической прочности и монолитности.

Увеличение плотности нагрузок в обмотках электрических машин при заданных условиях охлаждения связано с увеличением допустимой рабочей температуры изоляции и ее стойкости к тепловому старению. Срок службы изоляции машин лежит в пределах 20—30 лет и определяется как общим старением изоляции, так и моральным износом машины и установки в целом.

Особенно высокие требования предъявляются к изоляции мощных турбо- и гидрогенераторов. Увеличение плотности нагрузок в обмотках этих машин и удлинение срока их службы достигается также за счет использования систем форсированного охлаждения. При поверхностном воздушном или водородном охлаждении для обеспечения высоких удельных показателей изоляция машины должна иметь хорошую теплопроводность и повышенную нагревостойкость. При дополнительном внутреннем охлаждении циркуляцией воды по каналам внутри проводников статора тепловое сопротивление изоляции может быть увеличено.

Для изоляции статорных обмоток высоковольтных электрических машин применяются в основном высокопрочные изолирующие материалы на основе слюды: микалента, микафолий, слюдиниты.

Микалента представляет слой щипаной слюды, оклеенный с двух сторон бумагой. Ширина микаленты 12—35 мм, толщина 0,08—0,17 мм. Микалента гибка в холодном состоянии, клеящий масляно-битумный лак обеспечивает плотную намотку ее до нужной толщины изоляции.

Микафолий содержит 2—3 слоя щипаной слюды и с одной стороны оклеивается бумагой. Толщина микафолия 0,2—0,3 мм; по сравнению с микалентой он менее гибок, изолирование ведется в подогретом состоянии.

Миканиты — прокладочный и формовочный — используются для изготовления различного рода прокладок и фасонных деталей.

Слюдиниты изготавливаются из измельченной слюды в виде лент или листов. По своим электрическим и механическим свойствам они не уступают микаленте и миканитам.

Изоляция на основе слюды представляет сложную структуру, и для придания ей монолитности и плотности ее опрессовывают и пропитывают, например, масляно-битумными компаундами. Такого рода компаундированная изоляция относится к классу В (130 °С). При использовании подложек из стеклоленты и связующих эпоксидных терморезистивных смол слюдяная изоляция может быть отнесена к классу F (155 °С), а при пропитке кремнийорганическими лаками — к классу H (180 °С).

В низковольтных машинах широко используются волокнистые материалы, пропитанные различного рода лаками.

4.6.2. Типовые конструкции изоляции обмоток

Изоляция машин разделяется на **главную** и **продольную**. Главная изоляция — корпусная и междуфазовая, продольная — межвитковая или межкатушечная в катушечных обмотках машин малой и средней мощности.

По конструкции главную изоляцию высоковольтных двигателей и генераторов можно разделить на **гильзовую** и **непрерывную**. Гильзовая изоляция выполняется в пазовой части в виде микафольевой прессованной гильзы необходимой толщины. По выходе из паза на некотором удалении от металла статора гильза ступенями сходит на нет и заменяется изоляцией из микаленты. Низкая электрическая прочность неоднородной изоляции в месте перехода от гильзы к микаленте ограничивает использование такой изоляции машинами напряжением до 6,3 кВ.

Непрерывная микалентная компаундированная изоляция (рис. 4.18) являлась до недавнего времени основным типом изоляции высоковольтных машин. И в лобовой, и в пазовой частях эта изоляция выполняется однородной, толщина ее зависит от рабочего напряжения машины (табл. 4.4). Число слоев микаленты толщиной 0,13 мм в лобовых частях обычно равно номинальному напряжению машины (в кВ) плюс 2—3 слоя. В пазовых частях добавляются еще 1—2 слоя.

Для выравнивания поля в пазовой части углы прямоугольных токоведущих стержней закругляют или применяют прокладки из фольги и других проводящих материалов. Коэффициент неоднородности поля $k_H = E_{\max}/E_{\text{ср}}$, как видно из рис. 4.19, определяется в

Табл. 4.4. Толщина непрерывной микалентной изоляции в пазовой части

Номинальное напряжение машины, кВ	3,15	6,3	10,5	13,8	15,7	20
Толщина изоляции, мм	2	3	4	4,75	5,25	7

основном отношении r/h . Для принятых (см. табл. 4.4) толщин изоляции приемлемая величина $k_H \leq 1,3$ обеспечивается при $r=3-5$ мм.

Технология изготовления компаундированной микалентной изоляции кратко описана в п. 3.3.5. Здесь отметим еще, что перед пропиткой секции обмотки сушатся сначала при атмосферном давлении, а затем под вакуумом до окончания выделения влаги. После

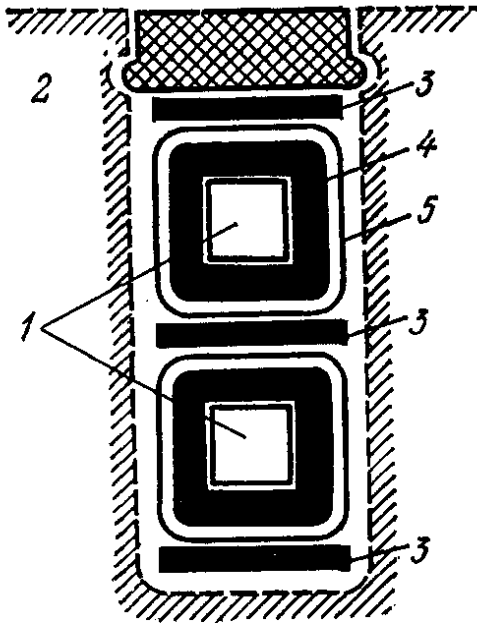


Рис. 4.18. Конструкция непрерывной микалентной изоляции:

1 — проводник; 2 — стенки паза; 3 — прокладки; 4 — микалентная изоляция; 5 — полупроводящее покрытие.

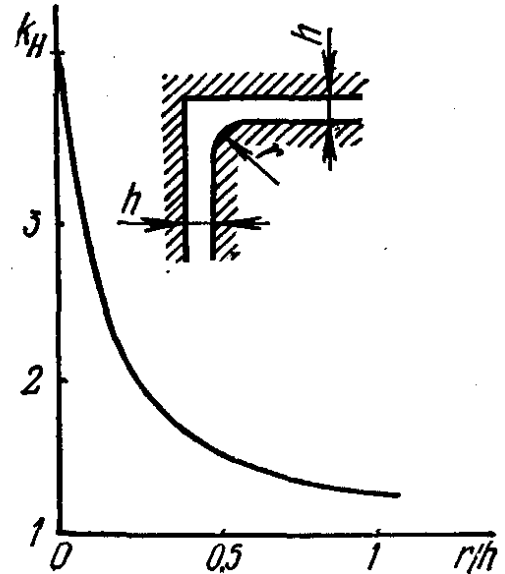


Рис. 4.19. Зависимость коэффициента неоднородности поля в пазу статора $k_H = E_{\max}/E_{\text{ср}}$ от отношения радиуса закругления токоведущего стержня r к толщине изоляции h .

сушки производится пропитка жидким компаундом при давлении 0,6—0,8 МПа (для лучшего проникновения компаунда в изоляцию). Высоковольтные стержни с большим количеством слоев микаленты изолируются и подвергаются компаундированию в несколько приемов. Для защиты от механических повреждений изоляция покрывается сверху одним слоем хлопчатобумажной ленты или стеклоленты. При напряжении свыше 6 кВ применяют полупроводящую ленту, например железисто-асбестовую, и поверхность обмотки покрывают слоем полупроводящего лака. Делается это для того, чтобы устранить ионизацию воздушных включений между обмоткой 1 и стенками паза 2 (рис. 4.20).

Полупроводящий слой выводится за пределы паза для устранения коронирования при выходе секции из паза. При отсутствии полупроводящего покрытия вследствие краевого эффекта напряженность поля в этом месте может быть достаточной для появления короны в воздухе (или водороде). Для эффективного выравнивания поля обычно полупроводящее покрытие выполняется в две-три ступени 4.

Первая ступень представляет пазовое полупроводящее покрытие с удельным поверхностным сопротивлением $\rho_{s1} = 10^3 - 10^5$ Ом, выведенное за пределы паза на расстояние 40—60 мм, затем следует

участок с $\rho_{S_2} = 10^7 - 10^9$ Ом, и, наконец, оставшаяся лобовая часть имеет сопротивление $\rho_{S_3} = 10^{12} - 10^{13}$ Ом.

Плотность поверхностного тока уменьшается при удалении от паза, и при принятом сочетании поверхностных сопротивлений распределение напряжения вдоль обмотки в лобовых частях и при выходе из паза выравнивается.

Уменьшить напряженности у края паза также можно, применяя в изоляции 3 внутренние полупроводящие экраны 5 (см. рис. 4.20).

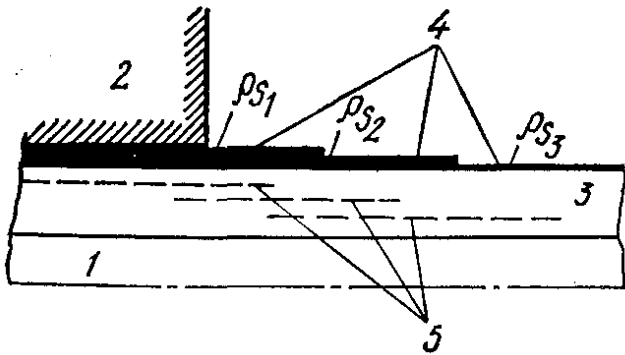


Рис. 4.20. Схема противокоронной защиты в месте выхода стержня из паза.

Такое регулирование поля напоминает градирование изоляции конденсаторного ввода (см. § 3.2). Однако этот метод более сложен и не получил широкого распространения.

Хорошее качество изоляционных материалов и совершенная технология изготовления обеспечивают среднюю электрическую прочность непрерывной микалентной изоляции до 20 кВ/мм и $\text{tg } \delta \approx 0,04$. Однако рабочие напря-

женности принимаются примерно в 10 раз меньшими, так как, с одной стороны, наблюдается значительный разброс пробивных напряжений изоляции электрических машин (отклонение от средних пробивных напряжений может составлять 40—60 %); с другой стороны, изоляция должна выдерживать возможные перенапряжения и испытательные напряжения. Кроме того, в процессе эксплуатации электрическая прочность изоляции снижается.

Значения пробивных напряжений изоляции машин при импульсах ненамного выше пробивных напряжений при промышленной частоте и также имеют большие разбросы.

Коэффициент импульса при стандартном грозовом импульсе для главной изоляции машин лежит в пределах 1,2—1,25.

Основной недостаток непрерывной изоляции из микаленты, пропитанной термопластичными битумными компаундами, состоит в том, что при температуре выше 100 °С компаунд размягчается, течет, образуются газовые включения, в которых возникают ионизационные процессы, разрушающие изоляцию. Поэтому в мощных турбогенераторах, в двигателях с тяжелым температурным режимом работы и других машинах все шире применяются новые типы изоляции с использованием стекломикаленты, стеклослюдинитовой ленты с пропиткой терморезактивными связующими на основе эпоксидных или полиэфирных смол и кремнийорганических лаков. Эти пропиточные массы имеют очень небольшое количество летучих растворителей и, полимеризуясь, образуют твердую монолитную изоляцию, практически лишенную воздушных включений.

В настоящее время возникает необходимость увеличить номинальное напряжение высоковольтных генераторов до 35 и 110 кВ.

Изоляция таких машин будет выполняться бумажно-масляной. Она недорога и обеспечивает высокую прочность и хорошее охлаждение. Опытные образцы генераторов с изоляцией этого типа уже находятся в эксплуатации.

5. ЗАВОДСКИЕ И ПРОФИЛАКТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

5.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПЫТАНИЙ

Контроль изоляции в процессе изготовления и приемо-сдаточные испытания при выпуске готового изделия с завода являются гарантией качества продукции и ее соответствия требованиям и нормам. На месте установки перед включением в работу электрооборудование также подвергается испытаниям, так как в процессе хранения, транспортировки и монтажа изоляция может ухудшиться. Объем и нормы заводских испытаний и испытаний на месте установки определяются при разработке новых типов оборудования или при освоении нового (более высокого) класса напряжения. При этом учитываются требования надежной работы и координации изоляции с воздействующими напряжениями. При изготовлении и выпуске электрооборудования с завода ГОСТом предусмотрены **типовые, периодические и приемо-сдаточные испытания.**

Типовые испытания наиболее полные, проводятся для каждого вновь осваиваемого типа электрооборудования или в случае изменения конструкции, замены применяемых материалов или технологии изготовления. Периодические испытания проводятся в установленные сроки для контроля качества продукции. Приемо-сдаточным испытаниям подвергается каждый образец при его выпуске с завода-изготовителя. Испытания у потребителя проводятся по программе приемо-сдаточных испытаний, при этом испытательные напряжения трансформаторов и изоляторов должны составлять не более 90 %, а керамических изоляторов — 100 % заводского испытательного напряжения.

Результаты заводских испытаний и испытаний на месте монтажа являются также исходным материалом для оценки изменения состояния изоляции в процессе эксплуатации.

Надежная и длительная эксплуатация электротехнических устройств и оборудования требует соблюдения нормальных условий и режимов работы и грамотного, квалифицированного ухода за ними. Однако и при нормальных условиях постепенно в результате воздействия высокого напряжения, термических и механических нагрузок, окружающей среды качество изоляции снижается. В изоляции возникают места с пониженными электрическими характеристиками — дефекты. Дефекты могут возникнуть в изоляции и как результат грубых эксплуатационных просчетов и случайностей — механических повреждений, перегрева, увлажнения.

Развитие дефектов и разрушение изоляции часто протекают сравнительно медленно и скрытно от эксплуатационного персонала. Для предотвращения аварий необходимо своевременно выявить наличие ослабленной или поврежденной изоляции и восстановить ее во время ремонта. Это требует систематического надзора и контроля за состоянием изоляции.

Установление типичных для данной изоляции дефектов, определение связи между электрическими характеристиками изоляции и возникающими дефектами, разработка и применение различных способов определения дефектов и методов восстановления дефектной изоляции являются мероприятиями контроля и профилактики изоляции.

Дефекты в изоляции можно разделить на две группы: **сосредоточенные (местные)** и **распределенные**. Сосредоточенные дефекты захватывают незначительный объем изоляции в виде местного увлажнения, трещин, раковин, газовых включений. Распределенные дефекты охватывают большую часть объема изоляции: увлажнение всей внутренней изоляции трансформатора, наличие большого числа газовых включений в бумажно-масляной изоляции конденсаторного ввода, загрязнение поверхности изолятора и т. д.

Испытания изоляции бывают двух видов: **разрушающие** и **неразрушающие**. При разрушающих испытаниях применяются повышенные по сравнению с рабочими напряжения. Достоинства таких испытаний заключаются в том, что они позволяют надежно выявить местные дефекты и повреждения в изоляции, которые невозможно или затруднительно обнаружить с помощью других методов. Недостаток испытаний повышенным напряжением — выход из строя изоляции при наличии дефекта и возможность появления дефектов в результате испытания.

При неразрушающих испытаниях определяются наиболее важные характеристики состояния изоляции: ее сопротивление, величина и характер изменения токов абсорбции, тангенс угла диэлектрических потерь, емкость изоляции при различных частотах и температуре, наличие и интенсивность частичных разрядов при рабочем напряжении, распределение напряжения по элементам изоляционной конструкции. Ценную дополнительную информацию могут дать химический анализ масла, количество и состав растворенных в масле газов и т. д. По результатам измерений этих характеристик можно составить мнение о состоянии изоляции. Небольшая опасность ошибочного истолкования результатов измерения всегда имеется, однако, используя несколько различных характеристик, в большинстве случаев можно правильно определить наличие и характер распределенных и некоторых местных дефектов.

Испытания повышенным напряжением производятся обычно после того, как с помощью комплекса неразрушающих испытаний выявлена предварительная исправность изоляции. Если изоляционная конструкция, например, увлажнена, то ее нужно предварительно высушить, убедиться, что она сухая, а затем уже подвергать действию повышенного напряжения.

Объем и нормы заводских и профилактических испытаний, необходимость и периодичность их проведения обосновываются технико-экономическими расчетами. Потери и затраты, связанные с выполнением таких испытаний, должны быть меньше возможного ущерба от неожиданного, аварийного повреждения изоляции в действующем оборудовании.

5.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩИХ ИСПЫТАНИЙ

5.2.1. Схема замещения диэлектрика

Поведение изоляции при воздействии различного рода напряжений удобно начать с рассмотрения приближенной схемы замещения образца диэлектрика (рис. 5.1). В этой схеме C_∞ — емкость образца, зависящая от его геометрических размеров и всех видов быстрой поляризации (электронной, ионной). Величина этой емкости не зависит от частоты приложенного напряжения вплоть до частот порядка мегагерц. Дополнительная емкость C_d обуславливается процессами накопления (абсорбции) зарядов при неоднородностях структуры диэлектрика (структурная поляризация) и дипольной поляризацией. Сопротивление r включено последовательно с C_d , так как процесс заряда и разряда емкости C_d связан с потерями энергии и протекает сравнительно медленно. Сопротивление R определяется сквозной проводимостью образца.

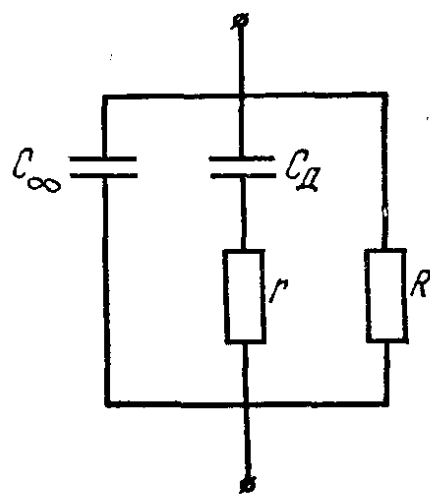


Рис. 5.1. Схема замещения диэлектрика (изоляции).

Схема рис. 5.1 помогает уяснить некоторые методы неразрушающих испытаний изоляции.

5.2.2. Измерение сопротивления изоляции и снятие кривых токов абсорбции

Измерение сопротивления изоляции производится стрелочными приборами при постоянном токе. Результаты измерения сравниваются с нормами или с результатами предыдущих испытаний. Поскольку сопротивление изоляции сильно зависит от температуры, то сравнивать можно только результаты, приведенные к одной температуре (обычно 20 °С).

Величина сопротивления изоляции зависит от длительности приложения напряжения. Для исключения влияния токов абсорбции, связанных с зарядом емкости C_d через сопротивления r , отсчет результатов производится через 1 мин после подачи напряжения (одноминутное значение), а иногда даже через 5 или 10 мин. При этом сопротивление изоляции приближается к своему

установившемся значению, равному сопротивлению сквозной проводимости R . Значительное снижение R указывает на сильное увлажнение или загрязнение толщи или поверхности изоляции. Резкое снижение сопротивления возможно также при наличии сквозного или почти сквозного сосредоточенного дефекта.

Спадание абсорбционного тока $i_{абс}$ с течением времени после приложения к изоляции постоянного напряжения U происходит по экспоненциальному закону:

$$i_{абс} = \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{T}},$$

где $T = rC_d$. Общий ток, который можно измерить с помощью стрелочных приборов, представляет сумму тока сквозной проводимости и абсорбционного тока:

$$i = \frac{U}{R} + \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{T}}.$$

Если изоляция сильно увлажнена или загрязнена, то ток сквозной проводимости $i_{ск} = U/R$ увеличится, и разница между токами в начале и конце процесса будет невелика. Таким образом, по отношению токов или соответствующих им сопротивлений, измеренных, например, через 15 и 60 с (или 1 и 10 мин) после подачи напряжения, можно также судить о состоянии изоляции. Как видно из кривых, приведенных на рис. 5.2, увлажнение или загрязнение изоляции приводит к снижению отношения R_{60}/R_{15} . Критерий R_{60}/R_{15} является хорошим показателем степени увлажнения при температурах ниже 35—40 °С. С ростом температуры ток сквозной проводимости сильно возрастает и отношение R_{60}/R_{15} и для сухой, и для влажной изоляции приближается к единице.

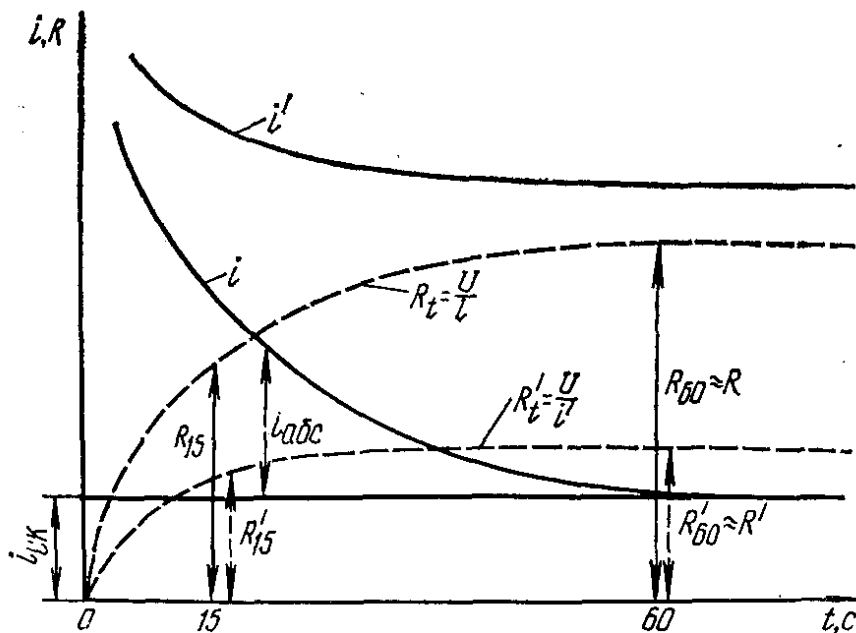


Рис. 5.2. Зависимость тока, протекающего через изоляцию (i , i'), и сопротивления изоляции (R_t , R_t') от времени при включении на постоянное напряжение. Кривые i' и R_t' относятся к увлажненной изоляции; R_t и i — к сухой.

В практике измерение сопротивления изоляции производится мегомметрами 0,5—2,5 кВ.

Приведенные способы и критерии широко распространены в практике контроля, но могут быть дополнены и другими методами с использованием соответствующих схем и приборов. Известен, например, способ контроля по «возвратному» напряжению. Сущность его заключается в следующем: если изоляцию подключить к постоянному напряжению U до полной зарядки емкостей C_∞ и C_d , а затем отключить от источника напряжения и на мгновение замкнуть, то при этом C_∞ полностью разряжается, а на C_d сохраняется заряд абсорбции $q_{abc} = C_d U$. После размыкания внешних электродов и подключения к ним прибора с очень большим входным сопротивлением (осциллограф, электронный вольтметр) можно наблюдать изменение «возвратного» напряжения. Используя схему замещения (см. рис. 5.1),

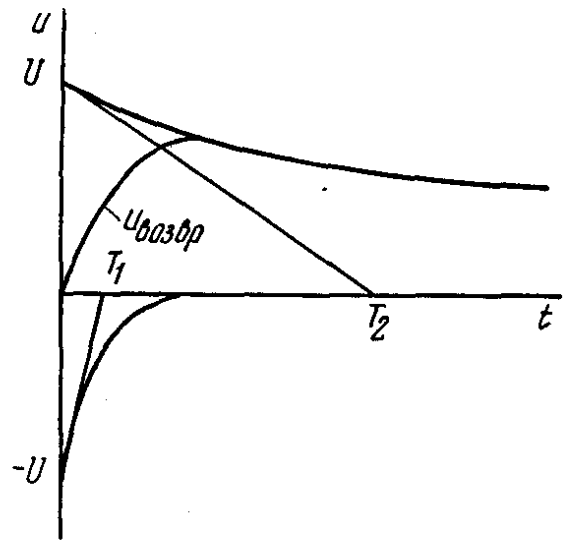


Рис. 5.3. Изменение во времени «возвратного» напряжения на образце изоляции.

нетрудно показать, что кривая «возвратного» напряжения (рис. 5.3) описывается соотношением

$$u_{\text{возвр}}(t) = U\beta \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right),$$

$$\text{где } \beta \approx \frac{1}{1 + \frac{C_\infty}{C_d} + \frac{r}{R}}; \quad T_1 \approx (R + r)(C_\infty + C_d); \quad T_2 \approx \frac{Rr}{R + r} \frac{C_\infty C_d}{C_\infty + C_d}.$$

По величине и форме возвратного напряжения можно судить о степени неоднородности или увлажнения изоляции. Рост увлажнения должен привести к росту C_d , снижению r и R . Поэтому при равномерном и сквозном увлажнении $u_{\text{возвр}}$ уменьшается и быстро спадает до нуля. Неравномерное увлажнение многослойной изоляции связано с ростом C_d при незначительном r и R , что может привести к некоторому росту $u_{\text{возвр}}$.

Те же закономерности лежат в основе способов оценки состояния изоляции по скорости изменения токов абсорбции и «кривым саморазряда». Последние находятся при разряде заряженных емкостей изоляции на внутренние сопротивления. Для однородной изоляции «кривая саморазряда» $u_{\text{ср}} = f(t)$ близка к экспоненте, и зависимость $\ln u_{\text{ср}} = \varphi(t)$ будет практически линейной. При увеличении степени неоднородности изоляции отличие этой зависимости от прямой линии будет возрастать.

5.2.3. Контроль изоляции по диэлектрическим потерям

Измерение угла диэлектрических потерь является наиболее распространенным методом обнаружения общего ухудшения состояния диэлектрика. Старение изоляции, сопровождающееся ее химическим разложением, деструкцией или расслоением, увлажнение изоляции, появление в ней большого числа газовых включений всегда приводят к росту диэлектрических потерь и могут быть обнаружены измерением $\text{tg } \delta$.

При переменном напряжении суммарный ток, протекающий в схеме замещения (см. рис. 5.1), равен

$$i_{\Sigma} = U \left(\frac{1}{R} + \frac{\omega^2 C_D^2 r}{1 + \omega^2 C_D^2 r^2} \right) + j\omega U \left(C_{\infty} + \frac{C_D}{1 + \omega^2 C_D^2 r^2} \right). \quad (5.1)$$

Из этого выражения можно найти $\operatorname{tg} \delta$ как отношение активного тока к емкостному. Полагая $R = \infty$, можно пренебречь током сквозной проводимости, так как он значительно меньше тока поляризации. При этом условии

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\omega C_D^2 r}{C_{\infty} + C_D + \omega^2 C_D^2 C_{\infty} r^2} = \frac{\left(\frac{C_0}{C_{\infty}} - 1 \right) \omega T}{\frac{C_0}{C_{\infty}} + \omega^2 T^2}, \quad (5.2)$$

где $C_0 = C_D + C_{\infty}$; $T = C_D r$.

Величины C_0/C_{∞} и T не зависят от формы и размеров объекта, так как при изменении размеров отношение C_0/C_{∞} не меняется, а r и C_D изменяются обратно пропорционально друг другу. Таким образом, показатель $\operatorname{tg} \delta$ обладает той удобной универсальностью, что величина его зависит не от габаритов изоляционной конструкции, а только от качества и состояния изоляции.

Для объектов, обладающих большой емкостью, измерение $\operatorname{tg} \delta$ позволяет обнаружить такие дефекты в изоляции, которые захватывают значительную часть ее объема (общее старение, увлажнение). Сосредоточенные дефекты, за исключением сильно развитых, на величину $\operatorname{tg} \delta$ практически не влияют. Если в небольшом объеме изоляции (допустим 2—3 % общего объема) $\operatorname{tg} \delta$ возрос в 3—5 раз, то измеряемое значение $\operatorname{tg} \delta$ возрастает только на 6—15 %, что не дает основания для вывода об ухудшении состояния изоляции. В объектах небольшой емкости (трансформаторы тока, вводы) величина $\operatorname{tg} \delta$ заметно меняется и при развитии местных дефектов.

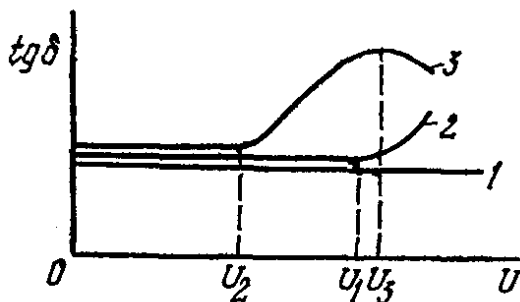


Рис. 5.4. Зависимость $\operatorname{tg} \delta = f(U)$ кабеля при хорошей пропитке (1), наличии газовых включений (2) и большого числа крупных газовых включений (3).

Наличие газовых включений в изоляции можно обнаружить по виду зависимости $\operatorname{tg} \delta$ от величины приложенного напряжения. При некотором напряжении в воздушных включениях возникает ионизация, что сопровождается ростом потерь и $\operatorname{tg} \delta$, и кривая $\operatorname{tg} \delta = f(U)$ имеет характерный излом при напряжении начала ионизации (рис. 5.4).

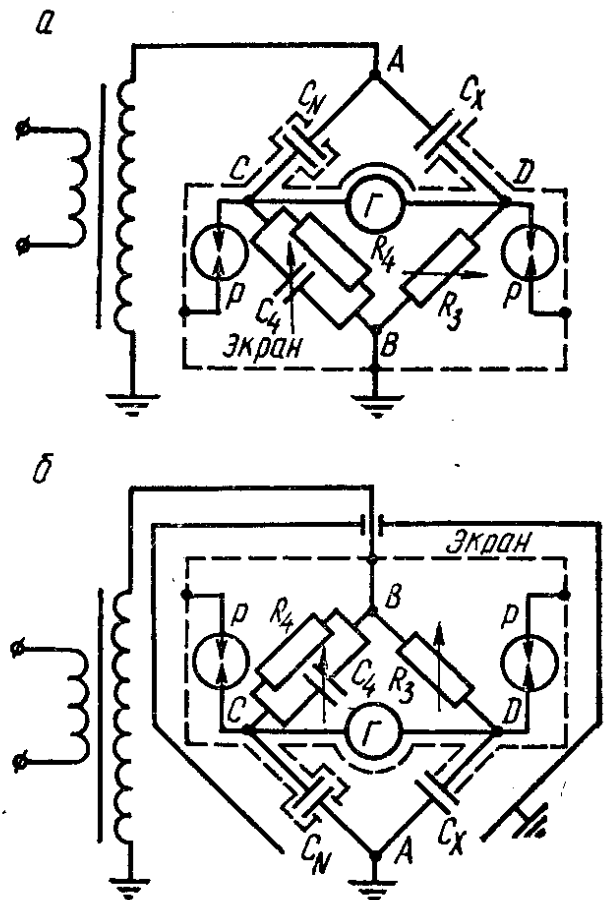
Из формулы (5.2) следует, что $\operatorname{tg} \delta$ зависит от ω . Эту зависимость, а также зависимости от температуры тоже можно использовать для оценки состояния изоляции.

Измерение диэлектрических потерь при профилактических испытаниях осуществляется с помощью высоковольтных мостов или ваттметровых схем измерения. В условиях эксплуатации наиболее широко распространены малогабаритные высоковольтные мосты МД-16, Р-595 (рабочее напряжение 5—10 кВ). Измерения могут производиться по нормальной или перевернутой схеме (рис. 5.5).

Нормальная схема применяется при определении $\operatorname{tg} \delta$ и емкости междупазовой изоляции или при лабораторных измерениях. При нормальной схеме оба электрода испытуемого объекта должны быть изолированы от земли. Измерительная часть схемы находится под невысоким напряжением, тщательно экранирована от внешних наводок и с помощью разрядников P защищена от высокого напряжения, которое может появиться на элементах моста при пробое C_x .

Рис. 5.5. Принципиальные схемы моста при нормальной (а) и перевернутой (б) схемах измерения:

C_x — испытуемый объект; C_N — эталонный конденсатор; C_4 , R_3 , R_4 — элементы измерительной части моста; Γ — гальванометр.



При эксплуатационных испытаниях чаще приходится пользоваться перевернутой схемой моста. Это вызывается тем, что один электрод испытуемого объекта, как правило, наглухо заземлен (фланец ввода, бак трансформатора, корпус машины). В перевернутой схеме заземление переносится из точки B в точку A . Вся измерительная часть моста оказывается под высоким напряжением. Регулирование C_4 , R_3 и настройка гальванометра осуществляются с помощью изолирующих ручек. Чтобы исключить влияние паразитных емкостей на землю, измерительная часть моста защищается экраном, присоединенным к точке B . Однако в данном случае экран находится под высоким напряжением, поэтому он размещается внутри наружного экрана и изолируется от него на полное рабочее напряжение (10 кВ). Наружный экран (корпус моста) заземляется.

Условия равновесия моста подробно рассматривались в курсах электротехнических измерений и электрических материалов. Напомним, что в положении равновесия моста $\operatorname{tg} \delta_x = \omega C_4 R_4$;

$C_x = \frac{R_4}{R_3} C_N$. Обычно R_4 принимают равным $10\,000/\pi$, а C_4 числен-

но выражают в микрофарадах. Тогда при частоте 50 Гц ($\omega = 314$) $\operatorname{tg} \delta_x = C_4$.

Ваттметровые схемы измерения $\operatorname{tg} \delta$ имеют ограниченное применение, так как обладают низкой чувствительностью и точностью и могут использоваться при измерении $\operatorname{tg} \delta$ объектов только с очень большой емкостью.

5.2.4. Емкостные методы оценки состояния изоляции

Емкость изоляции при неизменных температуре и частоте может заметно изменяться только при резком изменении состояния изоляции, например при появлении в ней значительного числа проводящих дефектов, шунтирующих часть изоляции.

Из соотношения (5.1) видно, что измеряемая емкость исследуемого объекта зависит от частоты приложенного напряжения и величины сопротивления r :

$$C_{\omega} = C_{\infty} + \frac{C_{\text{д}}}{1 + \omega^2 C_{\text{д}}^2 r^2} = C_{\infty} + C_{\text{д}}'$$

Эта зависимость для увлажненной и сухой изоляции представлена на рис. 5.6. Чем больше в изоляции посторонних включений и чем больше она увлажнена, тем больше величина $C_{\text{д}}$ и меньше сопротивление r . При изменении частоты приложенного напряжения от 0 до ∞ емкость увлажненной изоляции меняется от $C_0 = C_{\infty} + C_{\text{д}}$ до C_{∞} . Если же изоляция сухая, то даже при весьма низких частотах величина измеряемой емкости не намного отличается от C_{∞} , так как при этом r велико и емкость $C_{\text{д}}$ (меньшая по величине, чем $C_{\text{д}}$ для увлажненной изоляции) не успевает заряжаться. Таким образом, по отношению емкостей, измеренных при разных частотах, можно судить о степени увлажнения изоляции.

Практически измерения производятся при частотах 50 и 2 Гц. О степени увлажнения изоляции судят по отношению C_2/C_{50} . Чем

это отношение ближе к единице, тем доброкачественнее (суше) изоляция. Если отношение C_2/C_{50} превышает 1,2—1,3, то в соответствии с опытом эксплуатации изоляцию надо сушить. Значения предельных величин C_2/C_{50} установлены из опыта и могут несколько колебаться в

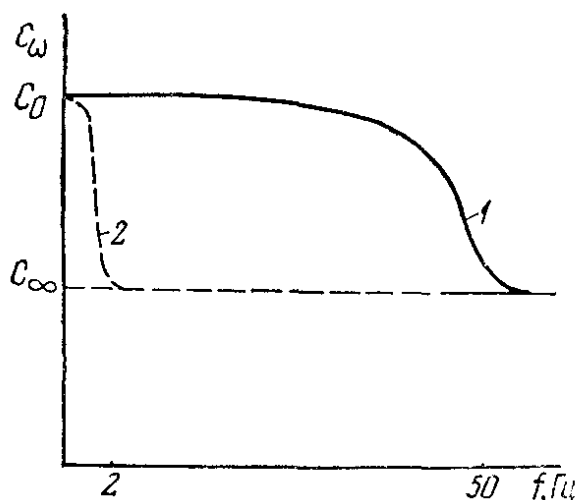


Рис. 5.6. Зависимость емкости увлажненной (кривая 1) и сухой (кривая 2) изоляции от частоты приложенного напряжения.

зависимости от типа, мощности и напряжения испытываемого объекта. Измерения производят при температуре 10—20 °С, так как при повышении температуры отношение C_2/C_{50} быстро возрастает.

Принципиальная схема прибора для контроля влажности (ПКВ) приведена на рис. 5.7. С помощью переключателя Π происходит по-

переменно зарядка емкости испытуемого объекта от источника постоянного напряжения (350—450 В) и разрядка ее на гальванометр Γ и сопротивление R . Переключение производится с частотой 2 и 50 Гц. Так как ток, протекающий через гальванометр, пропорционален емкости и частоте, то по отношению i_2/i_{50} можно определить и отношение C_2/C_{50} . В приведенной схеме используется компенсационный метод измерения токов. Ток, протекающий через гальванометр, при разрядке емкости объекта компенсируется встречным то-

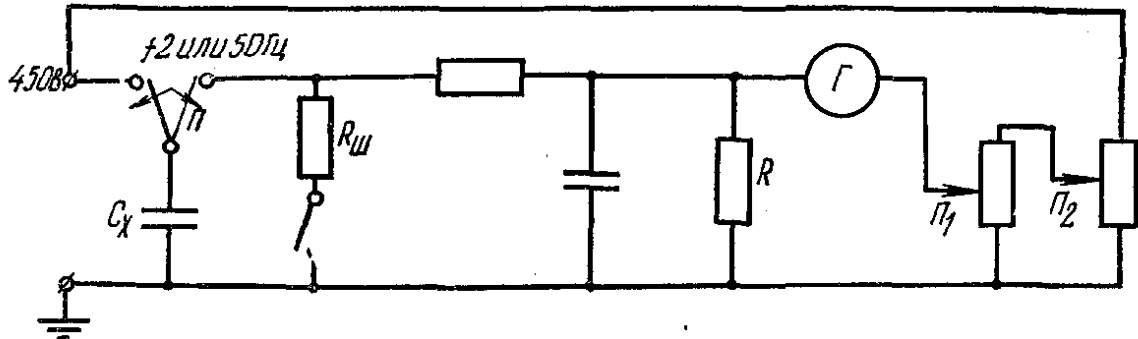


Рис. 5.7. Принципиальная схема прибора для контроля увлажнения изоляции.

ком, подтекаемым от источника постоянного напряжения через потенциометры Π_1 и Π_2 . Сопротивление $R_{ш}$ включается при частоте 50 Гц и уменьшает напряжение на R в 25 раз. Отношение C_2/C_{50} определяется по положению потенциометров Π_1 и Π_2 .

Имеются также приборы, которые позволяют определить отношение абсорбционной емкости $\Delta C = C_d$ к геометрической $C_r = C_\infty$.

По отношению $\frac{\Delta C}{C_r} = \frac{C_d}{C_\infty} = \frac{C_0 - C_\infty}{C_\infty}$ судят о состоянии изоляции.

При увлажнении это отношение возрастает. В таких приборах предварительно заряженный объект на мгновение (5—10 мкс) подключается к измерительной схеме. При этом определяется C_r . Затем вновь заряженный объект заземляется на несколько миллисекунд и после разряда геометрической емкости снова подключается к измерительной схеме, что дает возможность определить ΔC . Метод этот прост и чувствителен к увлажнению. Однако, как показал опыт, на величину отношения $\Delta C/C_r$ оказывают влияние конструкция и материалы изоляции, поэтому используется он в отдельных случаях, например для контроля сушки не залитых маслом трансформаторов.

Степень увлажнения изоляции можно также оценить измерением емкостей при разных температурах. С повышением температуры сопротивление r в схеме замещения увлажненного диэлектрика (см. рис. 5.1) уменьшается, а C_d увеличивается. В сухой изоляции эти величины остаются почти постоянными, т. е. увеличение температуры влияет на величину измеряемой емкости примерно так же, как уменьшение частоты. Для недопустимо влажной изоляции $C_{70}/C_{20} > 1,3$ (C_{70} и C_{20} — соответственно емкости, измеренные при температуре 70 и 20 °С). Измерение ведется при постоянной частоте 50 Гц. Здесь, так же как и в методе «емкость — частота»

та», значения предельных величин C_{70}/C_{20} определены на основании опыта. Метод этот можно применять не всегда, так как нагрев и охлаждение крупных объектов испытания связаны с определенными трудностями.

Рассмотренные емкостные методы контроля изоляции дают хорошие результаты при достаточно однородной изоляции (главным образом трансформаторов) и не всегда эффективны, хотя и применяются иногда как дополнительные оценочные факторы, для изоляции неоднородной, например изоляции высоковольтных электрических машин.

5.2.5. Выявление и измерение частичных разрядов в изоляции

Обнаружение частичных разрядов и определение степени их интенсивности часто служат показателями дефектности изоляции. Как уже указывалось, ЧР в изоляции могут быть выявлены при снятии зависимости $\text{tg } \delta$ от величины приложенного напряжения (см. рис. 5.4). Однако широко распространены и другие, более чувствительные методы контроля ЧР.

Используя приведенную на рис. 3.13 схему замещения образца диэлектрика с воздушной полостью и соотношение (3.4), можно за-

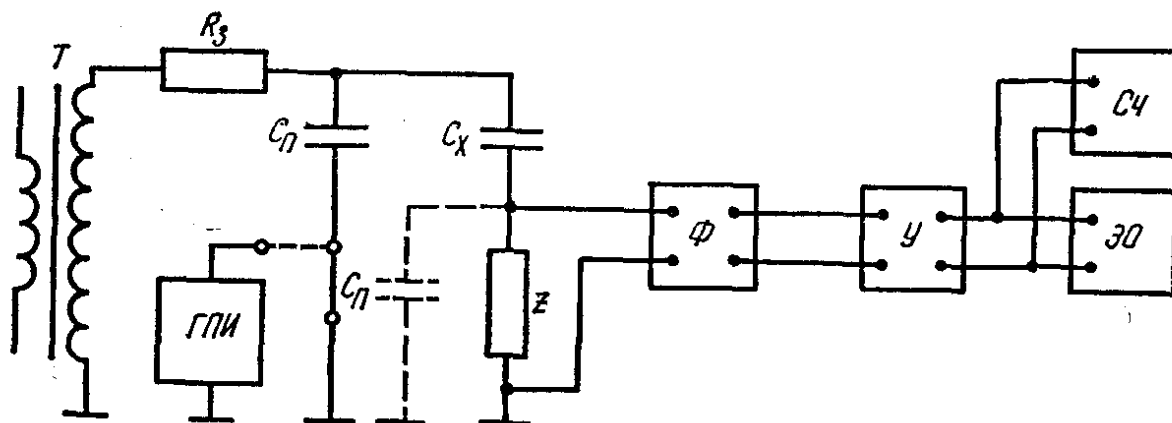


Рис. 5.8. Принципиальная схема для исследования ЧР.

писать, что в момент разряда в полости напряжение на образце скачком изменится на величину

$$\Delta U_x = \Delta U_{\text{пр}} \frac{C_b C_d}{C_x (C_b + C_d)}$$

Разряды периодически повторяются, и скачкообразные колебания на образце (объекте) могут быть зарегистрированы с помощью чувствительных приборов.

В лабораторной практике для исследования ЧР чаще всего используется схема, приведенная на рис. 5.8. Параметры схемы обычно выбираются такими, что скачок напряжения на C_x приводит к возникновению затухающего апериодического процесса в контуре $C_0, C_x, z \parallel C_n$.

Измерительная часть схемы включает активно-емкостный фильтр (Φ), предупреждающий проникновение к усилителю напря-

жения промышленной частоты, широкополосный усилитель ($У$), осциллограф ($ЭО$) и счетчик импульсов ($Сч$). Схема дает возможность зарегистрировать амплитуду отдельных импульсов ЧР $\Delta U_x (q_x = \Delta U_x C_x)$ и определить средний ток ЧР $I_{ср}$, численно равный произведению среднего числа импульсов в секунду и усредненного кажущегося заряда единичного ЧР ($I_{ср} = n_{ср} q_{ср}$). Для определения чувствительности схемы используют генераторы прямоугольных импульсов ($ГПИ$). Градуировка может быть выполнена при подключении ГПИ параллельно или последовательно C_x . Можно показать, что заведомо известный скачок напряжения на выходе ГПИ

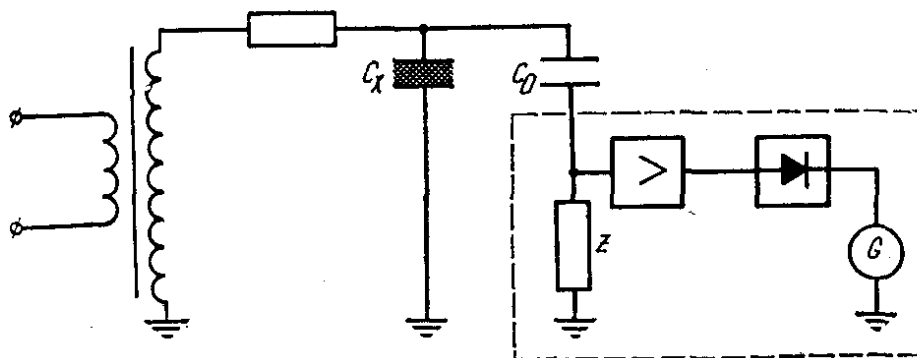


Рис. 5.9. Принципиальная схема ИЧР.

ΔU_r эквивалентен изменению напряжения на $C_x (\Delta U_x = k \Delta U_r)$ и отклонение луча на экране осциллографа пропорционально ΔU_r . Рассмотренная схема позволяет надежно регистрировать ЧР с $q_x \geq \geq 10^{-13} - 10^{-14}$ Кл, при этом коэффициент усиления усилителя достигает 10^6 . При больших усилениях высокочастотные помехи затрудняют выделение полезного сигнала, несмотря на все возможные методы защиты (экранировка помещения и схемы, устранение посторонних источников ВЧ излучений и т. п.), и резко возрастает возможность ошибочных результатов.

Для регистрации ЧР в условиях эксплуатации используются чувствительные индикаторы частичных разрядов (ИЧР). Принципиальная схема ИЧР приведена на рис. 5.9. Здесь параметры контура C_x, C_0, z выбраны так, что скачок напряжения ΔU_x вызывает затухающий колебательный процесс с частотой f_0 , а узкополосный усилитель, настроенный на частоту $10^4 - 10^5$ Гц, способствует подавлению помех. Показания индикаторного прибора G пропорциональны ΔU_x и позволяют приблизительно оценить величину q_x .

Частичные разряды в изоляции могут быть также обнаружены путем приема электромагнитных колебаний, излучаемых при разрядах. В этом случае прибор непосредственно не связан с испытуемым объектом, настроен на очень высокие частоты (1—10 МГц) и называется дефектоскопом. Дефектоскоп представляет радиоприемник с рамочной антенной. Принятые колебания усиливаются и измеряются прибором, включенным в цепь выходного каскада.

Дефектоскопами пользуются, например, для определения опор с дефектными гирляндами, после чего неисправный изолятор отыскивается в гирлянде с помощью штанги.

Метод контроля изоляции путем определения наличия и интенсивности ЧР в сочетании с другими методами перспективен. Однако широкому его распространению в условиях эксплуатации еще препятствует ряд трудностей: при увеличении емкости испытуемого объекта приборами типа ИЧР становится все труднее обнаружить частичные разряды; наличие многочисленных высокочастотных помех, особенно при увеличении чувствительности приборов, может приводить к ошибочным оценкам; приборы наподобие дефектоскопа не могут обнаружить разрядов в экранированной изоляции (в баках трансформаторов, конденсаторов и т. д.); многочисленные дефекты, опасные для изоляции, не всегда связаны с возникновением частичных разрядов.

5.2.6. Измерение распределения напряжения

Местные, сосредоточенные дефекты в различного рода изоляторах (гирлянды подвесных или колонки штыревых опорных изоляторов, отдельные опорные и проходные изоляторы) могут быть обнаружены путем сравнения кривой распределения напряжения

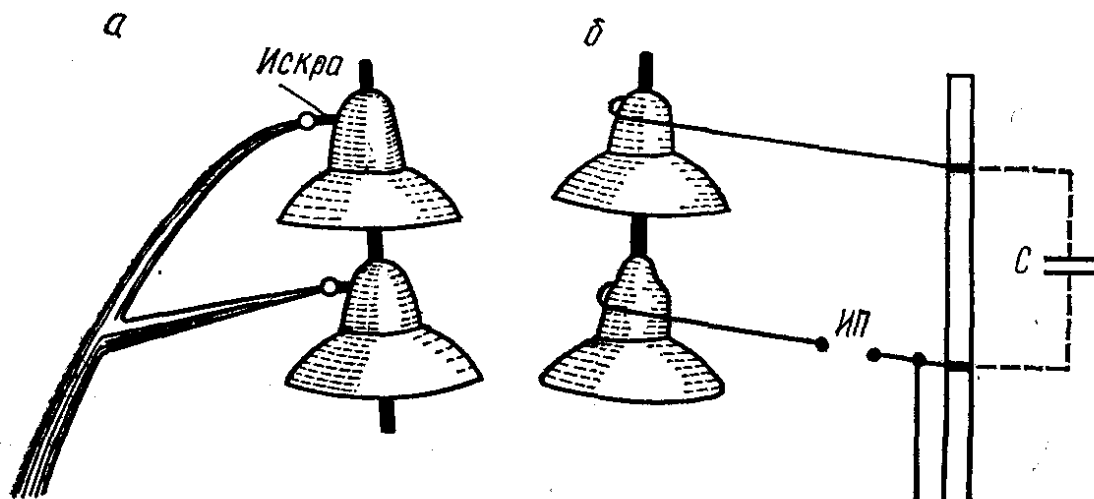


Рис. 5.10. Схемы, поясняющие устройство штанг.

испытуемой изоляции с кривой распределения напряжения здоровой изоляции, снятыми при одинаковых условиях (см. рис. 2.11). Достоинства метода заключаются в том, что снятие кривых может производиться при рабочем напряжении и по характеру кривой можно судить о местоположении дефекта. Метод этот наиболее широко распространен для контроля линейной изоляции — определения дефектных изоляторов в гирляндах.

Измерения распределения напряжения производят штангами. Простейшая контрольная штанга (рис. 5.10, а) представляет длинный полый стержень из изолирующего материала с металлическим наконечником в виде вилки на конце, с помощью которого можно закоротить один из элементов гирлянды. Концы вилки поочередно приближаются к электродам всех изоляторов гирлянды или опорной колонки. Если на изоляторе есть напряжение, то между концом вилки и электродом изолятора проскакивают искры емкостного

тока. О величине напряжения на изоляторе судят по интенсивности искры (жужжанию, которое хорошо слышно). На пробитых изоляторах напряжение близко к нулю и искра будет очень слабой. Недостаток такой штанги заключается в том, что практически очень трудно даже приблизительно определить напряжение на изоляторе. Кроме того, в установках до 35 кВ включительно возможно перекрытие изоляции, если один изолятор неисправен, а второй замыкается штангой.

Более совершенна измерительная штанга (рис. 5.10, б). Конденсатор C емкостью 30—50 пФ, рассчитанный на напряжение 30—35 кВ, представляет обычно участок изолирующей трубки. Конденсатор служит для предупреждения перекрытия изоляции при измерениях, если штанга наложена на исправный изолятор, а в гирлянде имеется один или несколько поврежденных. Расстояние между электродами искрового промежутка (ИП) можно изменять с земли с помощью связей из изоляционного материала (шнур, вращающаяся ручка штанги). Регулирующий механизм ИП связан с указателем, отградуированным непосредственно в киловольтах. Вместо искрового промежутка может быть использован электростатический киловольтметр. Измерения выполняются с приемлемой точностью (погрешность порядка $\pm 20\%$).

5.2.7. Методы просвечивания и ультразвуковой дефектоскопии

Для определения наличия трещин или воздушных включений в ответственных изоляционных конструкциях можно применять просвечивание рентгеновыми или γ -лучами. Полученные фотографии внутренней структуры изоляции позволяют обнаружить наличие внутренних дефектов и определить их характер.

Метод ультразвуковой дефектоскопии основан на том, что наличие в твердом теле трещин, полостей, пористости вызывает затухание и отражение ультразвуковых волн, которые и могут быть зарегистрированы. Воздушные включения представляют для ультразвука конец акустической линии и почти полностью отражают колебания. По отраженным волнам определяют место и вид дефектов. Применение ультразвукового метода предусматривает возможность соприкосновения между исследуемым объектом и механическим вибратором.

5.2.8. Методы оценки состояния маслопропитанной изоляции путем анализа количества и состава растворенных в масле газов

Если в маслопропитанной изоляции (трансформаторы, вводы) развивается дефект, связанный с воздействием ЧР, искровых разрядов, локальных перегревов, то масло и бумага разлагаются с выделением характерных газов. При слабых частичных разрядах выделяются преимущественно водород и метан, при дуговых воздействиях и интенсивных (критических) ЧР, помимо водорода и метана, выделяется ацетилен, при нагревах характерным газом является этилен. Если затронута бумага, появляются в заметных количествах CO_2 и CO . Количество и состав газов, растворенных в масле, можно определить с помощью хроматографического анализа или масс-спектрометрическими методами. Поэтому в последние го-

ды широкое распространение получили способы диагностики с использованием хроматографов при чувствительности анализа до 10^{-3} % газа по объему. Этой чувствительности достаточно, чтобы выявить наиболее характерные дефекты в трансформаторной изоляции. Критерии оценки и нормы диагностики находятся еще в стадии разработки.

5.3. ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ПОВЫШЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Испытания изоляции повышенным напряжением, как заводские, так и профилактические, являются основными испытаниями, гарантирующими необходимый запас электрической прочности по отношению к перенапряжениям. Методы испытаний и требования к электрической прочности внешней и внутренней изоляции основных видов электрооборудования нормированы ГОСТ 1516.1—76 и 1516.2—76 и частично отражены в табл. 5.1 и 5.2.

Табл. 5.1. Испытательные напряжения промышленной частоты (50 Гц) электрооборудования с нормальной изоляцией (действующее значение), кВ (по ГОСТ 1516.1—76)

Класс напряжения	Испытательное одноминутное напряжение внутренней изоляции				Испытательное напряжение при плавном подъеме для внешней изоляции			
	силовые трансформаторы, шунтирующие и дугогасящие реакторы	трансформаторы напряжения	аппараты и трансформаторы тока (кроме масляных), изоляторы, испытываемые отдельно	вводы для трансформаторов, реакторов и аппаратов, испытываемые отдельно	в сухом состоянии			под дождем
					силовые трансформаторы, шунтирующие и дугогасящие реакторы	трансформаторы напряжения и тока	изоляторы, испытываемые отдельно	
3	18	24	24	24	26	26	27	20
6	25	32	32	32	34	34	36	26
10	35	42	42	42	45	45	47	34
15	45	55	55	55	60	60	63	45
20	55	65	65	65	70	70	75	55
35	85	95	95	95	105	105	110	85
110	200/200**	200	230	265	280	280	295	215
150	230/275**	275	300	340	320/415**	355	375	290
230	325/400**	400	440	490	465/600**	520	550	425
330	460/575**	460	560	630	670/875**	670	700	550
500	630/830**	630	760	800	900/1250**	900	900	740
750*	800/900***		950	950	1000	1050	1050	900

* По ГОСТ 20 690—75.

** Между фазами.

*** Шунтирующие реакторы.

Табл. 5.2. Испытательные напряжения грозовых импульсов электрооборудования с нормальной изоляцией (максимальное значение), кВ

Класс напря- жения элект- рообору- дования, кВ	Испытательное напряжение внутренней изоляции				Испытательное напряжение внешней изоляции			
	силовые транс- форматоры	шунтирующие реакторы	электромагнитные трансформаторы на- пряжения, токоогра- ничивающие и дугога- сящие реакторы	трансформато- ры тока и ап- параты	силовые транс- форматоры	шунтирующие реакторы	трансформаторы на- пряжения, трансфор- маторы тока, токо- ограничивающие и дугогасящие реак- торы, аппараты	изоляторы, испы- туемые отдель- но
3	44/50	44/50	44/50	42/50	42/50	42/50	42/50	44/52
6	60/70	60/70	60/70	57/70	57/70	57/70	57/70	60/73
10	80/90	80/90	80/90	75/90	75/90	75/90	75/90	80/100
15	108/120	108/120	108/120	100/120	100/120	100/120	100/120	105/125
20	130/150	130/150	130/150	120/150	120/150	120/150	120/150	125/158
35	200/225	200/225	200/230	185/230	185/230	185/230	185/230	195/240
110	480/550	480/550	480/550	425/550	460/570	460/570	460/570	480/600
150	550/600	550/600	660/760	585/760	500/625	500/625	630/785	660/825
220	750/835	750/835	950/1090	835/1090	690/860	690/860	900/1130	950/1190
330	1050/1150	1200/1300	1200/1300	1100/1300	1000/1250	1150/1350	1150/1350	1200/1400
500	1550/1650	1675/1800	1675/1800	1500/1800	1450/1800	1600/1950	1600/1950	1600/1950
750*	2100/2250	2250/2400		2100/2550	1950	2100	2100/2550	2100/2550

* По ГОСТ 20690 — 75.

Примечание. В числителе указаны испытательные напряжения полного импульса, в знаменателе — срезанного импульса.

Внешняя изоляция испытывается трехкратным приложением напряжения промышленной частоты при плавном подъеме без последующей выдержки времени. В зависимости от условий работы отдельные изоляторы и внешняя изоляция РУ испытываются в сухом состоянии или под дождем. Предусматриваются испытания внешней изоляции полными и срезанными грозowymi импульсами и коммутационными (для напряжения 330 кВ и выше) импульсами.

Испытания электрической прочности внешней изоляции в условиях загрязнения проводятся при воздействии на изолятор загрязнений (соленого тумана) или перед испытанием изолятор заранее загрязняется.

Указанные в табл. 5.1 и 5.2 величины испытательных напряжений внешней изоляции приведены к нормальным условиям. При условиях испытаний, отличных от нормальных, необходимо произвести соответствующий пересчет по соотношению (2.1) или (2.2).

Внутренняя изоляция в зависимости от вида и условий работы испытывается переменным, импульсным или постоянным напряжением.

Испытания переменным напряжением (50 Гц) проводятся методом одномоментного напряжения — однократным приложением к изоляции нормированного испытательного напряжения в течение 1 мин, если основная изоляция керамическая, жидкая или бумажно-масляная, и 5 мин, если изоляция состоит из твердых органических материалов или кабельных масс. Большие выдержки под напряжением не соответствуют реальным условиям при перенапряжениях и могут привести к опасному для изоляции развитию ЧР.

Изоляция считается выдержавшей испытания, если не наблюдалось полного разряда или недопустимых повреждений: не было слышно разрядов в баке, не выделялся дым, приборы не указывали на возникновение опасных ЧР.

Импульсные испытания внутренней изоляции проводятся по трехударному методу, т. е. трижды к испытываемому объекту прикладывается полный грозовой импульс и затем еще три раза — срезанный.

ГОСТом предусмотрены также заводские испытания внутренней изоляции 330, 500 и 750 кВ коммутационными импульсами. Для силовых трансформаторов 220 кВ и выше нормированы испытания длительным напряжением промышленной частоты. При этом должно проводиться измерение интенсивности ЧР. При типовых испытаниях в случаях, когда возможен тепловой пробой, например при основной волокнистой органической изоляции, ГОСТ предусматривает испытания на стойкость изоляции в отношении теплового пробоа.

Оборудование, предназначенное для работы в установках, которые вообще не подвергаются воздействию грозowych перенапряжений (например, подстанции, связанные только с кабельными сетями), может быть выполнено с облегченной изоляцией. Такое оборудование испытывается только напряжением промышленной частоты (табл. 5.3).

Табл. 5.3. Испытательные напряжения промышленной частоты электрооборудования с облегченной изоляцией (действующее значение), кВ (ГОСТ 1516.2—76)

Класс напряжения электрооборудования	Испытательное одноминутное напряжение внутренней изоляции		Испытательное напряжение при плавном подъеме внешней изоляции		
	силовые трансформаторы, шунтирующие и дугогасящие реакторы	трансформаторы напряжения и тока, токоограничивающие реакторы, аппараты и изоляторы	в сухом состоянии		под дождем
			электрооборудование	между контактами одного и того же полюса разъединителей	трансформаторы напряжения и тока, аппараты и изоляторы, категория размещения I
3	10	13	15	18	10
6	16	21	23	27	18
10	24	32	35	42	28
15	37	48	53	62	42
20	50	65	70	85	55

Объем и нормы испытаний внутренней газовой самовосстанавливающейся изоляции близки к объему и нормам внешней изоляции, хотя и имеют некоторые особенности, оговоренные в ГОСТе.

Определение требований к электрической прочности изоляции и обоснование объемов и норм испытаний повышенным напряжением тесно связаны с вопросами ограничения грозовых и коммутационных перенапряжений, координации изоляции и подробнее будут рассмотрены в гл. 22.

При профилактических испытаниях величина испытательных напряжений принимается на 10—25 % ниже заводских норм, указанных в ГОСТе. Этим снижением учитывается постоянное старение изоляции и ослабляется опасность накопления дефектов, возникающих при испытаниях.

Часто при профилактических испытаниях используется постоянное напряжение. Потери и тепловыделение в изоляции при постоянном напряжении незначительны, развитие частичных разрядов затруднено, и поэтому напряжение пробоя при постоянном напряжении $U_{пр-}$ выше, чем при переменном $U_{пр~}$. Коэффициент упрочнения $k_y = \frac{U_{пр-}}{U_{пр~}}$ здоровой изоляции выше, чем дефектной, и достигает 3—4. Поэтому испытательные постоянные напряжения принимаются более высокими по сравнению с переменными и хорошо выявляют большинство возникающих в изоляции дефектов. При этом испытание выпрямленным повышенным напряжением, как правило, сопровождается измерением токов утечки, что также помогает определить состояние изоляции.

5.4. ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ ОТДЕЛЬНЫХ ВИДОВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

5.4.1. Испытания изоляторов

Типовые испытания изоляторов проводятся по программе испытаний внешней и внутренней изоляции, предусмотренной ГОСТом. Определяются все электрические характеристики, в том числе про-

бивное напряжение, вольт-секундная характеристика, угол потерь и сопротивление утечки. Проверяются также механические и тепловые характеристики, качество и состояние изолирующего материала (фарфора, стекла), глазури, соответствие техническим условиям формы и размеров изоляторов.

Приемо-сдаточные испытания изоляторов на заводе проводятся как выборочные почти по полной программе типовых испытаний. Отбирается часть изоляторов партии. Если определенное число изоляторов не выдержит испытания, партия бракуется или производится повторная выборка; при неудовлетворительных результатах испытаний повторной выборки поставка изоляторов потребителю должна быть прекращена.

Профилактические испытания линейной изоляции заключаются в периодической проверке распределения напряжения по элементам гирлянд с помощью штанг, что позволяет выявить наличие дефектных изоляторов. Работа эта очень трудоемкая, поэтому такие испытания проводятся сравнительно редко — один раз в 3—6 лет. Определение наличия на опоре гирлянд с дефектными изоляторами с помощью дефектоскопа или других индикаторов ЧР требует меньших трудозатрат. Однако с помощью дефектоскопа не всегда удастся обнаружить полностью поврежденные изоляторы; широкому применению приборов регистрации ЧР препятствуют также искажения, которые вносит в их показания корона на проводах, в защитной арматуре и на самой гирлянде.

Перед монтажом для отбраковки поврежденных изоляторов производится измерение их сопротивления мегомметром и испытание повышенным напряжением. При испытании повышенным напряжением можно применять индикатор частичных разрядов.

Состояние опорных изоляторов контролируется точно так же, как и линейных. Профилактические испытания изоляторов типа ОНШ производятся чаще других (один раз в 1—3 года), так как эти изоляторы чаще повреждаются.

Для изоляции бумажно-масляных конденсаторных и маслобарьерных вводов нормируется также $\operatorname{tg} \delta$, измерение которого при испытаниях позволяет определить степень увлажнения изоляции. Для этой же цели вполне применимы и емкостные критерии оценки увлажнения. Наличие воздушных включений в изоляции вводов можно выявить по интенсивности ЧР, ценную информацию может дать также анализ растворенных в масле газов.

5.4.2. Испытания изоляции кабелей и конденсаторов

На заводах кабели с вязкой пропиткой и маслonaполненные испытываются повышенным напряжением промышленной частоты. Газонаполненные кабели и кабели с обедненной пропиткой испытываются постоянным напряжением $7 U_{\text{н}} + 3$ кВ, так как при переменном повышенном напряжении вспышки ЧР могут повредить изоляцию этих кабелей при испытании. Величины испытательных

напряжений и длительность испытаний зависят от типа кабеля, нормированы ГОСТами и заводскими инструкциями и частично приведены в табл. 5.4. Указанные в этой таблице величины относятся к испытаниям кабелей полной строительной длины на барабанах. Взамен может быть проведено испытание отрезка кабеля (длиной не менее 5 м). Испытательные напряжения и время испытания в этом случае увеличиваются.

Табл. 5.4. Испытательные напряжения кабелей
(по ГОСТ 18 410—73 и 16 441—78)

Номинальное напряжение, кВ	Испытательное напряжение 50 Гц, кВ	Длительность испытания, мин
6	16	10
10	25	10
35	88	20
110*	$220/\sqrt{3}$	15
220*	$370/\sqrt{3}$	15

* Маслонаполненные кабели низкого давления.

Так как в процессе транспортировки и монтажа кабель подвергается изгибам, кабели всех напряжений при типовых испытаниях проходят проверку на способность к изгибанию. Отрезок кабеля длиной не менее 5 м подвергают трехкратному изгибу в двух противоположных направлениях. Одножильные кабели изгибают на барабане с диаметром, равным 25-кратному, а многожильные — 15-кратному диаметру кабеля. После чего кабель испытывают повышенным напряжением. При этом для кабелей 110 кВ и выше предусмотрены и импульсные испытания.

Величина $\operatorname{tg}\delta$ изоляции и зависимость $\operatorname{tg}\delta=f(U_{\text{исп}})$, как уже упоминалось, являются важными характеристиками, которые в значительной мере определяют состояние изоляции кабеля и позволяют следить за его изменением. Эти величины также нормируются заводскими инструкциями и ГОСТами.

Для выявления всех производственных технологических отступлений отрезки кабеля разбираются. Обращается внимание на правильность намотки, выявление совпадений лент, проверяется толщина изоляции и защитной оболочки.

Перед вводом в работу после монтажа кабели 6—35 кВ испытываются постоянным напряжением величиной $(5-6) U_{\text{н}}$ в течение 10 мин.

Повреждения кабелей в процессе работы происходят, как правило, вследствие развития местных дефектов. Поэтому основным способом профилактического контроля состояния изоляции силовых кабелей с вязкой пропиткой 3—35 кВ является испытание их выпрямленным напряжением. Величина выпрямленного напряжения принята в сущности на основе эксплуатационного опыта и лежит в пределах $(5-6) U_{\text{н}}$, время испытания 5—10 мин.

Испытываются кабели с помощью передвижных высоковольтных установок (АКИ-50, АИИ-70). Принципиальная схема подключения такой установки к кабелю приведена на рис. 5.11.

При испытании кабеля выпрямленным повышенным напряжением измеряются токи утечки и снимаются вольт-амперные характеристики $I_y = f(U_{\text{исп}})$. Величина тока в процессе испытания обычно не меняется. При наличии дефекта вольт-амперная характеристика имеет резкий излом или ток в процессе испытания начинает

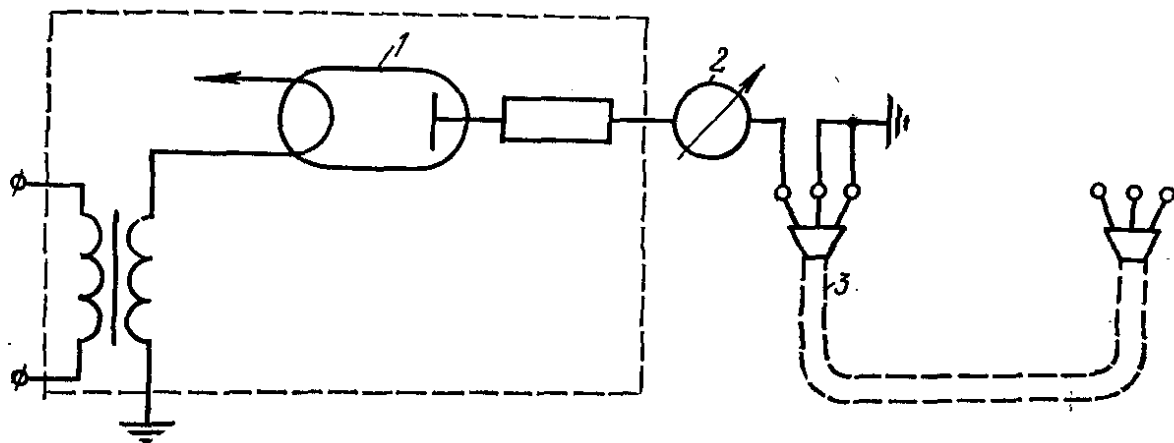


Рис. 5.11. Принципиальная схема испытания кабеля высоким выпрямленным напряжением:

1 — выпрямительная установка; 2 — прибор для измерения величины тока утечки; 3 — испытуемый кабель.

непрерывно нарастать. В этом случае время испытания следует увеличить до стабилизации тока или до пробоя изоляции.

По отношению токов утечки в разных жилах определяется максимальный коэффициент асимметрии. Для здоровой изоляции этот коэффициент близок к единице. Увеличение коэффициента асимметрии до 2 при сильно возросших токах утечки указывает на наличие дефектов в изоляции. Представление о состоянии (увлажнении, загрязнении) изоляции может также дать сопоставление величин токов утечки, полученных при данных испытаниях, с результатами предыдущих испытаний или с нормами. После пробоя кабеля в месте повреждения «прожигают» хорошо проводящий канал с помощью мощной выпрямительной установки (напряжение 3—6 кВ, ток до 5А). Отыскание поврежденного участка обеспечивается применением специальных искателей (ИКЛ), работа которых основана на регистрации времени пробега электромагнитного импульса от места установки прибора до места повреждения и обратно. Распространены и другие методы: индукционные, акустические.

Методика и объем испытаний конденсаторов изменяются в зависимости от их назначения и конструкции. Испытания конденсаторов переменного напряжения проводятся повышенным напряжением промышленной частоты. При отсутствии достаточно мощных испытательных трансформаторов испытания могут быть проведены при постоянном напряжении. Величины испытательных напряжений регламентированы ГОСТами. Например, для косинусных

конденсаторов испытательное напряжение принято равным $2,2 U_n$ при 50 Гц и $4,3 U_n$ при постоянном напряжении.

Важными характеристиками, определяемыми и нормируемыми при заводских испытаниях, являются также напряжение появления ЧР, $\text{tg} \delta$, ток утечки при постоянном напряжении.

Перед установкой конденсатора проверяется герметичность корпуса и после минутной выдержки под напряжением измеряются сопротивление изоляции и емкость.

5.4.3. Испытания изоляции трансформаторов

Изоляция трансформаторов в процессе эксплуатации подвергается длительному воздействию рабочего напряжения и кратковременному воздействию внутренних и грозовых перенапряжений. Методика испытаний и уровень испытательных напряжений для внешней и внутренней изоляции трансформаторов отражены в ГОСТ 1516.1—76 и 1516.2—76.

Одноминутные испытания напряжением промышленной частоты могут проводиться как с применением постороннего испытательного трансформатора, так и путем возбуждения испытуемого трансформатора. При испытании от постороннего источника напряжения проверяется только главная изоляция, при этом напряжение на всей обмотке относительно других обмоток и заземленных частей одинаково. Поэтому такой метод пригоден, если главная изоляция на протяжении всей обмотки равнопрочна.

При испытании методом возбуждения к обмотке низкого напряжения прикладывается напряжение, в два раза превышающее номинальное. Поэтому, чтобы магнитопровод трансформатора не работал в условиях насыщения, при которых резко возрастает ток намагничивания и нарушается синусоидальность кривой напряжения в высоковольтной обмотке, испытания ведутся при повышенной частоте $f = 100—400$ Гц. Время испытаний $t_{\text{исп}}$ при этом уменьшается в соответствии с формулой $t_{\text{исп}} = 60(100/f)$, но не должно быть меньше 15 с.

Проведение испытаний полными и срезанными грозowymi импульсами для трансформаторов является обязательным. При этих испытаниях одновременно производится осциллографирование токов в нейтрали для обнаружения пробоев витковой или межкатушечной изоляции. При наличии таких пробоев вид осциллограмм меняется по сравнению с осциллограммами, снятыми для неповрежденной изоляции. В процессе изготовления трансформатора степень увлажнения изоляции и ее состояние контролируются рядом дополняющих друг друга неразрушающих испытаний. В комплекс этих испытаний входит определение $\text{tg} \delta$ и сопротивления изоляции, характеристик ЧР, емкости изоляции при различных частотах и температурах.

Контроль состояния изоляции трансформаторов в условиях эксплуатации, а также во время и после окончания ремонта осуще-

ствляется с применением почти всех изложенных в § 5.2 методов неразрушающих испытаний. Наиболее часто встречающимся дефектом трансформаторной изоляции является ее увлажнение. Однако в процессе эксплуатации возможно также тепловое старение твердых компонентов изоляции, загрязнение масла, оседание шлама на изолирующих деталях, появление воздушных полостей и местных разрушений твердой изоляции в результате развития частичных разрядов, перегревов и т. д.

Наличие шлама, увлажнение и загрязнение масла легко выявляются при периодических анализах проб масла. Поэтому с помощью характеристик $\operatorname{tg} \delta$, C_2/C_{50} , $\Delta C/C_r$, R_{60} , R_{60}/R_{15} определяется в основном состояние твердой изоляции. Обычно путем измерений R_{60} , $\operatorname{tg} \delta$, C_2/C_{50} удается вполне надежно выяснить, увлажнена изоляция или нет, и принять правильное решение. В спорных ситуациях при противоречивых показаниях испытаний разными методами или при результатах, близких к допустимым критериям, целесообразно использовать все возможные способы оценки состояния изоляции.

Допустимые величины $\operatorname{tg} \delta$, C_2/C_{50} и других характеристик регламентированы для трансформаторов разных мощностей и напряжений заводскими или ведомственными инструкциями и определены на основании опытных данных. Часто к правильному решению приводит сравнение с результатами заводских или предыдущих испытаний. Например, возрастание $\operatorname{tg} \delta$ изоляции обмоток по сравнению с величинами, указанными в табл. 5.5, недопустимо.

Табл. 5.5. Значения $\operatorname{tg} \delta$ изоляции обмоток трансформаторов напряжения 35 кВ и ниже мощностью менее 2,5 МВ·А

Температура t , °С	Предельная величина $\operatorname{tg} \delta$ для вновь вводимого трансформатора	Допустимая величина $\operatorname{tg} \delta$ для трансформатора в эксплуатации
10	0,015	0,025
20	0,020	0,035
30	0,026	0,055
40	0,034	0,080
50	0,046	0,110
60	0,060	0,150
70	0,080	0,200

Измерение $\operatorname{tg} \delta$, C_2/C_{50} и других характеристик целесообразно проводить по зонам, например обмотка ВН — земля; ВН — НН; НН — земля и т. п. При этом характеристики определяются для изоляции между электродами данной зоны, а влияние токов в других зонах устраняется с помощью экранов, которыми снабжаются измерительные приборы.

Сосредоточенные дефекты в виде проводящей дорожки между электродами, которая может образоваться при загрязнении и увлажнении твердой изоляции, можно выявить измерением токов утечки на выпрямленном напряжении.

В мощных трансформаторах высших классов напряжений развитие пробоя часто начинается с возникновения и развития частичных разрядов в изоляции. Поэтому индикация и оценка интенсивности частичных разрядов в изоляции таких трансформаторов может использоваться как метод профилактического контроля состояния изоляции.

Как уже отмечалось в п. 5.2.7, в последние годы во всех энергосистемах внедрены методы хроматографического анализа растворенных в масле газов, которые позволяют выявить появление и развитие в изоляции трансформаторов местных дефектов — локальные перегревы, ЧР.

После ремонтов соответствие изоляции трансформаторов (35 кВ и ниже) требуемому уровню устанавливается с помощью испытания повышенным напряжением промышленной частоты. Величина испытательного напряжения принимается $0,85 U_{зав}$ — после мелко-го текущего ремонта и $0,9 U_{зав}$ — после капитального ремонта с заменой изоляции обмоток ($U_{зав}$ — заводское испытательное напряжение для нового трансформатора).

5.4.4. Испытания изоляции вращающихся машин

Испытания изоляции высоковольтных машин повышенным напряжением промышленной частоты на заводе в процессе изготовления производятся многократно для выявления дефектных секций и замены поврежденных элементов обмотки до полной сборки машины. Отдельные катушки, стержни испытываются до укладки в пазы и затем после укладки в пазы; после соединения и закрепления испытывается изоляция всей обмотки и, наконец, перед выпуском с завода при температуре, близкой к рабочей температуре машины, главная изоляция снова испытывается повышенным напряжением. Величины испытательных напряжений должны обеспечить необходимую электрическую прочность изоляции при возможных перенапряжениях с учетом условий и длительности эксплуатации. Испытательные напряжения зависят от номинального напряжения, мощности и типа машины. Например, для машин мощностью до 10 МВ·А приняты следующие величины испытательных напряжений: секции или катушки до укладки в пазы $2,75U_n + 4,5$ кВ, после укладки в пазы $2,5U_n + 2,5$ кВ; после пайки всех соединений $2,25U_n + 2$ кВ и, наконец, выпускные испытания: $2U_n + 1$ кВ для машин с $U_n \leq 3$ кВ; $2,5U_n$ для машин с $U_n = 6$ кВ и $2U_n + 3$ кВ для машин с $U_n \geq 6$ кВ. Снижение испытательных напряжений по мере изготовления машины определяется в основном тем, что в процессе сборки и пайки механические и термические нагрузки могут несколько ухудшить качество изоляции и снизить ее электрическую прочность. Длительность испытания главной изоляции принята равной 1 мин. На месте установки машины изоляция испытывается повышенным напряжением, величина которого принимается в пределах 75—85 % заводского испытательного напряжения.

Испытание витковой изоляции разрезных катушек легко осуществляется напряжением промышленной частоты. Величины испытательных напряжений лежат в пределах 1—2 кВ (в зависимости от вида витковой изоляции) и приняты с учетом возможных напряженностей в витковой изоляции при перенапряжениях. В неразрезных катушках витковая изоляция испытывается напряжением высокой частоты (10^4 — 10^5 Гц), так как при меньших частотах индуктивное сопротивление витков мало и повышение напряжения на витковой изоляции до сотен или тысяч вольт связано с протеканием по обмотке больших токов. Для уменьшения диэлектрических потерь при испытаниях напряжением высокой частоты используют затухающие колебания. В комплекс заводских испытаний входит также определение величины R_{60} и $\operatorname{tg} \delta$ изоляции. Измерение $\operatorname{tg} \delta$ производится для всех машин напряжением выше 6 кВ и мощностью выше 4 МВт. Измерение производится обычно до укладки обмотки в статор.

В процессе эксплуатации состояние изоляции обмоток машин может быть оценено путем измерения R_{60} , R_{60}/R_{15} или $R_{10\text{мин}}/R_{1\text{мин}}$, $\operatorname{tg} \delta$, $\Delta \operatorname{tg} \delta$. Эти характеристики позволяют определить степень увлажнения и общего старения изоляции. Сопротивление R_{60} удовлетворительной изоляции превышает 1 МОм на 1 кВ номинального напряжения при температуре 75°C , а отношение $R_{60}/R_{15} > 1,3$ при температуре 15 — 30°C . Критерий $R_{10\text{мин}}/R_{1\text{мин}}$ основан на сравнительно медленном спадании токов абсорбции в изоляции вращающихся машин. Отношение $R_{10\text{мин}}/R_{1\text{мин}}$ для сухой изоляции класса В превышает 2,5.

Измерение $\operatorname{tg} \delta = f(U)$ при изменении напряжения от $0,5U_n$ до $1,5U_n$ позволяет выявить не только увлажнение или общее старение изоляции, но и напряжение возникновения ЧР. Появление ЧР при напряжениях, близких к номинальному, указывает на расслоение изоляции и появление в ней воздушных полостей. Дальнейшая работа такой изоляции недопустима. Частичные разряды в изоляции машин могут быть также обнаружены с помощью ИЧР.

Однако основным и наиболее эффективным методом контроля изоляции машин является испытание ее повышенным напряжением промышленной частоты. Кратность испытательных напряжений при профилактических испытаниях принята в пределах $(1,5$ — $1,7)U_n$.

Испытание постоянным (выпрямленным) повышенным напряжением также позволяет выявить слабые места в изоляции. Одновременно производится измерение зависимости величины токов утечки от испытательного напряжения. Пробою изоляции обычно предшествует заметный излом в ходе указанной зависимости. С учетом упрочнения изоляции при постоянном напряжении значения выпрямленных испытательных напряжений при приемосдаточных и профилактических испытаниях принимаются $(2$ — $3)U_n$.

Витковая изоляция в условиях эксплуатации испытывается повышением напряжения на выводах возбужденной машины до $(1,15$ — $1,3)U_n$.

6. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Лаборатории высокого напряжения предназначены для проведения всесторонних испытаний различных высоковольтных устройств при их изготовлении и в процессе эксплуатации и для решения и разработки различных теоретических вопросов в области ТВН.

Оборудование высоковольтных лабораторий состоит из установок для генерирования переменного, постоянного и импульсного напряжений и токов, измерительных приборов и устройств, а также вспомогательного оборудования (дождевальные установки, подъемно-транспортные механизмы и т. д.). Выбор оборудования определяется в основном уровнем испытательных напряжений и техническими характеристиками объектов испытания, а также задачами, стоящими перед лабораториями.

6.2. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

6.2.1. Высоковольтный испытательный трансформатор

Высоковольтный испытательный трансформатор является основным элементом оборудования лаборатории ТВН, служит для питания и входит в состав испытательных установок переменного, постоянного и импульсного напряжений.

Испытательные трансформаторы, как правило, изготавливаются однофазными. Обмотки высокого напряжения выполняются преимущественно слоевыми, изоляция между слоями — из кабельной бумаги и цилиндров из изолирующего материала. Такие обмотки подвергаются меньшей, чем обмотки других типов, опасности повреждения под влиянием перенапряжений, возникающих в момент разряда.

Испытательные трансформаторы в отличие от силовых работают обычно непродолжительное время, в течение которого напряжение трансформатора повышается до разряда на объекте, после чего трансформатор отключается. Для защиты обмотки трансформатора от сверхтоков при разряде и ограничения перенапряжений последовательно с обмоткой включают внешний защитный резистор R , сопротивление которого берут порядка 1 Ом на 1 В номинального напряжения трансформатора. Запас электрической прочности изоляции испытательных трансформаторов невелик и обычно не превышает 20—30 %.

Мощность испытательных трансформаторов определяется током, потребляемым испытуемым объектом при наиболее неблагоприятных условиях испытания (например, под дождем). Опыт лабораторий показывает, что при испытаниях объектов с небольшой емкостью (примерно до 1000 пФ) высоковольтная обмотка транс-

форматоров на номинальное напряжение до 100—150 кВ должна быть рассчитана на ток 0,2—0,3 А; для трансформаторов на 500 кВ — на 0,5 А и для трансформаторов на более высокие напряжения — на ток 1 А и более. В специальных случаях, например для испытания кабелей большой длины, необходимая мощность трансформатора определяется по формуле

$$P_s = U^2 \omega C,$$

где U — испытательное напряжение, кВ; C — емкость испытуемого объекта, мкФ; P_s — мощность трансформатора, В·А.

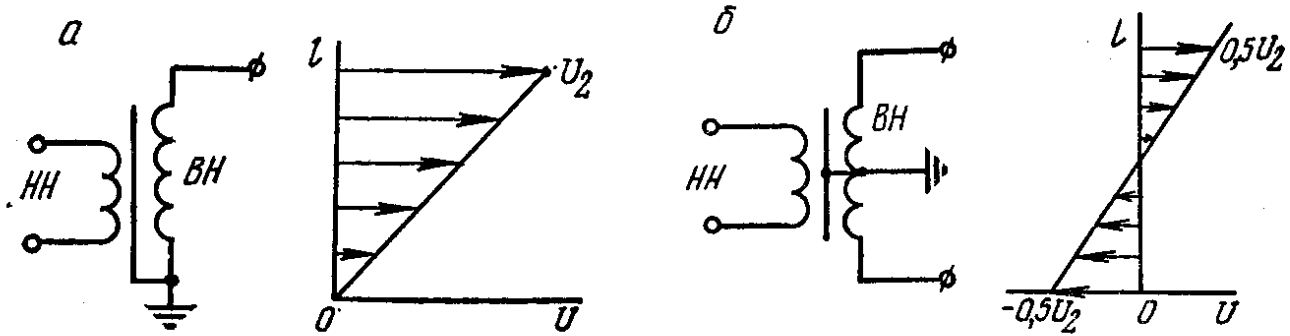


Рис. 6.1. Испытательные трансформаторы и распределение напряжений.

Испытательные трансформаторы выполняются с одним или двумя выводами. В схеме с одним выводом обмотки высокого напряжения (ВН) (рис. 6.1, а) второй конец обмотки соединяется с сердечником и баком трансформатора непосредственно или через измерительный прибор (амперметр, шунт) и заземляется. Эта схема позволяет производить испытания объектов оборудования в условиях, близких к эксплуатационным, т. е. с одним заземленным полюсом, но при этой схеме необходима изоляция одного из выводов обмотки ВН на полное напряжение, что требует больших и сложных проходных изоляторов и приводит к увеличению габаритов трансформатора. По такой схеме изготавливают обычно трансформаторы на напряжения до 500 кВ.

В схеме с двумя выводами (рис. 6.1, б) с сердечником и баком трансформатора соединяется средняя точка обмотки. Из кривой распределения напряжения видно, что в этом случае изоляция выводов ВН должна быть рассчитана на половинное напряжение, что является достоинством схемы. В этой схеме один вывод ВН также может быть заземлен. Так как при этом сердечник и бак трансформатора приобретают потенциал $0,5 U_2$ по отношению к земле и обмотке низшего напряжения (НН), то обмотка НН должна быть изолирована на указанное напряжение от корпуса, а сам трансформатор — от земли и заземленного оборудования путем установки на опорные изолирующие конструкции.

Основным преимуществом схемы с двумя выводами является облегчение изоляции обмотки и выводов ВН в два раза; изготавливаются трансформаторы по такой схеме на напряжения до 750—1000 кВ.

Наиболее надежной и распространенной, а для наружных установок единственно возможной конструкцией испытательного трансформатора является конструкция с масляной изоляцией в металлическом баке. Однако она связана с необходимостью применения дорогих и сложных проходных изоляторов ВН, что намного увеличивает размеры установки и затрудняет ремонт трансформатора. Поэтому определенный интерес представляют сухие испытательные трансформаторы, которые были созданы на напряжения до 1000 кВ.

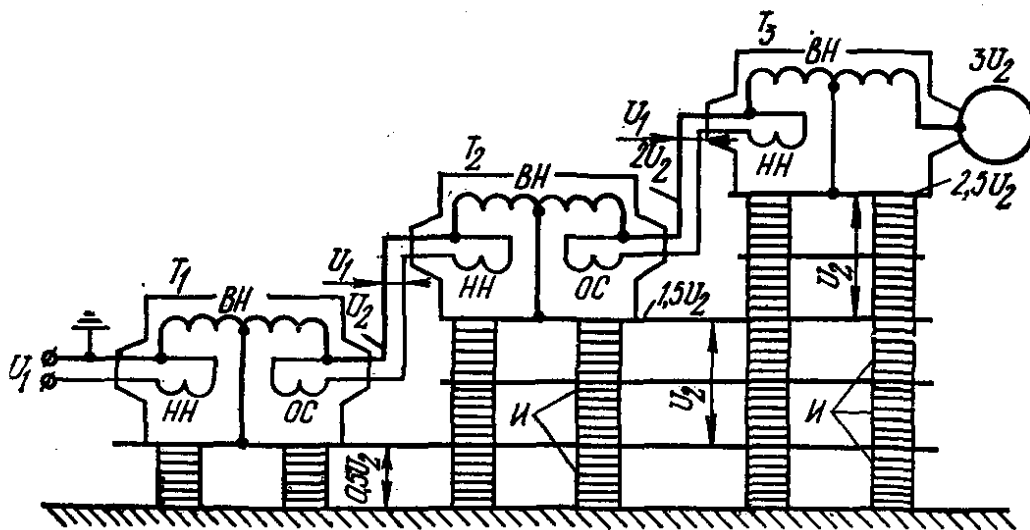


Рис. 6.2. Схема каскада из трех трансформаторов.

Для получения напряжений выше 500—750 кВ применяют **каскадные (последовательные) схемы** включения испытательных трансформаторов. Чаще всего применяют каскадное включение трех испытательных трансформаторов (элементов), что дает возможность путем несложных переключений получать также высокое напряжение трехфазного тока с $U_{л} = \sqrt{3} U_2$.

На рис. 6.2 приведена схема каскада из трех трансформаторов с двумя выводами ВН. Каждый трансформатор каскада имеет обмотку низшего (НН) и высшего (ВН) напряжений, обмотки ВН всех трансформаторов соединены последовательно.

Для питания последующих элементов служат обмотки связи (ОС) предыдущих элементов каскада. Обмотки ОС электрически соединены с выводом ВН и имеют по отношению к обмотке НН элемента коэффициент трансформации, равный единице. Начало обмотки ВН первого трансформатора соединено с землей, следовательно, относительно земли его бак имеет потенциал $0,5 U_2$, а напряжение на выходе равно U_2 ; баки второго и третьего трансформаторов имеют потенциалы $1,5 U_2$ и $2,5 U_2$, а напряжения на их выходе относительно земли соответственно равны $2 U_2$ и $3 U_2$. Так как в данной схеме баки всех трансформаторов находятся под напряжением, то от земли должны быть изолированы все три трансформатора каскада.

Основным преимуществом каскадной схемы включения трансформаторов является облегчение изоляции отдельных трансформаторов.

торов, при трех элементах изоляция каждого из них выполняется на $\frac{1}{3}$ или $\frac{1}{6}$ общего напряжения каскада. Это дает возможность получать высокие испытательные напряжения (1; 1,5 и 2,25 МВ), применяя освоенные производством и надежные в эксплуатации трансформаторы на более низкие напряжения (330, 500 и 750 кВ). Каскад трансформаторов позволяет также собирать различные необходимые для работы схемы испытательных установок — трехфазную, схему параллельной работы нескольких трансформаторов и т. п.

Недостатками каскадной схемы являются значительная площадь, занимаемая ею, высокая (20—30 %) реактивность по сравнению с реактивностью единичного трансформатора того же напряжения (6—8 %) и повышенная установленная мощность.

6.2.2. Регулирование напряжения испытательных трансформаторов

Отличительной особенностью режима работы испытательных трансформаторов является необходимость регулирования их напряжения от нуля до заданной величины. Это производится с помощью регуляторов напряжения, включаемых в цепь первичной обмотки трансформатора. Регуляторы напряжения должны удовлетворять следующим основным требованиям:

1) регулирование напряжения должно быть плавным, в регуляторах со скользящими контактами искрение должно отсутствовать;

2) регулятор должен подавать на вход испытательного трансформатора напряжение от нуля до $U_{\text{ном}}$ неискаженной синусоидальной формы;

3) мощность регулятора напряжения должна быть не меньше мощности испытательного трансформатора.

Наиболее совершенным устройством для регулирования напряжения является **двигатель-генератор**, состоящий из синхронного трехфазного генератора, смонтированного на одном валу с двигателем постоянного или переменного тока. Регулирование напряжения осуществляется изменением возбуждения генератора.

Более простым и дешевым устройством для регулирования напряжения являются **индукционные регуляторы**, которые выполняются или в виде трансформаторов и автотрансформаторов с перемещающейся обмоткой, или в виде заторможенного асинхронного двигателя с фазным ротором (потенциал-регуляторы). Индукционные регуляторы характеризуются плавностью регулирования напряжения и не имеют скользящих контактов. Применение различных способов для устранения высших гармоник, например устройства «косых» пазов на статоре и роторе заторможенной машины, обеспечивает получение регулируемого напряжения, форма которого близка к синусоидальной. В настоящее время индукционные регуляторы напряжения выпускаются различной мощности и применяются для питания испытательных установок любого напряжения.

Для регулирования напряжения маломощных испытательных установок широко применяют лабораторные регулировочные автотрансформаторы (типа ЛАТР).

6.3. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для получения высоких напряжений постоянного тока применяют различные выпрямительные установки и электростатические генераторы.

Типовые схемы выпрямления, применяемые чаще всего для получения напряжений до 200 кВ, приведены на рис. 6.3.

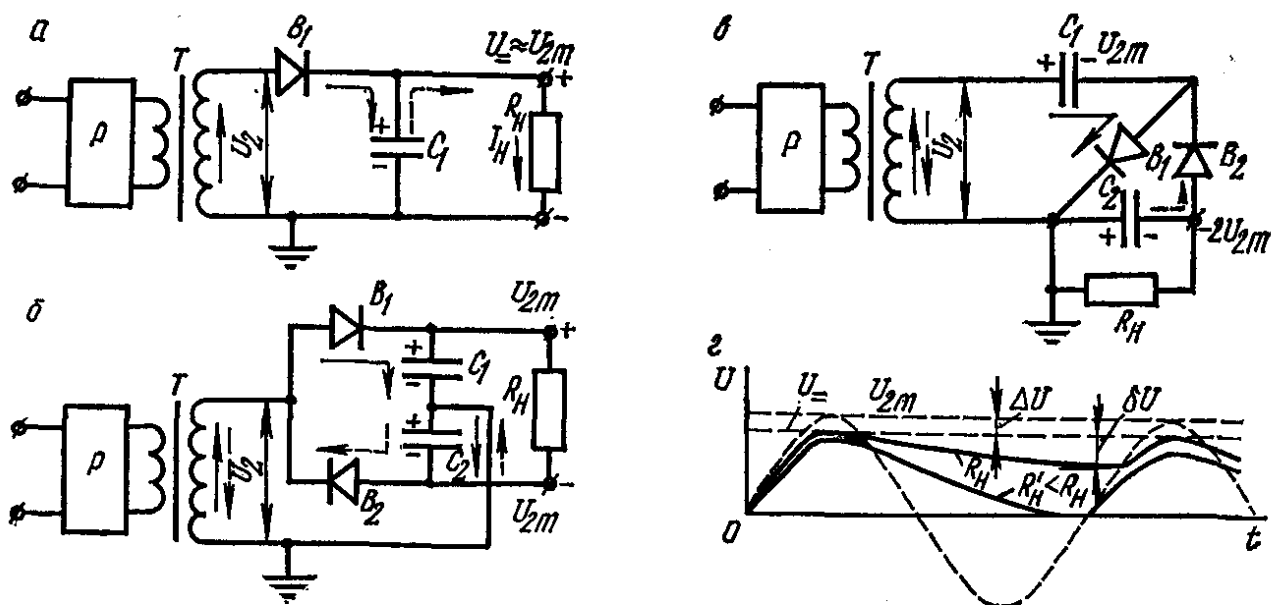


Рис. 6.3. Типовые схемы получения высокого выпрямленного напряжения (а, б, в) и диаграмма выпрямленного напряжения (з):
P — регулятор напряжения; *T* — высоковольтный трансформатор; *B*₁, *B*₂ — вентили;
*R*_н — сопротивление нагрузки.

В схеме **однополупериодного** выпрямления (рис. 6.3, а) вентиль *B*₁ проводит ток в течение одного полупериода переменного напряжения, при этом конденсатор *C*₁ заряжается; в течение следующего полупериода вентиль заперт, и конденсатор *C*₁ разряжается на сопротивление нагрузки *R*_н. Падение напряжения ΔU в элементах схемы и пульсация напряжения δU , обусловленная разрядом конденсатора *C*₁, определяются током нагрузки, и при $I_{н}=0$ ($R_{н}=\infty$) значения ΔU и δU будут также равны нулю (см. рис. 6.3, з). Конденсатор *C*₁ в этом случае будет заряжен до напряжения, равного амплитуде вторичного напряжения трансформатора U_2 .

В схеме рис. 6.3, б конденсатор *C*₁ заряжается через вентиль *B*₁ в полупериоды одной полярности (направление тока показано сплошными стрелками), а конденсатор *C*₂ — через вентиль *B*₂ в полупериоды противоположной полярности (пунктирные стрелки). Каждый из конденсаторов *C*₁ и *C*₂ может быть заряжен до напряжения, близкого к амплитуде напряжения U_2 . Напряжение на выходе схемы симметрично относительно земли и равно сумме напряжений конденсаторов *C*₁ и *C*₂, т. е. близко к двойному ампли-

тудному значению напряжения U_2 . Поэтому схема и называется схемой удвоения напряжения.

В схеме рис. 6.3, в, которая также принадлежит к схемам удвоения напряжения, конденсатор C_1 заряжается примерно до амплитудного значения напряжения U_2 в те полупериоды, когда клапан B_1 открыт. В полупериоды противоположной полярности открывается клапан B_2 и конденсатор C_2 оказывается включенным на напряжение, равное сумме напряжений U_{2m} трансформатора T и на-

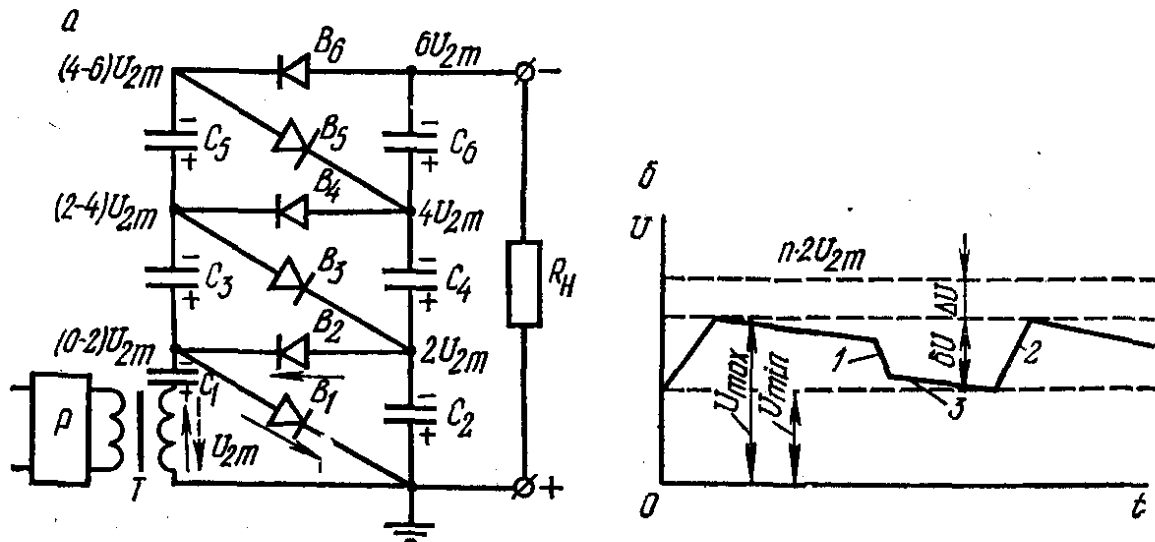


Рис. 6.4. Каскадные генераторы постоянного тока.

пряжения U_{2m} уже заряженного конденсатора C_1 . На выходе схемы получают несимметричное относительно земли напряжение, по величине близкое к удвоенной амплитуде напряжения U_2 .

При выборе клапанов нужно иметь в виду, что во всех рассмотренных схемах напряжение на клапанах в непроводящую часть периода равно $2U_{2m}$.

Для получения напряжения свыше 200 кВ обычно применяют схемы умножения (каскадные генераторы постоянного тока — ГПТ). Нижняя часть схемы умножения (рис. 6.4, а), образованная трансформатором T , клапанами B_1 и B_2 и конденсаторами C_1 и C_2 , повторяет схему рис. 6.3, в. При наиболее благоприятных условиях ($R_n = \infty$) конденсаторы C_1 и C_2 в этой схеме оказываются заряженными до напряжений U_{2m} и $2U_{2m}$. По мере того как заряжаются конденсаторы C_1 и C_2 , от них с некоторым запаздыванием во времени заряжается пара конденсаторов C_3 и C_4 ; по мере зарядки конденсаторов C_3 и C_4 от них начинают заряжаться конденсаторы C_5 и C_6 и т. д. В результате каждый из четных конденсаторов (C_2, C_4 и т. д.) оказывается заряженным до $2U_{2m}$, а вся цепочка этих конденсаторов теоретически даст относительно земли напряжение $n \cdot 2U_{2m}$, где n — число конденсаторов в цепочке (ступеней ГПТ).

Реально получаемое на выходе каскадного генератора напряжение отличается от теоретического на величины ΔU и δU (рис. 6.4, б). Участок 1 выходного напряжения соответствует зарядке конденсаторов левой группы, участок 2 — зарядке конденсаторов правой группы, участок 3 — разрядке конденсаторов на сопротивление

нагрузки. Анализ режима работы ГПТ приводит к следующим упрощенным выражениям величин падения напряжения ΔU и пульсации напряжения δU (при $C_1 = C_2 = \dots = C_n = C$):

$$\Delta U = \frac{I_H}{fC} \left(\frac{2}{3} n^3 + \frac{1}{2} n^2 - \frac{1}{6} n \right); \quad (6.1)$$

$$\delta U = \frac{I_H (n+1) n}{2fC}, \quad (6.2)$$

где n — число ступеней генератора; I_H — среднее значение тока нагрузки; f — частота сети, питающей генератор.

Из выражений (6.1) и (6.2) следует, что для уменьшения ΔU и δU в рассмотренной схеме последовательного питания конденсаторов нужно брать минимальное число n ступеней схемы, не выходящее за допустимые пределы тока нагрузки I_H , применять по возможности большие емкости C конденсаторов схемы и повышать частоту питания f (например, 500 Гц вместо 50).

Для уменьшения величин ΔU и δU каждую ступень ГПТ лучше питать от отдельного выпрямителя. В этом случае конденсаторы всех ступеней генератора заряжаются одновременно и параллельно от своих выпрямителей; зарядный ток конденсаторов при этом возрастает, их разрядка начинается также одновременно. Все это позволяет получить на выходе такого ГПТ большой ток и уменьшить падение и пульсацию напряжения.

Генераторы постоянного тока строятся обычно на напряжения до 1—1,5 МВ и токи нагрузки, не превышающие обычно 50 мА.

В качестве вентилях в рассмотренных схемах применяют кенотроны и полупроводниковые вентили. Высоковольтные кенотроны изготавливаются на средние анодные токи 25—30 мА и обратные напряжения до 220 кВ (кенотрон типа КР-220).

Для нагрева катодов кенотронов необходимо иметь источник тока, изолированный от земли. В выпрямителях ВН для этой цели применяют трансформаторы накала, в которых вторичная (накальная) обмотка изолирована от первичной на соответствующее напряжение. В каскадных ГПТ для питания накала вентилях применяют трансформаторы накала или специальные генераторы высокой частоты, питающие цепи накала.

Использование в качестве вентилях полупроводниковых диодов (германиевых или кремниевых) позволяет значительно упростить конструкцию высоковольтной установки постоянного тока, так как при их применении отпадает необходимость в каких-либо устройствах подогрева катодов. Недостатками полупроводниковых диодов являются низкие допустимые обратные напряжения, не превышающие 300—600 В, и значительный разброс параметров. Поэтому для работы в высоковольтных установках их соединяют последовательно и для обеспечения равномерного распределения обратного напряжения каждый диод шунтируют резистором (порядка 100—200 кОм), а группы диодов — конденсаторами. Резисторы обеспечивают равномерное распределение напряжения при его медленных

изменениях, а конденсаторы — при быстрых. Соединенные таким образом диоды выполняются конструктивно в виде залитых эпоксидным или другим компаундом блоков на 10—20 кВ, из которых и комплектуются вентили на требуемое напряжение.

Электростатические генераторы (ЭСГ) используют принцип накопления электрических зарядов и выполняются на напряжения от нескольких десятков киловольт до 8—10 МВ и токи, не превышающие нескольких миллиампер. Они применяются в качестве источников высокого напряжения в тех случаях, когда потребление тока невелико, например для окраски в электростатических полях, испытания электрической изоляции и главным образом для питания рентгеновских трубок и различных ускорителей заряженных частиц.

6.4. ГЕНЕРАТОРЫ ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Генератор импульсных напряжений (ГИН) представляет установку, предназначенную для генерирования грозовых импульсов. Впервые схема ГИН была предложена и выполнена профессором Московского университета В. К. Аркадьевым в 1914 г.

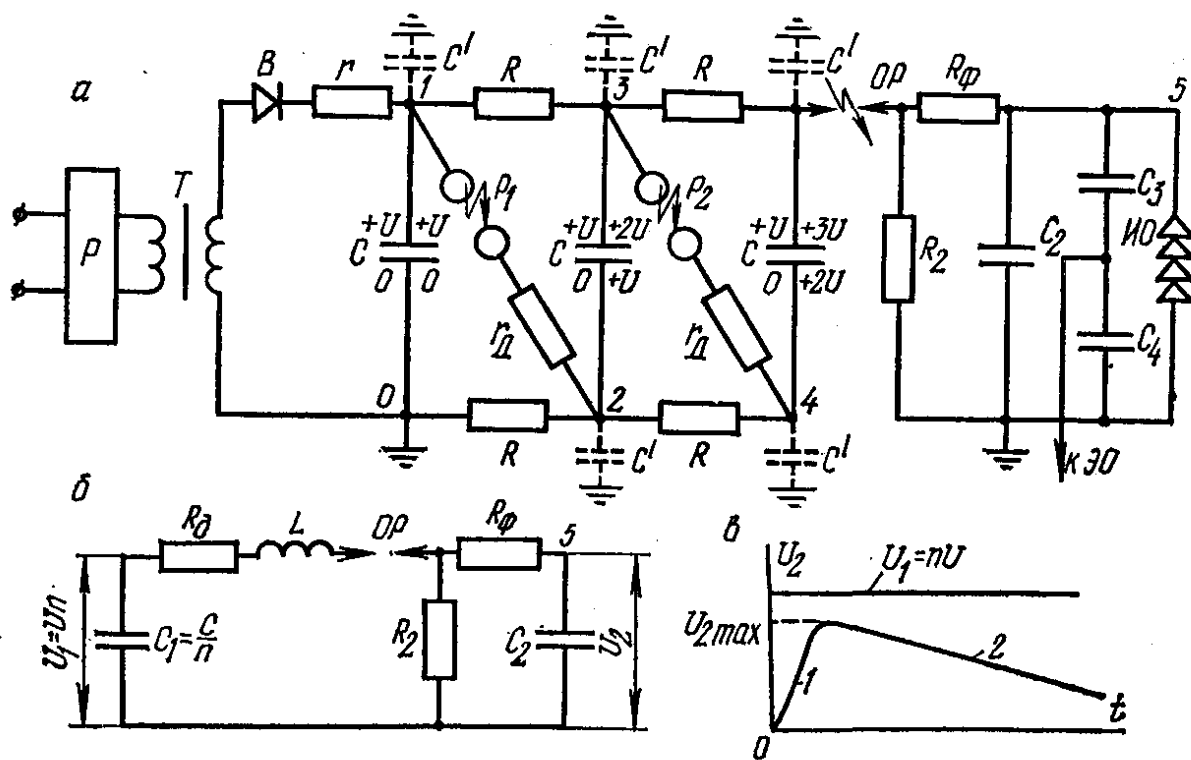


Рис. 6.5. Генератор импульсных напряжений:

a — принципиальная схема; *б* — схема замещения при разряде; *в* — форма напряжения на выходе ГИН. Потенциалы слева от электродов конденсаторов соответствуют концу зарядки, справа — разряду ГИН.

Схема ГИН из трех конденсаторов (число ступеней $n=3$) изображена на рис. 6.5, *a*. Работа ГИН складывается из двух последовательных стадий: зарядного режима, являющегося подготовкой ГИН к срабатыванию, и разрядного (рабочего) режима.

На первой стадии конденсаторы C генератора заряжаются от выпрямительного устройства, содержащего трансформатор T , вентиль B и резистор r (порядка 10^6 Ом). Этот резистор защищает вен-

тиль и трансформатор от перегрузки и ограничивает толчки тока в первые моменты зарядки конденсаторов.

При зарядке конденсаторы C подключены к источнику напряжения через зарядные резисторы R параллельно. Большие значения сопротивлений этих резисторов нежелательны, так как при этом увеличивается время заряда, однако их уменьшению препятствует разряд (при срабатывании ГИН) конденсаторов C на свои резисторы R , поэтому обычно выбирают $R \approx 5 \cdot 10^4$ Ом. Тогда при $C = 0,1$ мкФ $\tau_{RC} = 5 \cdot 10^4 \cdot 0,1 = 5 \cdot 10^3$ мкс, что превышает $T_{и}$ стандартного импульса более чем в 100 раз; следовательно, разрядом конденсаторов C на резисторы R при этом можно пренебречь.

Так как $R \ll r$, то можно считать, что через некоторое время, определяемое постоянной цепи заряда

$$\tau \approx \frac{8n^2 RC}{\pi^2} + rnC$$

и составляющее в ряде случаев десятки секунд и даже минуты, все конденсаторы C окажутся заряженными до одинакового напряжения $+U$, потенциалы нижних электродов этих конденсаторов будут равны нулю. Рабочий ход ГИН начинается в тот момент, когда напряжение в точке 1 достигает величины пробивного напряжения запального разрядника P_1 (пробой разрядников P_2 и последующих исключен, так как они установлены на расстояниях, несколько превышающих расстояние разрядника P_1). После пробоя разрядника P_1 точка 2 оказывается соединенной с точкой 1 через демпферный резистор r_d (порядка 10—50 Ом) и сопротивление искры разрядника, ее потенциал мгновенно повышается до $+U$, а потенциал верхнего электрода второго конденсатора C (точка 3) возрастает до $+2U$. Потенциал точки 4 сохраняется при этом равным нулю, так как постоянная времени заряда емкостей элементов конструкции ГИН относительно земли C' через резисторы R значительно больше постоянной времени заряда тех же емкостей через резисторы r_d ($r_d \ll R$). В результате под действием разности потенциалов $2U$ разрядник P_2 мгновенно пробивается, точка 4 приобретает потенциал $+2U$, и все три конденсатора ГИН оказываются соединенными последовательно. Под действием напряжения $3U$ пробивается отсекающий разрядник OP , который разъединял собственно ГИН до его срабатывания и цепь объекта и измерительных устройств, и напряжение $3U$ оказывается приложенным к выходной цепи (точка 5).

Выясним, как влияют на форму импульса отдельные элементы ГИН. Для этого рассмотрим схему замещения ГИН при разряде (рис. 6.5, б).

Емкость C_2 на выходе ГИН представляет сумму емкостей испытуемого объекта $ИО$, измерительного разрядника $ИР$, делителя напряжений $C_3 - C_4$, фронтовой емкости C_ϕ , специально включаемой для настройки ГИН, и паразитных емкостей элементов ГИН относительно земли.

Емкость C_1 называется **ударной емкостью** ГИН, она равна емкости последовательно соединенных конденсаторов C , т. е. $C_1 = C/n$.

Для лучшего использования ГИН его емкость в ударе C_1 принимают равной не менее $(5-10)C_2$.

Индуктивность L контура разряда ГИН, в которую входят индуктивность проводов и конденсаторов ГИН и индуктивность внешней цепи разряда, может быть рассчитана лишь ориентировочно. В практических конструкциях ГИН на напряжения порядка 1 МВ индуктивность L мала, и ее влиянием на форму волны в приближенных расчетах можно пренебречь.

Резистор R_d носит название **успокоительного (демпфирующего)**, его сопротивление равно сумме сопротивлений резисторов r_d , включенных последовательно с разрядниками P . Резистор R_ϕ представляет фронтовое сопротивление, вместе с R_d он определяет длительность зарядки емкости C_2 , т. е. длительность фронта импульса. Для удобства регулирования при настройке резистор R_ϕ включается вне конструкции ГИН.

Успокоительные резисторы необходимы, чтобы исключить возможность возникновения высокочастотных колебаний при разряде ГИН, наложение которых может значительно исказить стандартную форму импульса и явиться причиной значительной погрешности при определении импульсных характеристик изоляции. Значения сопротивлений резисторов R_d и R_ϕ должны удовлетворять условию апериодичности разряда ГИН:

$$R_d + R_\phi \gg 2\sqrt{L/C_3},$$

где $C_3 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \approx C_2$ (так как $C_1 \gg C_2$).

Кривая U_2 выходного напряжения ГИН приведена на рис. 6.5, в. После пробоя отсекающего разрядника емкость C_2 заряжается от емкости C_1 через резисторы R_d и R_ϕ с постоянной времени $\tau_1 = (R_d + R_\phi)C_2$, и напряжение U_2 растет при этом от 0 до $U_{2\max}$ (участок 1 кривой). Можно считать, что процесс зарядки закончится и напряжение на емкости C_2 достигнет максимума через время, равное $(3-4)\tau_1$, поэтому длина фронта импульса ориентировочно будет равна

$$T_\phi \approx (3-4)\tau_1 = (3-4)(R_d + R_\phi)C_2. \quad (6.3)$$

После того как напряжение на емкости C_2 достигнет максимума, начнется разряд емкости $C_1 + C_2$ через резистор R_2 , определяющий длину импульса (участок 2). Можно показать, что связь длины импульса T_n и постоянной времени разряда $\tau_2 = (C_1 + C_2)R_2$ определяется выражением $T_n \approx 0,67\tau_2$, поэтому

$$T_n \approx 0,67(C_1 + C_2)R_2. \quad (6.4)$$

Так как значения C_1 и C_2 генератора бывают обычно заданы, то для получения стандартного импульса по выражениям (6.3) и (6.4) определяют ориентировочные сопротивления резисторов R_d , R_ϕ и R_2 . Окончательный подбор сопротивлений этих резисторов производится опытным путем, форма волны при этом контролируется осциллографированием.

Параметрами ГИН являются номинальное (теоретически возможное) напряжение nU , емкость в ударе C_1 , энергия в ударе $W = (nU)^2 C_1 / 2$ и коэффициент использования η , представляющий отношение реально получаемой амплитуды напряжения к теоретически возможной. Коэффициент использования может быть приближенно определен из выражения

$$\eta = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \frac{R_2}{R_d + R_\phi + R_2}. \quad (6.5)$$

Из выражения (6.5) следует, что коэффициент использования снижается при увеличении емкости нагрузки, а также сопротивлений резисторов R_d и R_ϕ и уменьшении длины импульса $T_{\text{и}}$ (так как при этом уменьшается R_2). Для современных ГИН коэффициент использования достигает значений 0,8—0,9.

В настоящее время в ряде лабораторий высоких напряжений имеются ГИН на напряжения 3000—7500 кВ.

6.5. ГЕНЕРАТОРЫ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

В последние годы большое значение приобрел вопрос исследования поведения изоляции при воздействии коммутационных перенапряжений. Исследования в этой области показали, что коммутационные перенапряжения могут иметь форму или апериодического, или колебательного импульса. Параметры этих импульсов могут меняться в широких пределах, например частота колебательного импульса лежит в диапазоне от 50—100 Гц для дальних электропередач до 10^4 Гц и выше для коротких линий.

Для получения **апериодических** импульсов применяют схемы генераторов импульсных напряжений, аналогичные изображенной на рис. 6.5. Параметры таких ГИН выбирают так, чтобы обеспечить получение стандартного апериодического коммутационного импульса. По ГОСТ 1516—76, он должен иметь время подъема напряжения $T_{\text{п}} = 250 \pm 50$ мкс и длительность $T_{\text{и}} = 2500 \pm 500$ мкс (обозначение импульса «250/2500»). В ряде случаев, оговоренных стандартами на отдельные виды электрооборудования, допускается применение апериодических импульсов 100/2500, 500/2500 и 1000/5000.

Стандартный колебательный коммутационный импульс должен иметь время подъема напряжения в течение первого полупериода $T_{\text{п}}$, равное 50, 100 или 4000 мкс (в зависимости от вида испытываемой изоляции), и длительность $T_{\text{и}}$ первого полупериода 500, 1000 или 7500 мкс соответственно (импульсы 50/500, 100/1000 и 4000/7500).

Источником колебательных коммутационных импульсов в лабораторных условиях являются генераторы коммутационных перенапряжений (ГКП), базирующиеся на использовании или испытательных высоковольтных трансформаторов, или генераторов импульсного напряжения.

На рис. 6.6 представлен вариант схемы ГКП на основе каскада испытательных трансформаторов. Первичные обмотки трансформа-

торов T_1 и T_2 питаются от двух включенных встречно колебательных контуров L_1C_1 и L_2C_2 , настроенных на различные частоты f_1 и f_2 , обычно $f_2 = (3 - 5)f_1$.

После того как конденсаторы C_1 и C_2 зарядятся от источника постоянного напряжения $U_{\text{п}}$, напряжение между точками A и B питания обмоток НН трансформаторов будет равно нулю до момента замыкания контактора K . После замыкания контактора это напряжение будет возрастать более или менее быстро в зависимо-

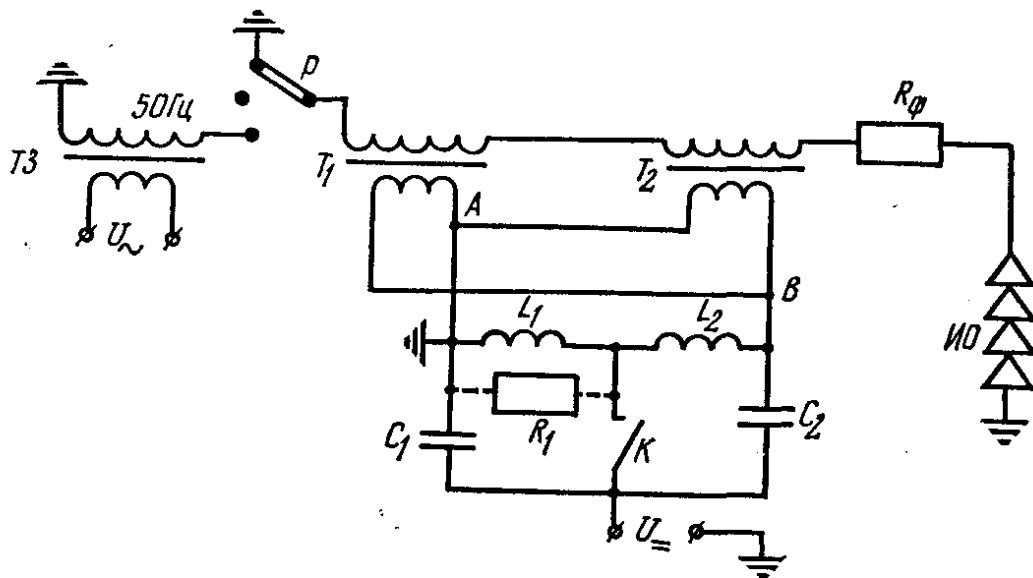


Рис. 6.6. Схема генератора коммутационных перенапряжений с использованием трансформаторов.

сти от соотношения частот f_1 и f_2 . На стороне ВН трансформаторов получится суммарное напряжение, изменение которого во времени можно регулировать в широких пределах. Если одну из индуктивностей, например L_1 , заменить резистором R_1 , то напряжение между точками A и B будет представлять результат наложения колебательного напряжения контура L_2C_2 на апериодическое напряжение контура C_1R_1 .

Если последовательно с трансформаторами T_1 и T_2 включить трансформатор T_3 , питаемый от сети с частотой 50 Гц, то на синусоидальное напряжение промышленной частоты трансформатора T_3 наложится напряжение трансформаторов T_1 и T_2 . Результирующую форму напряжения можно менять в широких пределах в зависимости от условий испытания.

ГКП на основе испытательных трансформаторов применяют для получения напряжений сравнительно большой длительности ($T_{\text{и}} \geq \geq 1000$ мкс).

Схема ГКП с использованием ГИН показана на рис. 6.7. ГКП (рис. 6.7, а) состоит из двух одинаковых частей ГИН, в которой одна из зарядных цепей образована резисторами R , а вторая — индуктивностями L_1 и L_2 . Благодаря подключению к точке m двух индуктивностей и разрядника P_2 обе половины ГИН в разрядном режиме включаются встречно. При этом частота затухающих колебаний левой половины ГИН определяется параметрами конту-

ра L_1C_1 , а правой — L_2C_2 . Если индуктивности L_2 заменить резисторами R_2 , то разряд правой части ГИН будет аperiodическим.

Напряжение на выходе (кривая 3, рис. 6.7, б, в) ГКП при срабатывании всех разрядников P вначале будет равно нулю из-за встречного включения половинок ГИН. В дальнейшем оно нарастает и изменяется в зависимости от закона изменения его составляющих в левой и правой половинах ГИН. Например, оно может иметь вид колебаний повышенной частоты (кривая 1), наложенных

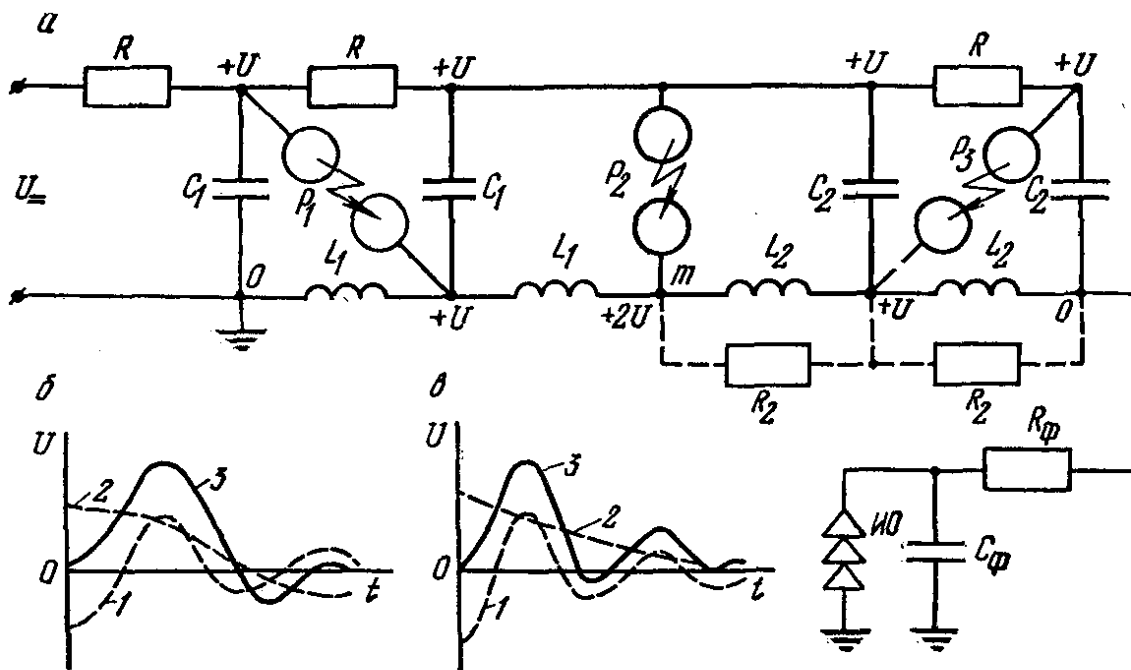


Рис. 6.7. Схема генератора коммутационных перенапряжений с использованием ГИН.

на колебания более низкой частоты (кривая 2), или вид колебаний, наложенных на аperiodическую составляющую (рис. 6.7, в). Изменяя значения индуктивностей ГКП, можно получать различные частоты затухающих колебаний. Обычно схемы с использованием ГИН применяют для получения колебательных импульсов с $T_{и} \leq \leq 1000$ мкс.

Другие варианты выполнения ГКП базируются на использовании рассмотренных схем и различаются в основном лишь техническими деталями.

6.6. ГЕНЕРАТОРЫ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ

При ударах молнии через пораженные объекты протекают импульсные токи, амплитуды которых в ряде случаев достигают 100 кА и более. Для получения таких токов в лабораторных условиях применяются генераторы импульсных токов (ГИТ).

ГИТ (рис. 6.8) представляет контур, в котором предварительно заряженная до напряжения U батарея конденсаторов C после пробоя искрового промежутка P разряжается через индуктивность контура L , активное сопротивление R , испытуемый объект $ИО$ и шунт $Ш$. Подбором величины R ГИТ может быть настроен на колебательный или аperiodический режим разряда.

Колебательный разряд имеет место при $R < 2\sqrt{L/C}$. Амплитуда тока $I_{\max} \approx U/\sqrt{L/C}$ будет наибольшей при $R \rightarrow 0$, а период колебаний $T = 2\pi\sqrt{LC}$.

Апериодический разряд ГИТ имеет место при $R \geq 2\sqrt{L/C}$. Наибольшая амплитуда тока $I_{\max} \approx 0,736U/R$ будет в предельном случае апериодического разряда ($R = 2\sqrt{L/C}$), длина фронта импульса тока при этом $T_{\phi} \approx \sqrt{LC}$.

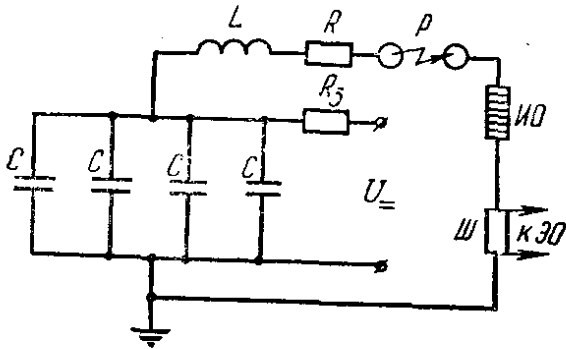


Рис. 6.8. Схема генератора импульсных токов.

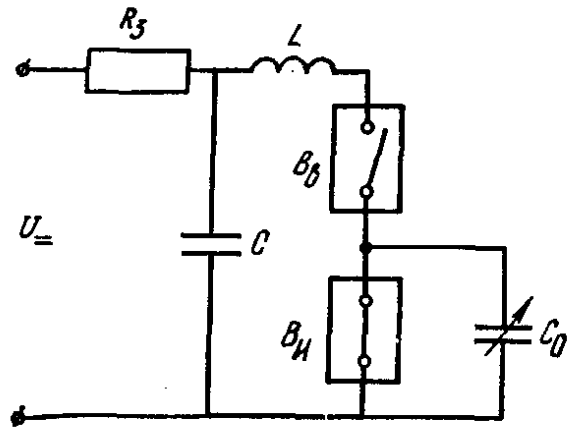


Рис. 6.9. Схема колебательного контура Горева.

Приведенные выражения показывают, что наибольшие амплитуды токов могут быть получены при условии минимальной индуктивности L и сопротивления R и максимально возможной величины емкости C контура при соответственно высоком напряжении U . Для получения минимальной индуктивности цепи разряда конденсаторы ГИТ располагают по окружности, а объект испытания, разрядник и шунт — в ее центре. При таком расположении все конденсаторы находятся в одинаковых условиях, и ток ГИТ, достигающий в этом случае наибольшей величины, равномерно распределяется между отдельными конденсаторами.

Если объект испытания по каким-либо соображениям должен быть расположен за пределами ГИТ, то связь отдельных конденсаторов с объектом испытания выполняется отрезками однофазного (коаксиального) кабеля одинаковой длины. Параллельное включение многих отрезков кабеля позволяет эффективно снизить индуктивность цепи разряда.

В настоящее время в ряде лабораторий имеются ГИТ, обеспечивающие при апериодическом разряде и напряжениях 50—100 кВ токи до 200 кА.

Разновидностью ГИТ являются схемы для определения отключающей способности выключателей ВН. Оригинальная схема для испытаний такого рода, предложенная впервые профессором А. А. Горевым, получила название **колебательного контура Горева** (рис. 6.9). В этой схеме батарея конденсаторов C заряжается до напряжения U от источника постоянного напряжения. Контакты испытуемого выключателя $B_{\text{н}}$ перед испытанием замкнуты, а контакты вспомогательного выключателя $B_{\text{в}}$ разомкнуты. При

испытании выключатель B_B включается, батарея конденсаторов начинает разряжаться по контуру $C - L - B_B - B_H - C$ и испытуемый выключатель должен отключить ток разряда конденсаторов. Отключающая способность выключателя оценивается при этом величиной тока разряда конденсаторов, который он надежно разрывает, и напряжением цепи.

Параметры контура подбираются так, чтобы разряд был колебательным с желаемой частотой (например, 50 Гц), т. е. $R < 2\sqrt{L/C}$ и $\omega = 2\pi f = 1/\sqrt{LC}$ (R — сопротивление цепи разряда контура).

Конденсатор C_0 (см. рис. 6.9) после разрыва цепи тока испытуемым выключателем оказывает влияние на скорость восстановления напряжения на его контактах. От величины этого напряжения зависит в свою очередь возможность повторных зажигания дуги, т. е. осложнение процесса отключения и возникновение перенапряжений.

Идея колебательного контура Горева легла в основу ряда подобных испытательных установок, известных под названием **синтетических схем испытаний выключателей**. В этих схемах используются два независимых источника напряжения: один — для создания в дуговом промежутке токов нужной величины, другой — для генерирования на контактах промежутка восстанавливающегося напряжения требуемой величины и изменяющегося по определенному закону.

Относительно невысокие напряжения ГИТ не дают при испытаниях полной аналогии протекания тока молнии. Поэтому для лучшего воспроизведения эффекта удара молнии, когда на объекте вначале имеют место очень высокие потенциалы канала молнии, применяют схемы совместной работы ГИН и ГИТ. В этих схемах пробой или перекрытие изоляции вызывает импульсное напряжение ГИН, затем по образовавшемуся проводящему каналу происходит разряд ГИТ.

7. ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЯХ

7.1. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ВОЛЬТМЕТРЫ

Электростатическими называются приборы, в которых электроды перемещаются под действием сил поля. Из теоретической электротехники известно, что механическая сила взаимодействия двух электродов, находящихся под разностью потенциалов U , в общем виде определяется соотношением

$$f_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{CU^2}{2} \right), \quad (7.1)$$

где f_x — сила, действующая в направлении x ; C — емкость электродов. Из выражения (7.1) следует, что с помощью электростатических вольтметров можно измерять действующие значения постоянного и переменного напряжений.

Если действующее на подвижный электрод поле однородно, перемещение электрода незначительно или исключено возвращением его в первоначальное положение, емкость C может быть достаточно точно рассчитана, а сила f_x измерена, то напряжение U можно рассчитать в соответствии с выражением (7.1). Вольтметры, удовлетворяющие этим условиям, называют **абсолютными**.

Абсолютный вольтметр (рис. 7.1) представляет своего рода уравновешенные перед измерением напряжения весы. На конце

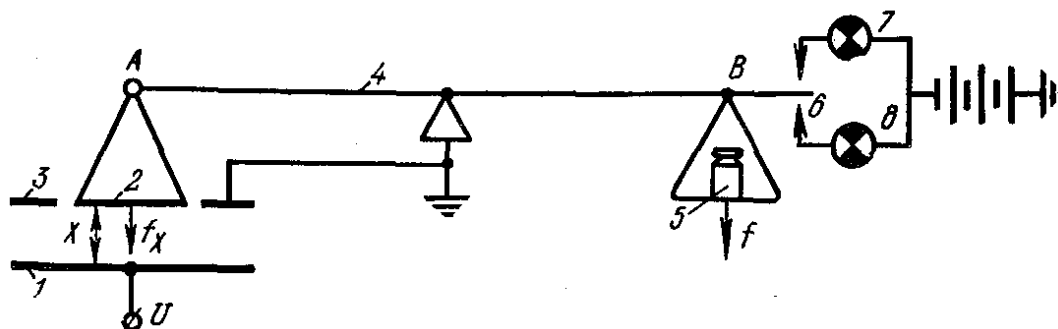


Рис. 7.1. Схема абсолютного электростатического вольтметра.

А заземленного коромысла 4 подвешен плоский электрод (диск) 2. Силами f_x электростатического взаимодействия этот диск притягивается к находящемуся под измеряемым напряжением U неподвижному диску 1. Благодаря наличию охранного кольца 3, охватывающего диск 2 и устраняющего тем самым краевой эффект на его периферии, поле между дисками 1 и 2 строго однородно и емкость между электродами может быть точно рассчитана по формуле $C = \epsilon F/x$, где F — площадь диска 2; x — расстояние между дисками.

Сила f_x определяется опытным путем — уравновешиванием весов гирьками 5. Равновесное положение контролируется с помощью контактной системы 6 и лампочек 7 и 8.

Абсолютные вольтметры служат для измерения напряжений до 300—400 кВ; в целях уменьшения габаритов их обычно размещают в баке с повышенным давлением газа. Погрешность вольтметров при измерениях составляет 0,01—0,4 %, поэтому они применяются в качестве эталонных приборов при градуировке технических вольтметров высокого напряжения.

Технические электростатические вольтметры высокого напряжения (ЭСВВ) применяются в тех случаях, когда при измерениях допускается погрешность порядка 2—3 %. На рис. 7.2, а показана схема устройства ЭСВВ с вращательным движением электрода, которая применяется во многих конструкциях. Измеряемое напряжение прикладывается к электродам 1 и 2, закрепленным на изоляторах. На выступающую часть подвижной системы (флажок 3), находящуюся перед вырезом в электроде, при этом действует сила f_x , поворачивающая подвижную систему на некоторый угол. Противодействующий момент создается или пружинкой, или закручиванием упругой растяжки (оси 4), на которой подвешена подвиж-

ная система. Показания прибора отсчитываются с помощью светового устройства, состоящего из зеркальца *б*, шкалы *в* и осветителя *7*. Демпферы *5* служат для успокоения колебаний подвижной системы.

Приборы по указанной схеме в принципе могут быть изготовлены на любые напряжения, необходимо только соответствующим образом изменить расстояние между электродами, их размеры и изоляцию. Отечественной промышленностью изготавливаются

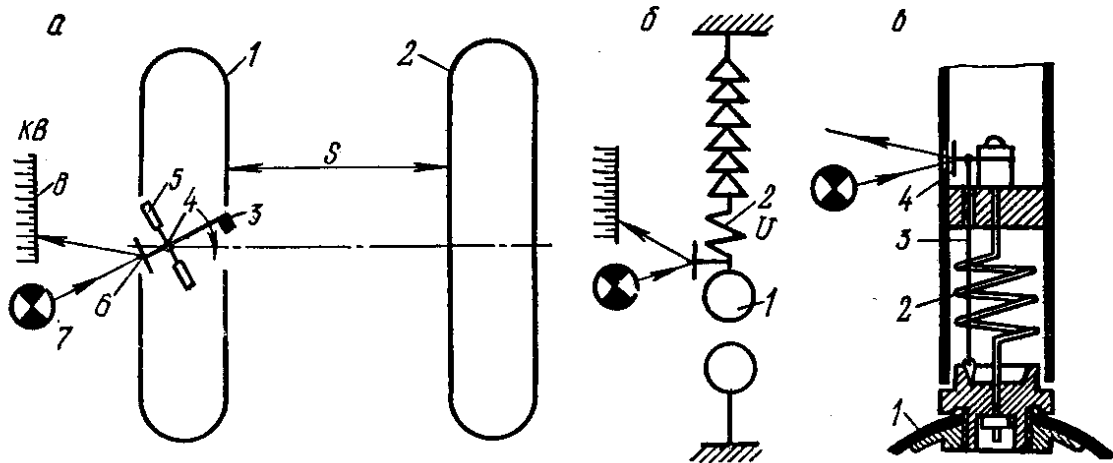


Рис. 7.2. Схемы технических электростатических вольтметров.

электростатические вольтметры для измерения напряжений до 30, 100 и 200 кВ, класс точности таких приборов 1,0—2,5.

Наличие в лабораториях высокого напряжения шаровых разрядников привело к использованию их в качестве шаровых электростатических вольтметров (рис. 7.2, б, в). Для этого верхний шар *1* разрядника подвешивается на пружине *2*, и его перемещение под действием сил притяжения между шарами передается с помощью нити *3* зеркальцу *4*, которое отбрасывает луч от осветителя на шкалу (рис. 7.2, в). Сила притяжения между шарами достигает значительных величин (для шара диаметром 50 см при расстоянии между ними $S=25$ см и напряжении 300 кВ она составляет примерно 3Н), поэтому конструкцию можно выполнить достаточно прочной и надежной. Изменения расстояний между шарами при измерениях можно не учитывать, так как они достаточно малы (не превышают 0,005 *S*).

7.2. ШАРОВЫЕ РАЗРЯДНИКИ

Длина воздушного промежутка между электродами какой-либо формы может служить мерой напряжения, которое вызвало пробой промежутка. Поскольку пробой воздушного промежутка определяется амплитудным значением приложенного напряжения, то искровые промежутки позволяют измерять амплитудные значения напряжений.

Наиболее подходящим для измерения амплитуды переменных, постоянных и импульсных напряжений как с конструктивной стороны, так и с точки зрения получения минимальной погрешности является шаровой разрядник.

В связи с тем что попытки найти обеспечивающие достаточную точность измерений расчетные формулы пробивных напряжений шаровых разрядников не дали удовлетворительных результатов, определение этих напряжений производится исключительно по таблицам МЭК. Эти таблицы составлены на основании сравнения результатов исследований, проведенных в крупнейших лабораториях ТВН различных стран, и в настоящее время являются официальным документом. При пользовании таблицами разрядных напряжений нужно учитывать ряд особенностей.

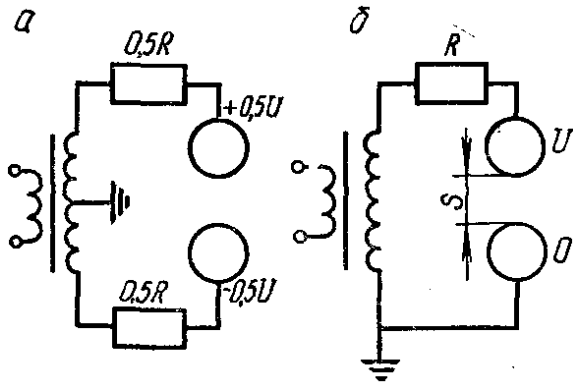


Рис. 7.3. Схемы включения шарового разрядника.

При использовании таблицами разрядных напряжений нужно учитывать ряд особенностей.

На практике возможны две схемы включения шарового разрядника — симметричная (рис. 7.3, а) и несимметричная (рис. 7.3, б). При симметричном включении разрядника пробивные напряжения одинаковы для всех его видов и обеих полярностей; при несимметричном

включении сказывается эффект полярности, но учет его производится только для импульсных напряжений, так как при постоянных напряжениях разброс пробивных напряжений из-за большой погрешности измерений превышает разницу, вызванную эффектом полярности. В связи с этим данные о пробивных напряжениях разрядников сгруппированы в три таблицы: для симметричного включения шаров; для переменного и постоянного напряжений и отрицательных импульсов (табл. 7.1); для положительных импульсов при несимметричном включении.

Пробивные напряжения в таблицах приведены для нормированных диаметров шаров — от 2 до 200 см; каждому диаметру соответствует определенный диапазон расстояний, в котором обеспечивается минимальная погрешность измерений. Наибольшее расстояние S между шарами не должно превышать $0,75 D$ (D — диаметр шара), при $S > 0,75 D$ сильно возрастает погрешность. Производить измерения при $S < 0,05 D$ также не рекомендуется вследствие затруднений при отсчете S и сильного влияния шероховатости поверхности шаров.

Все данные в таблицах приведены для воздуха при $t = 20^\circ \text{C}$ и $p = 101,3 \text{ кПа}$ (760 мм рт. ст.), для других температур и давлений воздуха необходимо вводить поправку на плотность воздуха δ по выражениям (1.4) и (1.22). Так как поле шаров при измерениях остается слабонеоднородным, то влияние влажности воздуха незначительно (менее 1 %), и его не учитывают.

Для уменьшения погрешности при измерениях необходимо, чтобы поверхность шаров была гладкой, полированной, без следов грязи и пыли, отклонение по диаметру допускается не более 1 %.

Конструктивно шаровые разрядники могут выполняться с горизонтальным (обычно при $D \leq 25 \text{ см}$) и вертикальным располо-

Табл. 7.1. Разрядные напряжения шаровых промежутков наиболее распространенных диаметров

Расстояние между шарами, см	Диаметр шара, см			
	6,25	12,5	25	50
0,5	17,2	16,8	—	—
0,6	20,2	19,9	—	—
0,7	23,2	23,0	—	—
0,8	26,2	26,0	—	—
0,9	29,1	28,9	—	—
1,0	31,9	31,7	31,7	—
1,2	37,5	37,4	37,4	—
1,4	42,9	42,9	42,9	—
1,6	48,1	48,1	48,1	—
1,8	53,5	53,5	53,5	—
2,0	58,5	59,0	59,0	59,0
2,2	63,0	64,5	64,5	64,5
2,4	67,5	69,5	70,0	70,0
2,6	72,0	74,5	75,5	75,5
2,8	76,0	79,5	81,0	81,0
3,0	79,5	85,0	86,0	86,0
3,5	(87,5)	97,0	99,0	99,0
4,0	(95,0)	108,0	112,0	112,0
4,5	(101,0)	119,0	125,0	125,0
5,0	(107,0)	129,0	137,0	138,0
6,0	—	146,0	161,0	164,0
7,0	—	(164,0)	184,0	189,0
8,0	—	—	206,0	214,0
9,0	—	—	226,0	239,0
10,0	—	—	244,0	263,0

кением шаров. При всех обстоятельствах разрядники должны быть снабжены надежным и удобным устройством для изменения и измерения расстояний между шарами (при $D \geq 50$ см — дистанционным).

Близость земли (пол лаборатории), а также различных заземленных или находящихся под напряжением предметов и проводников искажает картину поля между шарами и вызывает дополнительную погрешность, поэтому нормами (ГОСТ 17512—72) предусматриваются определенные расстояния от измерительных шаров до земли, стен и посторонних предметов (табл. 7.2).

При измерении напряжений 50 Гц и постоянного тока последо-

Табл. 7.2. Допустимые расстояния от точки начала разряда на изолированном шаре

Диаметр шара D , см	Расстояние до земли		Расстояние до стен и посторонних предметов (не менее)
	не менее	не более	
2—6,25	$7D$	$9D$	14S
10—15	$6D$	$8D$	12S
25	$5D$	$7D$	10S
50—75	$4D$	$6D$	8S
100	$3,5D$	$5D$	7S
150—200	$3D$	$4D$	6S

вательно с шарами разрядника включают защитный резистор R для ограничения перенапряжений и тока короткого замыкания испытательной установки при разряде, а также для защиты поверхности шаров от повреждения дугой. Сопротивления резистора составляют 1—10 Ом/В. Величина пробивного напряжения подчинена статистическим закономерностям, поэтому при нескольких измерениях одного и того же напряжения имеет место разброс получаемых результатов. В связи с этим измерения следует производить не менее трех раз и за измеряемую величину принимать средние арифметические значения отсчетов, отбросив случайные значительные отклонения. Недостатками шаровых разрядников при измерении напряжений 50 Гц и постоянного тока являются невозможность вести наблюдение за изменением напряжения во время опыта и необходимость отключать испытательную установку после каждого пробоя. Поэтому шаровые разрядники применяются в этих случаях главным образом для построения градуировочных кривых высоковольтных установок и измерения напряжений при испытаниях под дождем.

При измерении шаровыми разрядниками импульсных напряжений имеются некоторые особенности, связанные с явлением запаздывания. Для уменьшения времени запаздывания разряда, особенно при измерении напряжений до 50 кВ и напряжений коротких импульсов, разрядный промежуток шаров необходимо облучать, например ультрафиолетовым излучением ртутно-кварцевой лампы. Защитный резистор R , включаемый последовательно с шарами для уменьшения износа их поверхности, должен иметь в этом случае сопротивление не более 500 Ом. При больших сопротивлениях резистора будут иметь место искажение формы волны и падение напряжения на нем, вызванное относительно большим емкостным током $i = Cdu/dt$, протекающим в разряднике в предразрядное время. В результате погрешность измерений возрастает, особенно при измерениях срезанных импульсов.

При измерениях импульсных напряжений за пробивное напряжение разрядника принимают такое, при котором половина всех импульсов, приложенных к электродам разрядника, вызывает его пробой. Это напряжение называют **50%-ным пробивным напряжением**. Методика измерений состоит в следующем: расстояние между шарами уменьшают ступенями, соответствующими не более 2% ожидаемой величины измеряемого напряжения, и на каждой ступени дают по 10 импульсов. Если не будет достигнуто точно 50% пробоев (5 пробоев из 10 импульсов), то за величину промежутка, соответствующего 50%, принимают среднее арифметическое из двух значений, при одном из которых происходит 1—4, при другом — 6—9 пробоев из 10 импульсов.

Выбор необходимого диаметра шаров для измерения напряжений производят исходя из того, что при $S \leq 0,5 D$ разрядная напряженность составляет примерно 20 кВ/см. Тогда $U = 20 S = 10 D$, или $D \geq U/10$ (U — наибольшее значение амплитуды измеряемого напряжения, кВ; D — диаметр шаров, см).

При соблюдении всех рассмотренных выше требований к установке, включению шаров и проведению измерений погрешности измерения напряжений 50 Гц и импульсных при $S \leq 0,5 D$ не превышают $\pm 3 \%$. Для $S = (0,5—0,75) D$ погрешность возрастает за счет влияния неоднородности поля, а также посторонних предметов. Поэтому соответствующие значения в таблицах разрядных напряжений взяты в скобки.

При измерениях постоянных напряжений погрешность увеличивается, особенно при наличии в помещении пыли, и в случае длительного приложения напряжения оценивается величиной $\pm 5 \%$ при $S \leq 0,4 D$.

7.3. ЭЛЕКТРОННЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ

Электронный осциллограф (ЭО) является незаменимым прибором при изучении стационарных и переходных процессов в цепях высокого напряжения. Он широко используется при изучении перенапряжений, ионизационных явлений и при импульсных испытаниях. Для исследования периодически повторяющихся явлений применяются осциллографы с непрерывно повторяющейся разверткой луча. На экране таких осциллографов вследствие периодического повторения получается неподвижная развертка исследуемого явления.

Осциллографирование импульсных напряжений представляет довольно сложную задачу, так как при этом необходимо обеспечить регистрацию процесса при однократном и очень быстром перемещении электронного луча по экрану ЭО и синхронизировать работу всех блоков осциллографа с исследуемым явлением.

Для осциллографирования однократных кратковременных процессов импульсных напряжений в настоящее время применяются исключительно ЭО с горячим катодом.

Блок-схема такого осциллографа приведена на рис. 7.4, а. Электронно-лучевая трубка ЛО осциллографа должна обеспечивать достаточную яркость свечения экрана при наблюдении (записи) кратковременных однократных процессов. Чтобы сообщить электронам луча трубки необходимую для этого энергию, ускоряющее напряжение на аноде А должно быть порядка 5—20 кВ. Электронно-лучевые трубки с анодным напряжением 5 кВ и выше и осциллографы с такими трубками получили название **высоковольтных**. Чувствительность высоковольтных трубок невелика, часто порядка 0,05—0,1 мм/В, и для отклонения луча на экране трубки на 50—100 мм напряжение на отклоняющих пластинах ПЯ должно быть 1—2 кВ.

Вследствие высокой энергии электронов электронный луч в высоковольтных трубках не должен оставаться на экране неподвижным, так как в этом случае экран трубки будет немедленно прожжен и она выйдет из строя. Поэтому на модулятор М трубки подается отрицательное напряжение порядка 50—100 В, которое запирает электронный луч.

Исследуемый импульс желательно подавать прямо на пластины явления ПЯ, не применяя каких-либо усилителей, которые всегда

в какой-то степени искажают форму импульса. Получение импульса $U_{и}$ необходимой величины (1—2 кВ) не представляет затруднений, так как он снимается обычно с делителя напряжений и может быть сделан сколь угодно большим. Если нужно создать некоторое запаздывание момента подачи импульса $U_{и}$ на ПЯ, включается линия задержки ЛЗ (отрезок кабеля). Для устранения появления отраженных волн на конце ЛЗ включают резистор $R_{в}$, сопротивление которого равно волновому сопротивлению кабеля.

К моменту подачи на ПЯ исследуемого импульса электронный луч нужно отпереть (произвести «подсветку»), а на пластины вре-

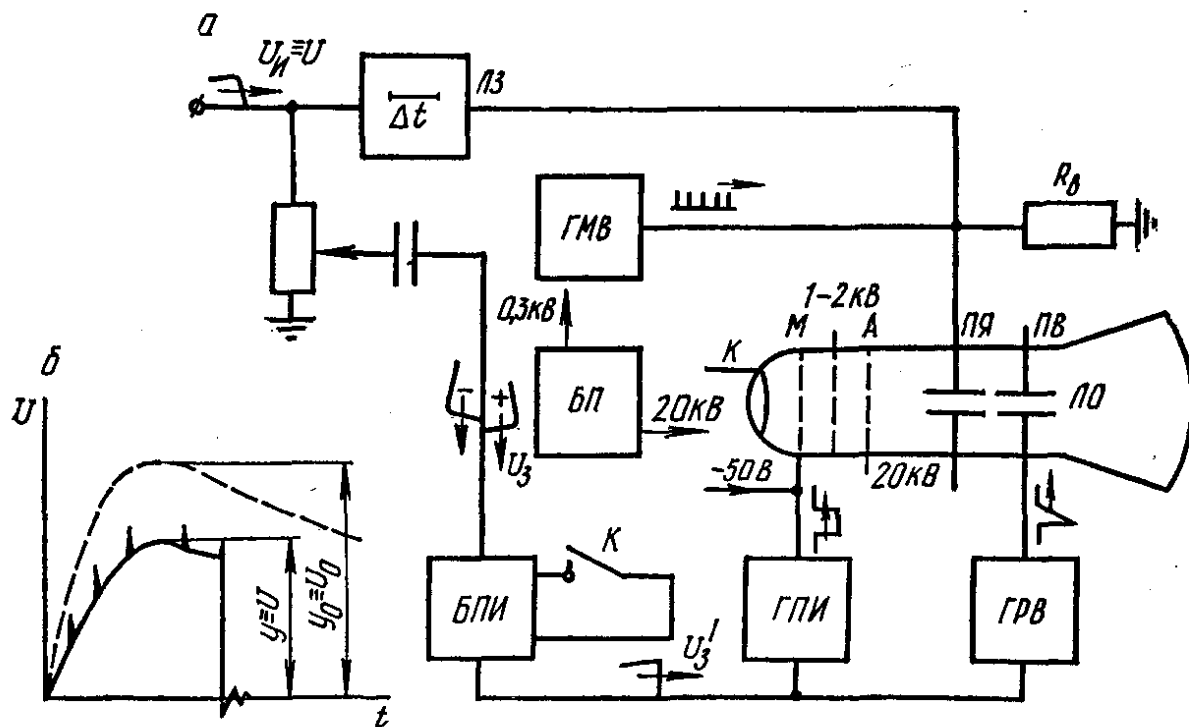


Рис. 7.4. Высокоточный электронный осциллограф.

мени ПЯ подать напряжение развертки. Отпирание луча производится путем подачи на модулятор трубки положительного прямоугольного импульса от генератора прямоугольных импульсов подсветки ГПИ, а развертка во времени — подачей на ПЯ однократного пилообразного напряжения от генератора развертки времени ГРВ; продолжительность импульсов, вырабатываемых этими генераторами, одинакова. Оба генератора находятся все время в готовом для работы состоянии (ждущий режим) и для обеспечения синхронности их работы запускаются одним и тем же импульсом, вырабатываемым блоком преобразования импульсов БПИ.

Необходимость в этом блоке объясняется тем, что величина, полярность и форма запускающего импульса $U_з$, который является частью исследуемого импульса $U_{и}$, могут быть различными, а для четкой работы генераторов подсветки и развертки необходимы запускающие импульсы определенной величины и полярности. Такие импульсы $U_з'$ и вырабатывает БПИ; кроме того, он является буферным каскадом между цепью измеряемых импульсов и генераторами. Срабатывание БПИ при проверке и настройке осциллографа вызывается нажатием на кнопку К.

Генератор меток времени ГМВ служит для градуировки оси времени осциллограммы; он вырабатывает остроконечные импульсы (метки) определенной частоты, которые накладываются на исследуемый импульс и помогают расшифровать осциллограмму (рис. 7.4, б).

Для определения амплитуды исследуемого импульса $U = y m_U$ необходимо знать масштаб по напряжению m_U . Для этого осциллографируют импульс, амплитуда которого U_0 известна (например, измерена шаровым разрядником); тогда $m_U = U_0 / y_0$ (y_0 — отклонение по оси Y).

Питание всех узлов и блоков осциллографа производится от блока питания БП.

7.4. ДЕЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЙ

Делитель напряжения представляет устройство для деления напряжения какого-либо высоковольтного источника на части. Применяются делители напряжений для расширения пределов измерения различных приборов, главным образом электронных осциллографов и вольтметров, когда ко входу измерительного прибора в силу его конструкции можно подвести напряжение U_2 , не превышающее обычно нескольких киловольт, а измеряемое напряжение составляет часто сотни и тысячи киловольт.

Требования, предъявляемые к делителю напряжения, заключаются в следующем: он должен иметь устойчивый коэффициент деления $K = U_1 / U_2$, не зависящий от режима его работы, температуры, времени, частоты и величины измеряемого напряжения; не должен искажать формы измеряемого напряжения, для этого его индуктивность и паразитная емкость должны быть минимальными; делитель не должен влиять на режим работы исследуемой цепи, т. е. он должен обладать высоким входным сопротивлением; на делителе недопустимы коронные разряды, и он должен быть защищен от влияния посторонних полей. Выполнение этих требований затрудняется по мере увеличения измеряемых напряжений, когда размеры делителей напряжения возрастают.

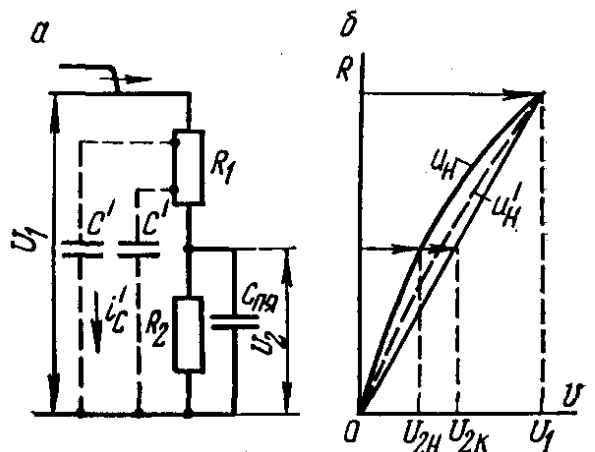


Рис. 7.5. Омический делитель напряжения.

Делители напряжений бывают **омические**, **емкостные** и **смешанные**.

Омический делитель напряжения (рис. 7.5, а) представляет два резистора R_1 и R_2 , соединенных последовательно. Напряжение для измерений снимается с низковольтного плеча делителя R_2 . Коэффициент деления

$$k_R = \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{R_1}{R_2} + 1 \approx R_1 / R_2 .$$

Для получения безындукционных делителей с малой паразитной емкостью C' резисторы R_1 и R_2 выполняются жидкостными, керамическими или проволочными с безындукционной, например бифилярной, намоткой. Применение манганина или константана диаметром 0,02—0,1 мм позволяет получить резисторы небольших размеров с сопротивлением в десятки килоом.

Погрешность измерений при применении омических делителей напряжения определяется в основном наличием паразитных емкостей C' элементов делителя на землю и окружающие предметы.

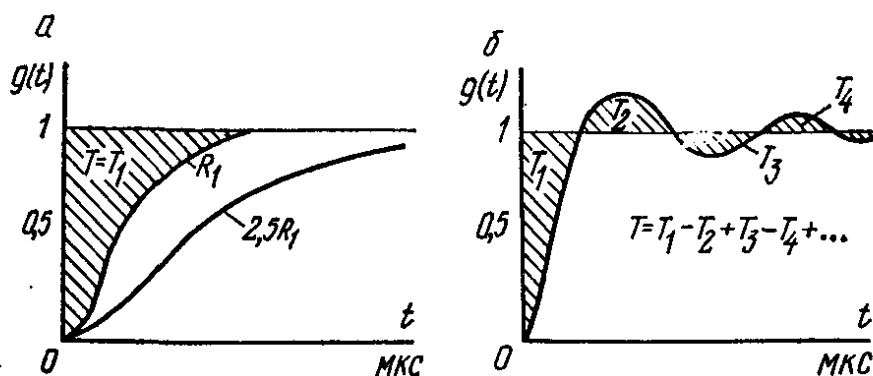


Рис. 7.6. Передаточные функции омического (а) и емкостного (б) делителей напряжения.

В начальный момент появления прямоугольной волны ($t=0$) распределение напряжения u_H по делителю будет резко неравномерным вследствие значительных емкостных токов i_C , напряжение на ПЯ при этом равно U_{2H} . Через некоторое время (условно при $t=\infty$) распределение напряжения станет равномерным, и конечное напряжение на ПЯ будет $U_{2K} > U_{2H}$ (см. рис. 7.5, б).

Таким образом, коэффициент деления k_R омического делителя, равный в установившемся режиме примерно R_1/R_2 , в переходном режиме, особенно при регистрации волн с крутым фронтом, не является величиной постоянной и зависит от времени. Поэтому запись волны будет производиться осциллографом с искажениями, степень которых зависит от постоянной времени $\tau = R_1 \Sigma C'$.

Важной характеристикой делителей импульсных напряжений является передаточная функция. Она представляет кривую $g(t)$ выходного напряжения при подаче на вход делителя единичного (с учетом коэффициента деления) прямоугольного импульса. Качественно передаточная функция оценивается временем реакции T на прямоугольный импульс, равным алгебраической сумме площадей между кривой выходного напряжения и прямоугольным единичным импульсом.

Для омических делителей напряжения, с которыми хорошо согласуются соединительные измерительные кабели, передаточная функция имеет вид, изображенный на рис. 7.6, а. Можно показать, что в этом случае время реакции $T = R_1 \Sigma C' / 6$. Приняв $R_1 = 25 \cdot 10^3$ Ом (при меньших значениях R_1 делитель будет представлять слишком большую нагрузку для ГИН) и $\Sigma C' = 100$ пФ, получим $T = R_1 \Sigma C' / 6 = 25 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-12} / 6 = 0,4$ мкс. По ГОСТ 17512—72, при измерении

полных и срезанных на спаде стандартных грозовых импульсов T не должно превышать 0,2 мкс, т. е. делитель с рассмотренными параметрами не обеспечит передачи таких импульсов без искажений.

Для уменьшения времени реакции T применяют экранированные омические делители. Благодаря наличию экрана емкости C' несколько уменьшаются, элементы высоковольтного плеча делителя частично разгружаются от емкостных токов i_C и начальное распределение напряжения становится более равномерным (u'_n).

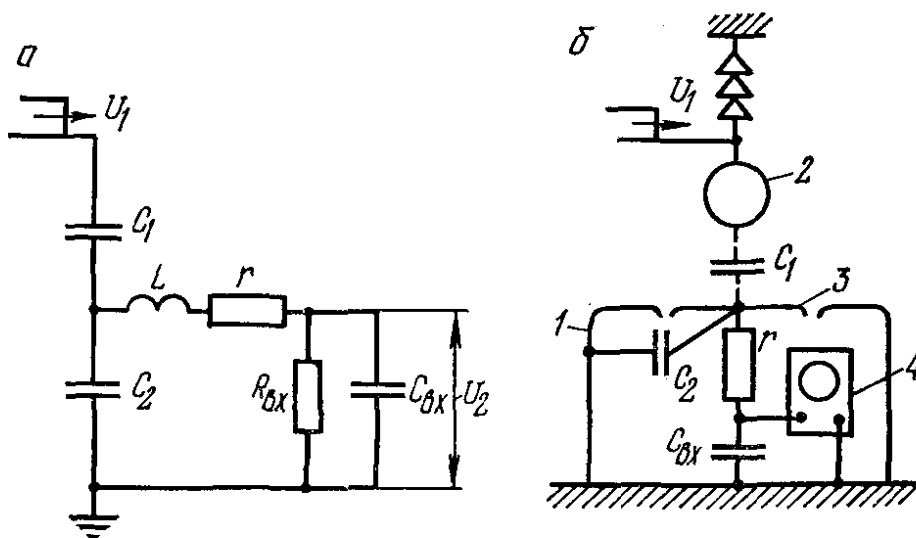


Рис. 7.7. Электрическая (а) и конструктивная (б) схемы емкостного делителя напряжений.

Омические делители целесообразно применять для измерения импульсных напряжений до 1 МВ со сравнительно длинным фронтом. При более высоких напряжениях размеры делителя сильно возрастают (при напряжении 2 МВ его высота достигает 10—12 м), увеличивается емкость C' и соответственно время реакции T .

При измерении высоких напряжений по соображениям техники безопасности осциллограф часто приходится удалять на значительное расстояние от делителя. Соединение осциллографа с делителем в этом случае производят с помощью высокочастотного одножильного кабеля. Этот кабель уже при длине порядка 10 м представляет линию с распределенными постоянными, и поэтому для предупреждения появления отраженных волн, искажающих форму первоначального импульса, на конце кабеля необходимо включить согласующий резистор $R_{в}$, сопротивление которого близко по величине к волновому сопротивлению z кабеля. Для демпфирования высокочастотных колебаний в контуре последовательно включают резистор $r = (10^2 - 10^3)$ Ом, примыкающий непосредственно к пластинам явления ЭО.

Коэффициент деления емкостного делителя напряжений (рис. 7.7)

$$k_C = \frac{U_1}{U_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} = \frac{C_2}{C_1} + 1 \approx \frac{C_2}{C_1}. \quad (7.5)$$

Емкостный делитель очень часто выполняют конструктивно по схеме рис. 7.7, б. Между электродом высокого напряжения 2 и приемным электродом 3 имеется емкость C_1 . Роль охранного кольца вокруг электрода 3 выполняет металлический экран 1, внутри которого находятся все остальные элементы делителя и измерительная аппаратура (например, осциллограф 4).

Высоковольтное плечо емкостного делителя (емкость C_1) может быть выполнено также в виде специального воздушного конденсатора, который для уменьшения габаритов заполняется газом под давлением, или в виде нескольких керамических или бумажно-масляных конденсаторов на соответствующие напряжения, соединенных последовательно. Емкость C_2 делителя во всех случаях представляет набор слюдяных или керамических конденсаторов.

Измерительный кабель очень плохо согласуется с емкостным делителем. Если на конце кабеля включить согласующий резистор, то он шунтирует низковольтное плечо делителя, если же кабель не оканчивается таким резистором, то в нем наблюдаются многократные отражения. И в том, и в другом случае возникают значительные искажения измеряемого импульса. Передаточная функция емкостного делителя при этом имеет вид, изображенный на рис. 7.6, б, а время реакции $T = T_1 - T_2 + T_3 - T_4 + \dots$

Необходимость в соединительном кабеле отпадает при выполнении делителя по схеме рис. 7.7, б. В этом случае время реакции T может быть определено по выражению

$$|T| = a/\beta_0^2,$$

где $\beta_0 = [(C_1 + C_2 + C_{вх})/LC_{вх}(C_1 + C_2)]^{0,5}$ — частота собственных колебаний схемы, показанной на рис. 7.7, а; $a = r/L$ — декремент затухания; L — индуктивность соединительных проводов; r — сопротивление демпферного резистора; $C_{вх}$ — входная емкость ЭО. Для уменьшения искажений следует брать C_2 и $C_{вх}$ резко отличающимися друг от друга, т. е. или $C_2 \gg C_{вх}$, или $C_{вх} \gg C_2$.

При $C_2 = 20$ пФ, $C_{вх} = 100$ пФ, $L = 1$ мкГн, $r = 50$ Ом имеем: $a = r/L = 50/10^{-6} = 5 \cdot 10^7$ и $\beta_0^2 = 120 \cdot 10^{-12} / (10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{-12} \times 20 \cdot 10^{-12}) = 6 \cdot 10^{16}$ (значением $C_1 \ll C_2$ пренебрегаем), тогда $|T| = a/\beta_0^2 \approx 2 \cdot 10^{-3}$ мкс.

Для регистрации импульсов с временем нарастания (среза) T_c необходимы делители, имеющие время реакции $|T|$ не более $0,05 T_c$. Например, при $T_c = 1$ мкс нужен делитель с $|T| \leq 0,05$ мкс. В рассмотренном случае $|T| = 2 \cdot 10^{-3}$ мкс, что значительно меньше требуемого. Таким образом, можно сделать вывод, что соответствующее конструктивное исполнение позволяет выполнить емкостный делитель с весьма малым временем реакции, необходимым при регистрации коротких импульсов и импульсов с крутым фронтом.

Смешанный (емкостно-омический) делитель сочетает свойства рассмотренных типов делителей, его коэффициент деления практически не зависит от частоты. Смешанные делители широко применяют при работе со сверхвысокими напряжениями.

7.5. ИЗМЕРЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ

В лабораторных условиях импульсные токи часто измеряют с помощью безындукционных шунтов. Мерой измеряемого тока служит падение напряжения на шунте, вызванное протекающим в нем током. Это падение напряжения может быть измерено с помощью электронного осциллографа или шарового разрядника. Основное затруднение при пользовании этим методом заключается в изготовлении шунта, обладающего возможно малой индуктивностью, так как она определяет основную погрешность при измерениях.

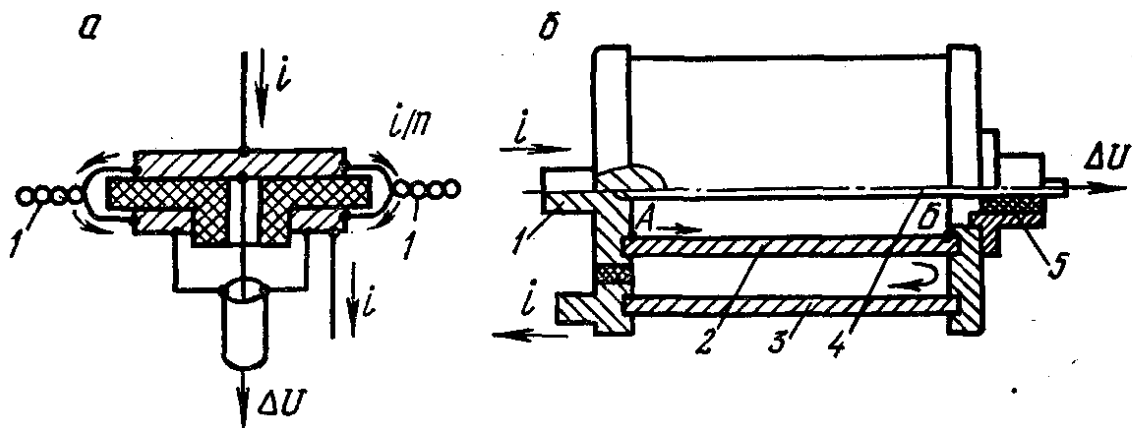


Рис. 7.8. Конструкции петлевого (а) и коаксиального (б) шунтов.

Для того чтобы искажение фронта импульсов T_{ϕ} не превышало 5 %, постоянная времени шунта

$$T_{\text{ш}} = L_{\text{ш}}/r_{\text{ш}} = L'q/\rho \quad (7.2)$$

не должна превышать $T_{\phi}/20$. Здесь L' — индуктивность на единицу длины шунта (при бифилярной намотке она может быть доведена до 0,2—0,3 мкГн/м); q — сечение проводника шунта; ρ — его удельное сопротивление.

Из формулы (7.2) видно, что для изготовления шунтов нужно применять материалы с высоким ρ при малом сечении q . Чтобы сопротивление шунта не увеличивалось в результате поверхностного эффекта, диаметр (толщина) проводников также не должен превышать определенного значения (при $T_{\phi} \leq 1$ мкс — 1 мм для нихрома и 0,5 мм для константана). Общее необходимое сечение $q_{\text{ш}}$ определяется допустимой плотностью импульсного тока по условиям нагрева ($j_{\text{доп}} = 5$ кА/мм²), поэтому при больших измеряемых токах приходится применять ряд параллельных ветвей.

На рис. 7.8, а показан шунт из нескольких параллельно соединенных бифилярно намотанных проволочных сопротивлений 1. Они расположены по радиусам, что приводит к дальнейшему уменьшению общей индуктивности.

При выполнении такого шунта на $I = 50$ кА из нихрома с 12 параллельными ветвями при допустимом напряжении ΔU на входе осциллографа 500 В получим $r_{\text{ш}} = \Delta U/I = 0,01$ Ом, $q_{\text{ш}} = I/j_{\text{доп}} = 10$ мм², $q = q_{\text{ш}}/12 = 0,83$ мм² и $d \approx 1$ мм (что допустимо). Постоян-

ная времени такого шунта $T_{ш} = 0,83 \cdot 2/1 = 0,15$ мкс, что позволяет измерять импульсы тока с $T_{ф}$ порядка до 2—3 мкс.

Для измерения больших импульсных токов и токов с малым $T_{ф}$ обычно применяют коаксиальные шунты (рис. 7.8, б). Ток протекает от центрального зажима 1 по внутреннему тонкостенному цилиндру 2, изготовленному из материала с высоким ρ , и возвращается через коаксиальный цилиндр 3, выполненный из обычного электропроводного материала. Падение напряжения ΔU на внутреннем цилиндре (между точками А и В) подводится с помощью

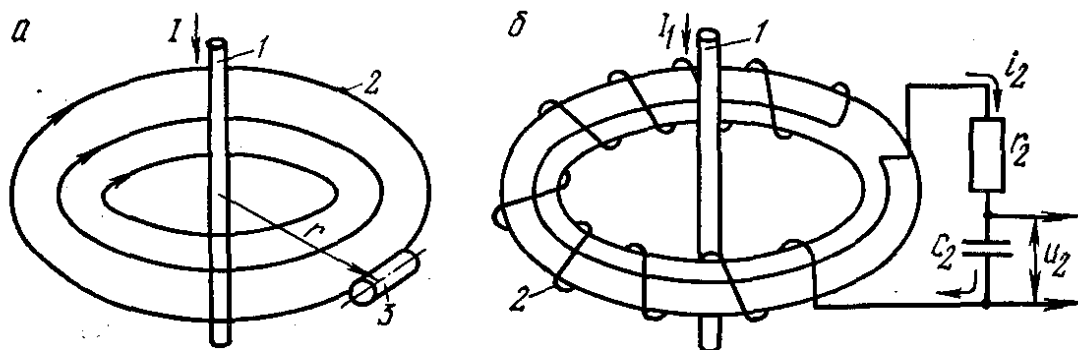


Рис. 7.9. Измерение импульсных токов:
а — ферромагнитным регистратором; б — методом пояса Роговского.

потенциальной отпайки 4 к коаксиальному разъему 5 и затем к ЭО. Так как в пространстве между отпайкой 4 и цилиндром 2 магнитное поле отсутствует, то такой шунт имеет чисто активное сопротивление, и погрешность измерений будет обусловлена в основном поверхностным эффектом.

Постоянная $T_{ш}$ таких шунтов не превышает 0,01 мкс, применяются они при измерении импульсных токов до 200 кА.

Для измерений амплитуды импульсного тока и его крутизны часто применяют **ферромагнитные регистраторы** и **пояс Роговского**, использующие магнитное поле импульсных токов.

Ток I , протекающий по проводнику 1 (рис. 7.9, а), создает магнитное поле, силовые линии 2 которого представляют концентрические относительно оси провода окружности. Напряженность магнитного поля в точке на расстоянии r от провода $H = I/2\pi r$. Если в эту точку внести ферромагнетик 3 в виде цилиндра и расположить его вдоль магнитной силовой линии, то под действием напряженности H он намагничивается. Остаточное намагничивание B_r ферромагнетика, зависящее от напряженности поля H , т. е. от измеряемого тока I , может быть измерено с помощью веберметра или баллистического гальванометра. Затем по градуировочной кривой ферромагнетика из выражения $I = f(H) = f'(B_r)$ можно определить амплитудное значение тока I .

Для устранения явления поверхностного эффекта при измерениях импульсных токов ферромагнитные регистраторы изготавливают из порошкообразного магнитотвердого материала, в качестве связующего применяют какую-либо смолу, например бакелитовую.

Ферромагнитные регистраторы имеют длину 5—6 см и диаметр порядка 1 см.

Для большей точности измерений часто применяют два ферромагнетика, расположенных на разных расстояниях от проводника с током; ближний ферромагнетик регистрирует сравнительно малые токи, более удаленный — большие токи.

Применение ферромагнитных регистраторов в высоковольтных сетях дало возможность изучить процессы протекания токов молнии в проводах, тросах, опорах ВЛ и получить ценные данные для гроззащиты.

Пояс Роговского (рис. 7.9, б) представляет тороидальный соленоид 2 без сердечника, охватывающий провод 1, по которому протекает измеряемый ток I_1 , т. е. является воздушным трансформатором тока.

Пренебрегая влиянием вторичной цепи на первичную ($M di_2/dt$ очень мало), можно записать:

$$M \frac{di_1}{dt} + i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt = 0. \quad (7.3)$$

При измерении u_2 с помощью RC-цепочки необходимо, чтобы $i_2 r_2 \gg L_2 \frac{di_2}{dt}$ и $i_2 r_2 \gg \frac{1}{C_2} \int i_2 dt$, тогда $i_2 = M \frac{di_1}{dt} / r_2$ и $u_2 = u_{C_2} = \frac{1}{C_2} \int i_2 dt = \frac{1}{C_2} \int M \frac{di_1}{dt} / r_2 = \frac{M}{r_2 C_2} I_1$, т. е. напряжение u_2 измеряемое обычно с помощью ЭО, будет пропорционально току I_1 .

Для измерения токов с длиной фронта $T_{\phi \min}$ и $T_{\phi \max}$ нужно выполнить условия: $r_2 \gg L_2 / T_{\phi \min}$; $r_2 \gg T_{\phi \max} / C_2$.

Пояс Роговского может быть применен также для измерения крутизны тока. Для этого конденсатор C_2 замыкают накоротко, а напряжение u_2 снимают с резистора r_2 . В этом случае из выражения (7.3) имеем $di_1/dt = i_2 r_2 / M$ или $a_i = u_2 / M$.

Достоинством ферромагнитных регистраторов тока и пояса Роговского является то, что они позволяют производить измерения без контакта с цепью высокого напряжения и, следовательно, не оказывают никакого влияния на объект измерения.

7.6. БЕСКОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В последние годы все большее внимание уделяется разработке бесконтактных методов измерения напряжений и токов. На рис. 7.10 приведена принципиальная схема оптико-электронного метода измерения высоких напряжений, основанного на принципе модуляции света с помощью ячейки Керра.

Источник монохроматического света 1 создает пучок лучей постоянной интенсивности, который проходит последовательно через поляризатор 2, электрооптическую ячейку (ячейку Керра) 4 и анализатор 5 (призмы 3 служат для изменения направления лучей).

Ячейка Керра представляет конденсатор, диэлектриком которого является электрооптическое вещество, например бензол. При отсутствии напряжения на ячейке свет проходит через нее без изменения своих свойств и задерживается анализатором 5, так как он установлен перпендикулярно к поляризатору 2. При наличии напряжения на ячейке поляризованный свет расщепляется в ней на два взаимно перпендикулярных компонента, которые выходят из

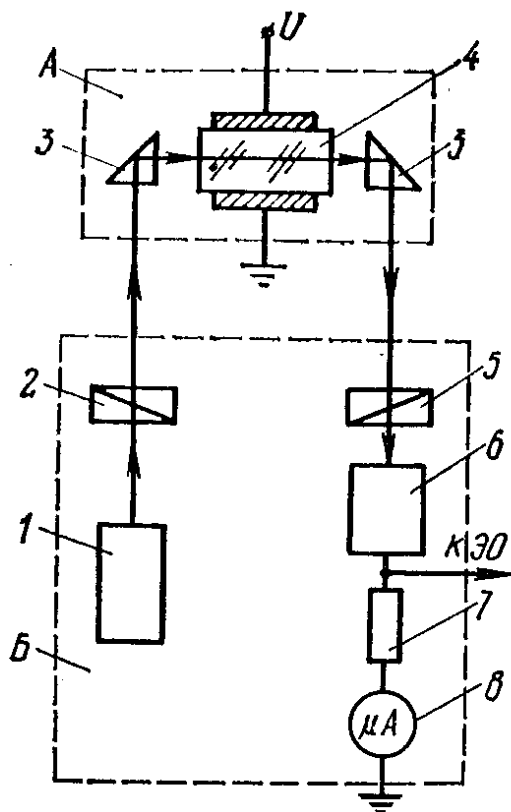


Рис. 7.10. Оптико-электронный метод измерения высоких напряжений.

ячейки с разностью фаз, зависящей, в частности, от напряженности электрического поля в ячейке. Анализатор пропускает те составляющие, направление колебаний которых совпадает с его плоскостью поляризации. В результате интенсивность света на выходе анализатора 5 зависит только от напряжения U , приложенного к ячейке. Этот свет воздействует на фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) 6, среднее значение выходного тока которого измеряется стрелочным прибором 8, а падение напряжения на нагрузочном резисторе 7 подается на электронный осциллограф.

Связь между блоком измерительного преобразователя А и приемно-передающим блоком Б осуществляется по воздуху или с помощью стекловолоконной оптики; расстояние между блоками может достигать десятка метров.

Рассмотренная система измерений имеет практически неограниченный диапазон рабочих частот, так как само явление Керра в жидкостях безынерционно. В настоящее время ячейки Керра изготавливаются на напряжения до 500 кВ, емкость их порядка нескольких пикофард, а сопротивление 10^6 — 10^8 Ом. Поэтому подключение ячейки практически не влияет на измеряемую цепь.

Оптико-электронные методы можно также применять для измерения импульсных токов. В этом случае вместо ячейки Керра преобразователем является ячейка Фарадея, в которой используется поворот плоскости поляризации линейно-поляризованного света, распространяющегося в веществе (например, бензоле и некоторых сортах стекол) вдоль силовых линий магнитного поля. Угол поворота при этом пропорционален напряженности магнитного поля H . Следовательно, интенсивность света на входе ФЭУ будет пропорциональна измеряемому току.

II. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ И ЗАЩИТА ОТ НИХ

8. ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И ОБМОТКАХ МАШИН

8.1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН В ЛИНИЯХ БЕЗ ПОТЕРЬ

Перенапряжениями называют такие повышения напряжения, которые представляют опасность для изоляции электрических установок. Перенапряжения в электрических установках можно разделить на две группы: **грозовые** и **внутренние**. Причиной грозовых перенапряжений являются разряды молнии; внутренние перенапряжения возникают при нормальных оперативных включениях и выключениях или аварийных процессах: замыканиях фазы на землю, коротких замыканиях, обрывах проводов и пр.

При прямых ударах молнии (п. у. м.) в линию или вблизи нее в землю возникают электромагнитные волны, распространяющиеся от точки удара вдоль проводов линии электропередачи в обе стороны. Перенапряжения, воздействующие на изоляцию линий и подстанций, определяются движением и преломлением этих волн, поэтому рассмотрение волновых процессов при расчетах устройств грозозащиты имеет важное значение.

Как известно из курса теоретической электротехники, волновой процесс в реальной линии определяется четырьмя основными параметрами: емкостью C_0 , индуктивностью L_0 , активным сопротивлением r_0 и активной проводимостью g_0 на единицу длины линии, а дифференциальные уравнения, описывающие волновой процесс, имеют вид:

$$-du/dx = L_0 di/dt + r_0 i; \quad -di/dx = C_0 du/dt + g_0 u. \quad (8.1)$$

Для упрощения анализа волновых процессов вместо реальной линии рассмотрим линию без потерь, для которой $r_0 = 0$ и $g_0 = 0$. Тогда уравнения (8.1) можно записать так:

$$-du/dx = L_0 di/dt; \quad -di/dx = C_0 du/dt. \quad (8.2)$$

Решением этих уравнений являются волновые функции, или волны напряжения и тока:

$$\left. \begin{aligned} u &= u_1 + u_2 = f_1(x - vt) + f_2(x + vt); \\ i &= i_1 + i_2 = \frac{1}{z} f_1(x - vt) - \frac{1}{z} f_2(x + vt), \end{aligned} \right\} \quad (8.3)$$

где $z = \sqrt{L_0 / C_0}$ — волновое сопротивление линии без потерь; $v = c / \sqrt{\epsilon \mu} = 1 / \sqrt{L_0 C_0}$ — скорость распространения волны; c — скорость распространения электромагнитных волн в пустоте, равная $3 \cdot 10^{10}$ см/с, или 300 м/мкс. Для воздушных линий $\epsilon = \mu = 1$ и $v = c$. Для кабельных линий $\mu = 1$, $\epsilon \approx 4$ и $v_k \approx c/2 \approx 150$ м/мкс.

Волна $f_1(x-vt)$, распространяющаяся в сторону положительных значений x , называется **прямой**; волна $f_2(x+vt)$ — **обратной** волной. В выражениях (8.3) прямые и обратные волны записаны как функции пространственных координат $x-vt$ и $x+vt$ в заданный момент времени t .

Эти же выражения можно записать как функции времени в заданной точке x . Прямая волна в этом случае запишется в виде $f_1(t-x/v)$, а обратная — $f_2(t+x/v)$, где t — время, отсчитываемое от начала процесса в точке с координатой $x=0$.

Из выражений (8.3) видно, что ток и напряжение прямых и обратных волн связаны соотношениями: $i_1 = u_1/z$; $i_2 = -u_2/z$.

Для однопроводной воздушной линии волновое сопротивление

$$z = \sqrt{L_0/C_0} = 60 \ln 2h/r = 138 \lg 2h/r,$$

где h, r — средняя высота подвеса и радиус провода.

Так как геометрические размеры, определяющие значение z , стоят под знаком логарифма, то волновое сопротивление для воздушных линий различной конструкции меняется незначительно и составляет 400—500 Ом для линий с одиночными проводами и 200—400 Ом для линий с расщепленными проводами.

Волновое сопротивление кабелей вследствие их большей емкости и малой индуктивности лежит в пределах 5—40 Ом в зависимости от сечения, номинального напряжения и конструкции.

Из выражений $z = \sqrt{L_0/C_0}$ и $v = 1/\sqrt{L_0 C_0}$ следует: $L = z l = z l/v$; $C = C_0 l = l/zv$.

Так как v — величина постоянная, то волновое сопротивление однозначно определяет удельную и полную индуктивности и емкости линии.

8.2. ПРЕЛОМЛЕНИЕ И ОТРАЖЕНИЕ ВОЛН. ПРАВИЛО ПЕТЕРСЕНА

Пусть волна, распространяющаяся по линии с волновым сопротивлением z_1 , достигает узловой точки A , в которой подключено сопротивление нагрузки z_H (рис. 8.1, а), состоящее в общем случае из любых комбинаций r, L и C и волновых сопротивлений z_2 .

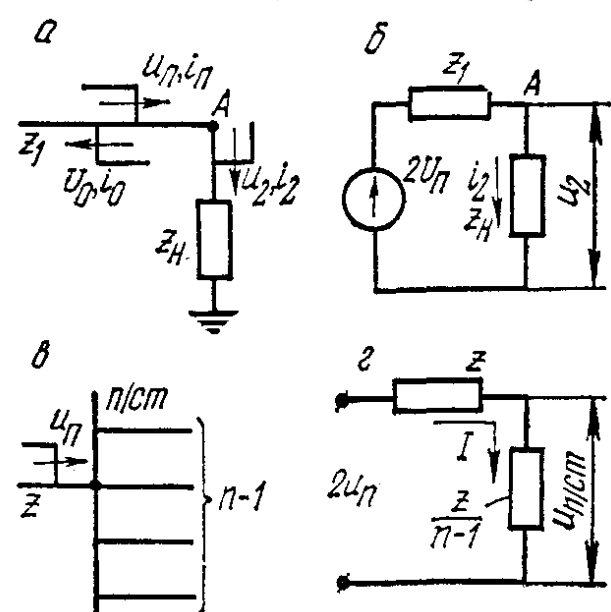


Рис. 8.1. Расчет преломленных волн в узловых точках.

Падение волны u_H на узловую точку приводит вследствие изменения соотношения между напряжением и током к появлению преломленной u_2 и отраженной u_0 волн. Очевидно, что для точки A $u_2 = u_H + u_0$ и $i_2 = i_H + i_0$.

Подставив вместо токов i_H и i_0 их значения $i_H = u_H/z_1$ и $i_0 = -u_0/z_1$ (знак волны отраженного тока всегда противоположен знаку волны отраженного напряже-

ния), получим

$$i_2 z_1 = u_{\Pi} - u_0 = u_{\Pi} - u_2 + u_{\Pi},$$

т. е.

$$2u_{\Pi} = i_2 z_1 + u_2. \quad (8.4)$$

Уравнению (8.4) соответствуют расчетная схема рис. 8.1, б и правило Петерсена: вместо реальной схемы, содержащей волновые сопротивления и элементы r , L и C , составляют эквивалентную, в которой волновые сопротивления заменены равными им по величине активными, элементы r , L и C оставлены без изменения и которая подключена к источнику с напряжением $2u_{\Pi}$; расчет схемы ведется по правилам цепей с сосредоточенными параметрами.

Найдем напряжения u_2 и u_0 в нашем случае:

$$u_2 = i_2 z_{\text{H}} = \frac{2u_{\Pi}}{z_1 + z_{\text{H}}} z_{\text{H}} = u_{\Pi} \frac{2z_{\text{H}}}{z_1 + z_{\text{H}}} = u_{\Pi} \alpha_u;$$

$$u_0 = u_2 - u_{\Pi} = u_{\Pi} \frac{z_{\text{H}} - z_1}{z_1 + z_{\text{H}}} = u_{\Pi} \beta_u,$$

где

$$\alpha_u = \frac{2z_{\text{H}}}{z_1 + z_{\text{H}}}; \quad \beta_u = \frac{z_{\text{H}} - z_1}{z_1 + z_{\text{H}}}. \quad (8.5)$$

Коэффициенты α_u и β_u называются соответственно коэффициентами преломления и отражения волн напряжения. Из выражений (8.5) очевидно, что $\alpha - \beta = 1$.

Выражения коэффициентов преломления и отражения волн тока имеют аналогичный вид:

$$\alpha_i = \frac{2z_1}{z_1 + z_{\text{H}}}; \quad \beta_i = \frac{z_1 - z_{\text{H}}}{z_1 + z_{\text{H}}}.$$

Сопротивление нагрузки z_{H} в общем случае является операторным сопротивлением $z_{\text{H}}(p)$, в которое элементы r , L и C входят операторными сопротивлениями r , pL и $1/pC$. Расчет в этом случае следует вести операторным методом, представляя падающую волну ее изображением.

При чисто активной нагрузке z_{H} коэффициенты α и β — действительные числа. В случае разомкнутой линии ($z_{\text{H}} = \infty$) $\alpha_u = 2$, $\beta_u = 1$, т. е. волна напряжения отражается с сохранением знака, а волна тока — с обратным знаком, в результате чего напряжение удваивается, а ток спадает до нуля. В случае замкнутой на конце линии ($z_{\text{H}} = 0$, $\alpha_u = 0$, $\beta_u = 1$) волна напряжения отражается с обратным знаком, а волна тока — с сохранением знака, в результате чего напряжение спадает до нуля, а ток возрастает вдвое.

При переходе волны с воздушной линии на кабельную ($z_1 > z_2$) амплитуда преломленной волны напряжения уменьшается, так как $\alpha_u = 2z_2 / (z_1 + z_2) < 1$, например при $z_1 = 400$ Ом и $z_2 = 40$ Ом $\alpha_u \approx 0,18$. При обратном переходе (с кабельной линии на воздуш-

ную) при тех же сопротивлениях $\alpha_u \approx 1,8$, т. е. амплитуда преломленной волны возрастает почти в 2 раза.

Если на шины подстанции подключено n одинаковых линий и по одной из них приходит волна (рис. 8.1, в), то напряжение на шинах (рис. 8.1, г)

$$u_{п/ст} = I \frac{z}{n-1} = \frac{2u_{п}}{z + z/(n-1)} \frac{z}{n-1} = 2u_{п} / n$$

тем меньше, чем больше линий подключено к шинам.

В наиболее тяжелых условиях будет находиться изоляция тупиковых подстанций, для которых $n=1$ и $u_{п/ст}=2u_{п}$. Для проходных подстанций $n=2$ и $u_{п/ст}=u_{п}$, т. е. волна будет проходить мимо без изменений ее амплитуды; при $n>2$ напряжение на шинах подстанций снижается по сравнению с напряжением падающей волны.

8.3. ПРОХОЖДЕНИЕ ВОЛН МИМО ЕМКОСТИ ИЛИ ЧЕРЕЗ ИНДУКТИВНОСТЬ

На практике волна перенапряжения при подходе к шинам подстанций (п/ст) часто проходит мимо емкости или через индуктивность.

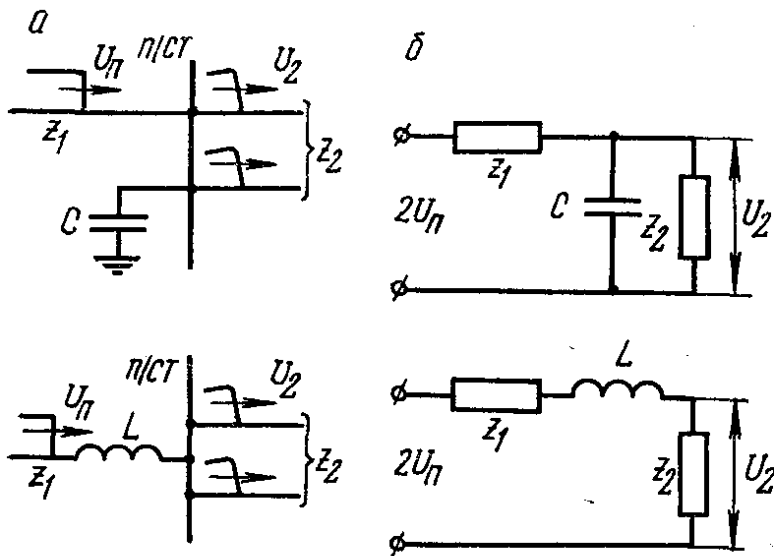


Рис. 8.2. Прохождение волны мимо емкости и через индуктивность.

Рассмотрим, какое влияние они окажут на прямоугольную волну бесконечной длины (рис. 8.2, а).

На расчетных схемах (рис. 8.2, б) напряжение, определяемое на шинах п/ст, является напряжением на сопротивлении z_2 , равном эквивалентному сопротивлению отходящих линий. Расчет ведем операторным методом. Изображением постоянного напряжения $2U_{п}$ является функция $2U_{п}/p$.

Изображения напряжения на сопротивлении z_2 для расчетных схем будут иметь вид:

для схемы с емкостью

$$U(p) = \frac{2U_{п}}{p} \frac{\frac{z_2 \cdot 1/pC}{z_2 + 1/pC}}{z_1 + \frac{z_2 \cdot 1/pC}{z_2 + 1/pC}} = 2U_{п} \frac{1}{z_1 C} \frac{1}{p \left(p + \frac{z_1 z_2}{C z_1 z_2} \right)};$$

для схемы с индуктивностью

$$U(p) = \frac{2U_{\Pi}}{p} \frac{z_2}{z_1 + z_2 + pL} = 2U_{\Pi} \frac{z_1}{L} \frac{1}{p \left(p + \frac{z_1 + z_2}{L} \right)}$$

Переходя к оригиналам $\left(\frac{\alpha}{p(p + \alpha)} \doteq 1 - e^{-\alpha t} \right)$, получим преломленную волну для обоих случаев:

$$u_2(t) = U_{\Pi} \frac{2z_2}{z_1 + z_2} (1 - e^{-t/T}) = U_{\Pi} \alpha (1 - e^{-t/T}), \quad (8.6)$$

где постоянная T для схемы с емкостью равна $T_C = Cz_1 z_2 / (z_1 + z_2)$; для схемы с индуктивностью $T_L = L / (z_1 + z_2)$.

Как видно из выражения (8.6), емкость C или индуктивность L сглаживает фронт проходящей волны в соответствии с постоянной времени T (форма преломленной волны на отходящих линиях показана на рис. 8.2, а); амплитуда преломленной волны при этом остается без изменения.

Из выражения (8.6) следует, что через время $t = T$ напряжение на шинах п/ст достигает $0,63 U_{\Pi} \alpha$. Оценим возможные значения T для реальных случаев.

Емкость шин п/ст при отсутствии специально включенных конденсаторов обычно составляет $(1-5) 10^{-3}$ мкФ. Тогда для тупиковых п/ст с воздушной линией $T_C = (1-5) 10^{-3} \cdot 500 = (0,5-2,5)$ мкс, в случае кабельной линии T_C будет в десятки раз меньше. При наличии отходящих линий T_C уменьшается по мере увеличения их числа (для проходной п/ст, когда $z_1 = z_2$, — вдвое).

Индуктивность реакторов, включаемых между линией и шиной п/ст, составляет обычно 2—5 мГн. Тогда для проходной п/ст с воздушными линиями $T_L = \frac{(2-5) 10^3}{1000} = (2-5)$ мкс; в случае кабельных линий T_L возрастает в десятки раз, т. е. до 20—100 мкс. Для тупиковых п/ст, когда $z_2 = \infty$, $T_L = 0$, т. е. никакого сглаживающего эффекта на фронт волны реактор оказывать не будет.

Таким образом, емкость и индуктивность могут значительно уменьшить крутизну фронта преломленной волны. На п/ст с воздушными линиями особенно эффективно применение конденсаторов, на п/ст с кабельными линиями — реакторов.

Уменьшение крутизны волны перенапряжения крайне желательно, так как приводит, в частности, к снижению напряжения на продольной изоляции трансформаторов и электрических машин.

Крутизна преломленной волны с учетом влияния C или L может быть определена по выражению

$$a_{\max} = \left. \frac{du_2(t)}{dt} \right|_{t=0} = U_{\Pi} \alpha \frac{1}{T}$$

Подставив значения постоянной времени T , получим в случае емкости

$$a_{\max} = \frac{2U_{\Pi}}{z_1 C};$$

в случае индуктивности

$$a_{\max} = \frac{2U_{\Pi} z_2}{L}.$$

Определим значение a_{\max} для подстанции с $U_{\Pi} = 35$ кВ. Приняв $C = C_{\text{шин}} = (1 - 5) 10^{-3}$ мкФ и $U_{\Pi} = 300$ кВ (U_{Π} ограничено трубчатым разрядником на подходе), получим в случае падения волны по воздушной линии

$$a_{\max} = \frac{2 \cdot 300}{400 (1 - 5) 10^{-3}} = (0,3 - 1,5) 10^3 \text{ кВ/мкс, или } 1 - 5 \text{ кВ/м.}$$

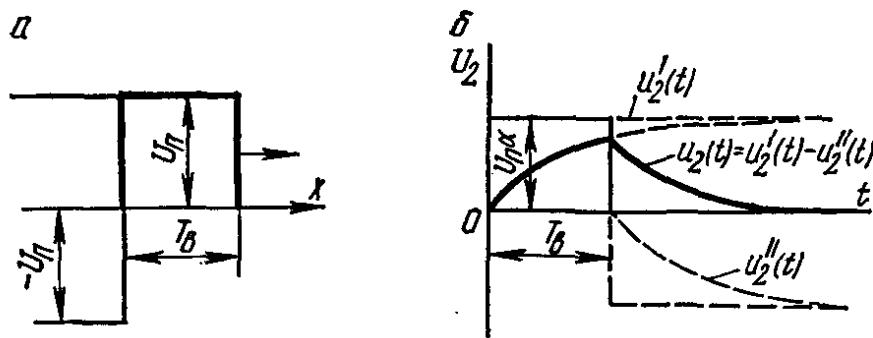


Рис. 8.3. Прохождение волны конечной длины мимо емкости или через индуктивность.

По нормам при $U_{\Pi} = 35$ кВ расчетная крутизна волны на шинах п/ст составляет 0,5 кВ/м. Таким образом, емкость шин не обеспечивает снижения крутизны волны до требуемого значения, и необходимо принять дополнительные меры.

Падающая волна **конечной** длины может быть представлена наложением двух бесконечных волн различного знака, сдвинутых на расстояние T_b (рис. 8.3, а). Соответственно и преломленная волна будет определяться суммой составляющих, вычисленных для бесконечных волн (рис. 8.3, б). Максимум преломленной волны наступает при $t = T_b$, т. е.

$$U_{2\max} = U_{\Pi} \alpha (1 - e^{-T_b/T}).$$

Из этого выражения следует, что емкость или индуктивность может заметно снизить амплитуду преломленной волны в том случае, если длина волны T_b значительно меньше постоянной времени T . В этом случае

$$1 - e^{-T_b/T} \approx 1 - T_b/T;$$

$$U_{2\max} \approx U_{\Pi} \alpha (1 - T_b/T).$$

Найденные выше численные значения T показывают, что используемые практически на п/ст емкости и индуктивности могут значительно снизить амплитуды не только коротких срезанных волн ($T_b = 2 - 3$ мкс), но в ряде случаев и амплитуды полных волн ($T_b = 50$ мкс).

8.4. ПАДЕНИЕ ВОЛН НА КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР

На практике часто встречаются случаи падения волн на колебательный контур, который может быть образован, например, индуктивностью L реактора или шин и емкостью C шин подстанции (рис. 8.4, а).

При рассмотрении процесса будем считать, что волновое сопротивление $z \ll \sqrt{L/C}$. В этом случае можно пренебречь падением напряжения в волновом сопротивлении и считать, что напряжение

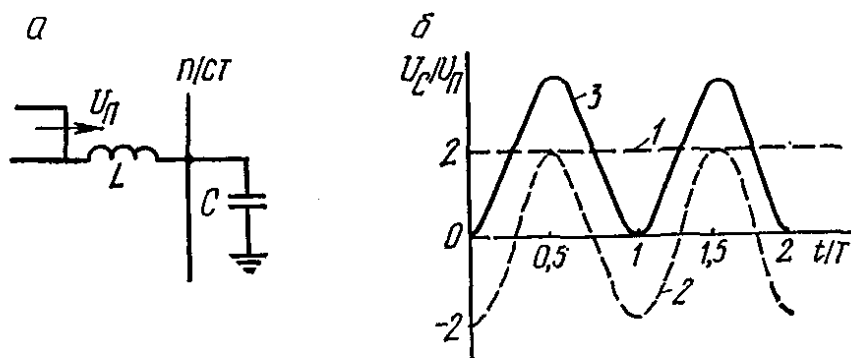


Рис. 8.4. Падение волны на колебательный контур.

$2U_{\Pi}$ (в схеме замещения по правилу Петерсена) приложено непосредственно к контуру LC . Тогда напряжение на емкость C (шины п/ст) при воздействии прямоугольной волны U_{Π} бесконечной длины будет равно

$$U_C(p) = \frac{2U_{\Pi}}{p} \frac{1}{pL + 1/pC} \frac{1}{pC} = \frac{2U_{\Pi}}{LC} \frac{1}{p(p^2 + 1/LC)}$$

или

$$u_C(t) = 2U_{\Pi} (1 - \cos 2\pi t/T) = 2U_{\Pi} (1 - \cos \omega_0 t). \quad (8.7)$$

Как видно из выражения (8.7), напряжение на емкости является суммой постоянного напряжения $2U_{\Pi}$ (кривая 1 на рис. 8.4, б) и напряжения, изменяющегося с периодом $T = 2\pi\sqrt{LC}$ (кривая 2). Максимум напряжения на емкости, равный $4U_{\Pi}$ (кривая 3), наступает при $t/T = 0,5$. Крутизна напряжения достигает максимальной величины

$$a_{\max} = \left(\frac{du_{C1}}{dt} \right)_{\max} = 2U_{\Pi} \frac{1}{LC}$$

при $t/T = 0,25$; крутизна возрастает при уменьшении индуктивности L и емкости C контура.

Для прямоугольной волны конечной длины $T_{\text{в}} < T/2$, выполняя расчет приемом наложения двух бесконечных волн различной полярности, сдвинутых относительно друг друга на время $T_{\text{в}}$, получим

$$u_C(t) = 4U_{\Pi} \sin \pi \frac{T_{\text{в}}}{T} \sin \omega_0 (t - T_{\text{в}}).$$

Максимум напряжения на емкости наступит в момент времени $t = T_{\text{в}}/2$ и будет равен $4U_{\Pi} \sin \pi \frac{T_{\text{в}}}{T}$, т. е. он зависит от длины

Табл. 8.1. Расчетные формулы для преломленных волн $u_2(t)$ в схемах

Схема	Косоугольная волна $u_{\Pi}(t) = at$	Экспоненциальная волна $u_{\Pi}(t) = U_{\Pi}e^{-\alpha t} = U_{\Pi}e^{-t/T_B}$	Постоянные схемы
-------	---	---	------------------

Рис. 8.2, а $a \frac{2z_2}{z_1 + z_2} [t - T(1 - U_{\Pi} \frac{2z_2}{z_1 + z_2} \frac{T_B}{T_B - T} \times T_C = C \frac{z_1 z_2}{z_1 + z_2};$
 $-e^{-t/T})]$ $\times (e^{-t/T_B} - e^{-t/T})$ $T_L = L/(z_1 + z_2)$

Рис. 8.4, а $2a \left(t - \frac{\sin \omega_0 t}{\omega_0} \right)$ $2U_{\Pi} \frac{\omega_0^2}{\alpha^2 + \omega_0^2} \times$ $\omega_0 = 1/\sqrt{LC};$
 $\times \left(e^{-\alpha t} + \frac{\alpha}{\omega_0} \times$ $T = 2\pi \sqrt{LC}$
 $\times \sin \omega t - \cos \omega_0 t \right)$

волны T_B . При $T_B = T/2$ максимум напряжения равен $4U_{\Pi}$, при $T_B < T/2$ он меняется от 0 до $4U_{\Pi}$.

При воздействии на контур косоугольной волны $u_{\Pi}(t) = at$ напряжение $u_C(t)$ будет равно

$$u_C(t) = 2a \left(t - \frac{\sin \omega t}{\omega} \right) = 2a \left(t - \frac{\sin 2\pi \frac{t}{T}}{2\pi/T} \right). \quad (8.8)$$

При воздействии косоугольной волны с длиной фронта T_{Φ} напряжение $u_C(t)$ находится для времени $t < T_{\Phi}$ по выражению (8.8), а для $t > T_{\Phi}$ будет равно разности составляющих (8.8), сдвинутых на отрезок T_{Φ} :

$$u_C(t) = 2U_{\Pi} \left[1 - \frac{\sin \pi \frac{T_{\Phi}}{T}}{\pi T_{\Phi}/T} \cos \omega (t - T_{\Phi}/2) \right].$$

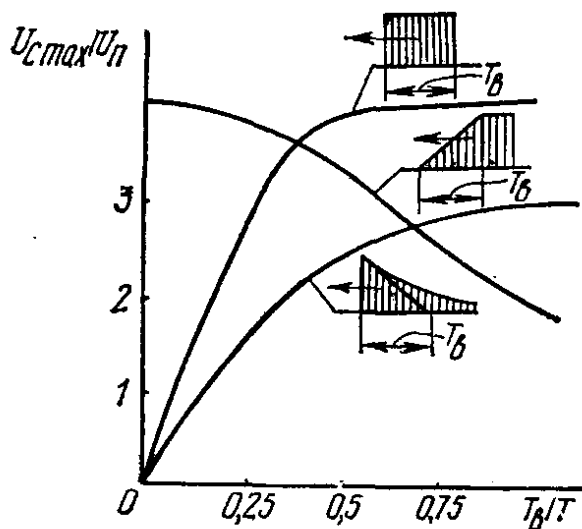


Рис. 8.5. Кривые максимальных напряжений на емкости при различных формах набегающих на колебательный контур волн.

Напряжение $u_C(t)$ достигает максимума при $\omega (t - T_{\Phi}/2) = \pi$ и выражается формулой

$$U_{C\max} = 2U_{\Pi} \left(1 + \frac{\sin \pi \frac{T_{\Phi}}{T}}{\pi T_{\Phi}/T} \right). \quad (8.9)$$

Из формулы (8.9) видно, что $U_{C\max}$ достигает $4U_{\Pi}$ при $T_{\Phi} = 0$ (случай воздействия прямоугольной волны). Величина $U_{C\max}$ снижается при увеличении T_{Φ} и уменьшении периода собственных колебаний контура $T = 2\pi/\omega = 2\pi \sqrt{LC}$.

Зависимости максимального напряжения на емкости от длины волны T_B при воздействии на колебательный контур прямоугольной, косоугольной и экспоненциальной волн показаны на рис. 8.5. В табл. 8.1 приведены формулы для определения преломленных волн в типовых схемах.

8.5. МНОГОКРАТНЫЕ ОТРАЖЕНИЯ

В ряде практических случаев (при прохождении волн через короткие отрезки линий) происходят отражения волн от обоих концов, в результате чего отраженные волны многократно накладываются.

Рассмотрим, например, переход прямоугольной волны бесконечной длины с линии 1, обладающей волновым сопротивлением z_1 , на линию 2 с волновым сопротивлением z_2 через короткий участок линии l , волновое сопротивление которого z_0 (рис. 8.6, а); длины линий 1 и 2 значительно больше l , и их можно считать бесконечно длинными. Коэффициенты преломления α и отражения β обозначены двойными индексами: первая цифра указывает, с какой линии приходит волна, вторая — на какую она падает. Искать будем преломленную волну на линии 2.

Поставленная задача легче всего решается графически, например методом характеристической сетки. Для этого в системе координат (x, t) путь, пройденный волной, будем откладывать по оси абсцисс, время пробега t — вниз по оси ординат (рис. 8.6, б).

Волна $U_{п}$ в момент $t=0$ падает на узел А и преломляется в линию z_0 с амплитудой $U_{п}\alpha_{10}$, волна $U_{п}\beta_{10}$ отражается в линию 1 и в дальнейшем не учитывается. В момент $\tau=l/v$ волна $U_{п}\alpha_{10}$ достигает узла В, преломляется в линию 2 с амплитудой $U_{п}\alpha_{10}\alpha_{02}$ и в дальнейшем не учитывается. Волна, отраженная от узла В, имеет амплитуду $U_{п}\alpha_{10}\beta_{02}$ и достигает узла А справа в момент времени $2\tau=2l/v$ и т. п.

Рассуждая подобным образом, мы получим сетку линий, на которой будут известны амплитуда, время подхода волны к узлам и ее знак (определяемый знаком коэффициентов β). По мере увеличения числа отражения амплитуды волн, приходящих в узел В, снижаются, так как их величина определяется произведением коэффициентов β , которые всегда меньше единицы, результирующее напряжение в узле В при этом будет зависеть от соотношения сопротивлений линий z_1 и z_2 .

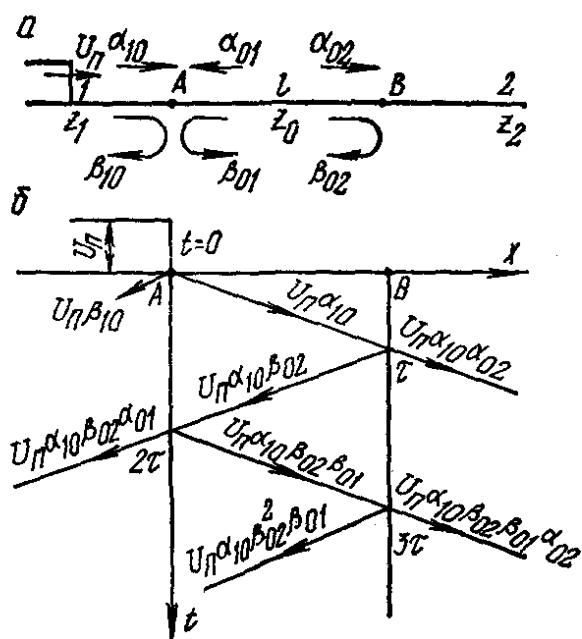


Рис. 8.6. Многократные отражения.

Напряжение в точке B после n отражений представляет сумму n преломленных волн, т. е. выражается рядом

$$U_{Bn} = U_{\Pi} \alpha_{10} \alpha_{02} + U_{\Pi} \alpha_{10} \beta_{02} \beta_{01} \alpha_{02} + \\ + U_{\Pi} \alpha_{10} \beta_{02}^2 \beta_{01}^2 \alpha_{02} + \dots + U_{\Pi} \alpha_{10} \beta_{02}^{n-1} \beta_{01}^{n-1} \alpha_{02}$$

или

$$U_{Bn} = U_{\Pi} \alpha_{10} \alpha_{02} [1 + \beta_{01} \beta_{02} + (\beta_{01} \beta_{02})^2 + \dots + (\beta_{01} \beta_{02})^{n-1}],$$

каждый последующий член которого вступает в действие через время $2\tau = 2l/v$ после предыдущего. Сумма членов этого ряда, который представляет геометрическую прогрессию со знаменателем $\beta_{01} \beta_{02} < 1$, в пределе при бесконечно большом числе отражений стремится к величине

$$U_{B\infty} = U_{\Pi} \alpha_{10} \alpha_{02} \frac{1}{1 - \beta_{01} \beta_{02}}.$$

Подставив вместо коэффициентов преломления и отражения их выражения через волновые сопротивления, можно показать, что

$$U_{B\infty} = U_{\Pi} \frac{2z_2}{z_1 + z_2} = U_{\Pi} \alpha.$$

Следовательно, после бесконечного числа отражений напряжение в точке B получается таким же, как и при непосредственном переходе волны с линии 1 на линию 2, влияние короткого участка сказывается только во время переходного процесса.

Характер переходного процесса определяется соотношением между волновыми сопротивлениями.

Если $z_1 > z_0 < z_2$ (кабельная вставка между воздушными линиями), оба коэффициента отражения β положительны. Поэтому ряд

U_{Bn} состоит из положительных членов, и установившееся напряжение в точке B достигается путем постепенного ступенчатого роста (рис. 8.7, a). В случае $z_1 < z_0 > z_2$ (участок воздушной линии между кабельными) оба коэффициента отражения β отрицательны, но их произведение положительно и ряд U_{Bn}

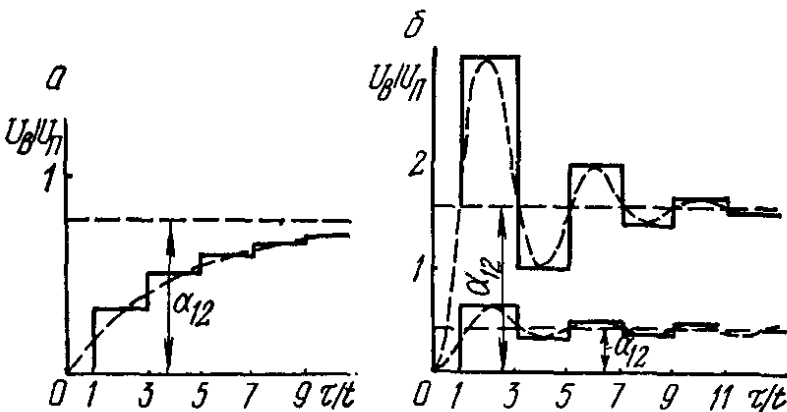


Рис. 8.7. Изменения напряжения в узле B при многократных отражениях.

также состоит только из положительных членов. Характер изменения напряжения в точке B остается таким же, как и в предыдущем случае.

Из рис. 8.7, a нетрудно установить, что при малой величине z_0 переходный процесс аналогичен случаю движения волны мимо

емкости, а при большей величине z_0 — переходу волны через индуктивность. Действительно, если $z_0 = \sqrt{L_0/C_0}$ значительно меньше z_1 и z_2 , то участок z_0 имеет емкость C_0 , увеличенную и индуктивность L_0 , уменьшенную на единицу длины, т. е. такой участок можно заменить сосредоточенной емкостью $C = C_0 l = l/z_0 v = \tau/z_0$. Если z_0 значительно больше z_1 и z_2 , то второстепенное значение имеет емкость участка, и его можно заменить индуктивностью $L = L_0 l = l z_0 / v = \tau z_0$. Такая замена короткого участка линии емкостью или индуктивностью (рис. 8.8, а, б) часто применяется для облегчения расчетов.

Если волновое сопротивление участка больше одного из волновых сопротивлений z_1 и z_2 , но меньше другого, то один из коэффициентов отражения β отрицательный, а другой — положительный, поэтому ряд U_{Bn} будет знакопеременным и напряжение в точке B стремится к своему установившемуся значению путем колебаний (рис. 8.7, б). В этом случае участок линии z_0 может быть заменен схемой с сосредоточенными параметрами в виде колебательного контура.

Действительно, при $z_1 > z_0 > z_2$ основное влияние по отношению к линии z_1 должна иметь емкость участка z_0 , а по отношению к линии z_2 — его индуктивность. Соответственно при $z_1 < z_0 < z_2$ участок z_0 выступает по отношению к линии z_1 как индуктивность, а по отношению к линии z_2 — как емкость. Схемы замещения для этих случаев должны иметь вид, изображенный на рис. 8.8, в и г. Значения L_3 и C_3 находят из условия, что колебательный контур правильно отражает процессы на участке линии, т. е. должны быть соблюдены равенство периодов собственных колебаний контура и линии, а также равенство амплитуд токов. Это дает:

$$L_3 = \frac{\sqrt{2} L}{\pi}; \quad C_3 = \frac{\sqrt{2} C}{2\pi},$$

где L , C — индуктивность и емкость замещаемого отрезка линии.

8.6. ЗАТУХАНИЕ И ИСКАЖЕНИЕ ВОЛН

Распространение электромагнитных волн напряжений в реальных линиях всегда сопровождается их искажением и затуханием. Основными причинами этого являются необратимые тепловые потери, вызванные протеканием тока волны по проводникам с активным сопротивлением, и явления, обусловленные наличием

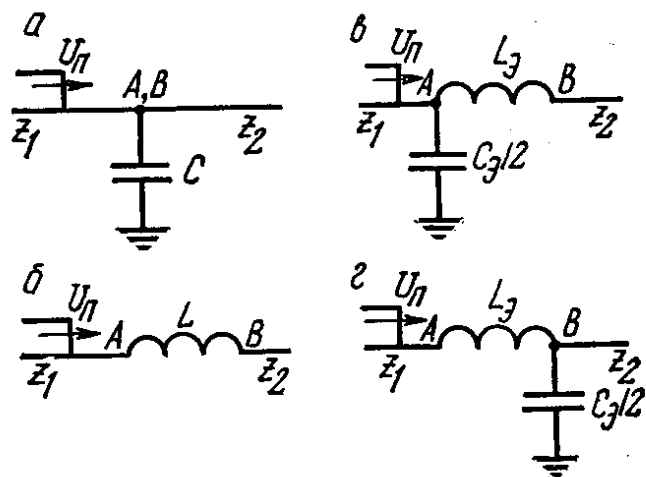


Рис. 8.8. Схемы замещения с сосредоточенными параметрами для схемы рис. 8.6, а.

импульсной короны. Наиболее значительное искажение и затухание волны происходит под влиянием импульсной короны. Амплитуды волн перенапряжений на проводах ВЛ всегда значительно превышают напряжение возникновения короны U_k , приблизительно равное номинальному напряжению, поэтому распространение таких волн всегда сопровождается интенсивной короной. Область ионизации такой короны, получившей название **импульсной**, распространяется вместе с волной по проводам ВЛ; после прохождения волны импульсная корона распадается и оставшиеся заряды нейтрализуются. Процессы ионизации сопровождаются необратимыми потерями энергии волны и уменьшением скорости распространения ее отдельных участков, что и является причиной затухания и искажения волны.

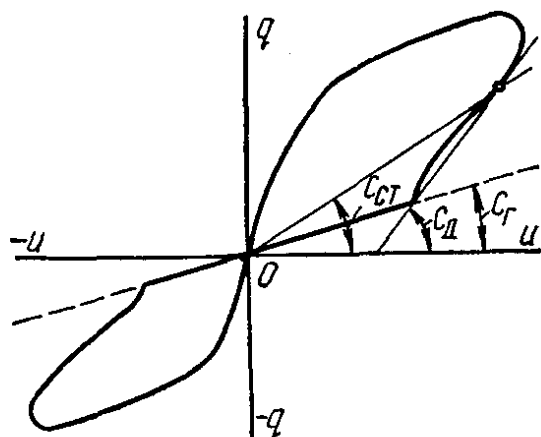


Рис. 8.9. Вольт-кулоновая характеристика импульсной короны.

Импульсная корона, как и корона переменного тока, имеет стримерную структуру. Плотность тока отдельных стримеров, пропорциональная крутизне напряжения волны, оказывается на несколько порядков выше, чем при напряжении промышленной частоты.

Вследствие стримерной структуры чехла короны исключена возможность прохождения тока в осевом направлении (отдельные стримеры не соприкасаются друг с другом), поэтому продольный ток линии проходит только по проводам, т. е. корона не оказывает влияния на индуктивность линии. Емкость же линии благодаря наличию радиальной проводимости короны возрастает.

На рис. 8.9 приведена зависимость заряда коронирующей линии от напряжения (вольт-кулоновая характеристика). Наклон прямой, соответствующей заряду при напряжении ниже U_k , пропорционален геометрической емкости C_g . При наличии короны вводят понятия статической емкости $C_{ст} = q/u$ и динамической емкости $C_{д} = dq/du$, наклон соответствующих прямых показан на рисунке.

Если представить чехол короны в виде проводящего цилиндра с радиусом r_k , то удельная емкость $C'_{ст}$ и средняя напряженность на поверхности чехла короны $e_{ср}$ будут соответственно равны:

Если представить чехол короны в виде проводящего цилиндра с радиусом r_k , то удельная емкость $C'_{ст}$ и средняя напряженность на поверхности чехла короны $e_{ср}$ будут соответственно равны:

$$C'_{ст} = 2\pi\epsilon\epsilon_0 \frac{1}{\ln 2h/r_k}; \quad (8.10)$$

$$e_{ср} = \frac{u}{r_k \ln 2h/r_k}. \quad (8.11)$$

Тогда удельная динамическая емкость

$$C'_{д} = \frac{d(C'_{ст} u)}{du} = 2\pi\epsilon\epsilon_0 \frac{d(e_{ср} r_k)}{d(e_{ср} r_k \ln 2h/r_k)} = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{(\ln 2h/r_k) - 1}. \quad (8.12)$$

Анализ вольт-кулоновых характеристик для различных проводов позволяет по значению $C'_{ст}$ определить из формулы (8.10) значение r_k , а затем из формулы (8.11) — $e_{ср}$ для различных значений u . При этом оказывается, что величина $e_{ср}$ является практически неизменной, зависящей только от полярности волны. Для положительной полярности принимают $e_{ср} = E_{ср} = 9$ кВ/см и для отрицательной 21 кВ/см. Постоянство $e_{ср}$ дает возможность находить r_k и $C'_д$ для любых геометрических размеров линии по выражениям (8.11) и (8.12), не прибегая к построению вольт-кулоновых характеристик.

В качестве расчетной берется обычно отрицательная полярность; так как при ударах молнии возникают преимущественно волны отрицательной полярности, кроме того, положительная корона более интенсивная, чем отрицательная, и вызывает, следовательно, большие затухания опасных перенапряжений.

Так как при наличии короны все остальные источники потерь незначительны, то в дифференциальных уравнениях длинной линии можно пренебречь активным сопротивлением r_0 и проводимостью g_0 , и они будут иметь вид (8.2), только вместо емкости C_0 фигурирует динамическая емкость $C'_д$.

Решения такой системы уравнений также имеют вид (8.1), где скорость волны

$$v_k = 1/\sqrt{L_0 C'_д}.$$

В отличие от линий без потерь в коронирующей линии скорость волны v_k не является величиной постоянной, а зависит от напряжения u . Именно это обстоятельство и вызывает деформацию волны.

Чтобы проанализировать механизм этой деформации, условно разобьем движущуюся волну на элементарные волны (полоски) Δu (рис. 8.10). Каждая из этих полосок будет распространяться по линии со своей скоростью v_{ki} , определяемой напряжением u_i и соответствующим значением $C'_д = f(u)$.

Так как с ростом напряжения скорость v_k уменьшается, то по мере продвижения волны вдоль линии при $u > U_k$ верхние полоски будут отставать от нижних, что и вызывает показанную на рис. 8.10 деформацию фронта волны.

Время Δt , на которое «запаздывает» участок фронта волны с напряжением u , после пробега пути 1 км равно

$$\Delta t = \frac{1}{v_k} - \frac{1}{c} = \frac{1}{c} \frac{1 - \beta}{\beta}, \quad (8.13)$$

где

$$\beta = v/c = \sqrt{L_0 C_0} / \sqrt{L_0 C'_д} = \sqrt{C'_г / C'_д}.$$

Значение β может быть определено по приближенной формуле, полученной совместным решением выражений (8.10) — (8.12):

$$\beta \approx 1,16 \sqrt{\frac{\lg 1,5hE_{cp}/u}{\lg 2h/r}}, \quad (8.14)$$

где h , r — высота подвеса и радиус провода, см; u — мгновенное значение напряжения волны, кВ; $E_{cp} = 21$ кВ/см (для отрицательной полярности волны).

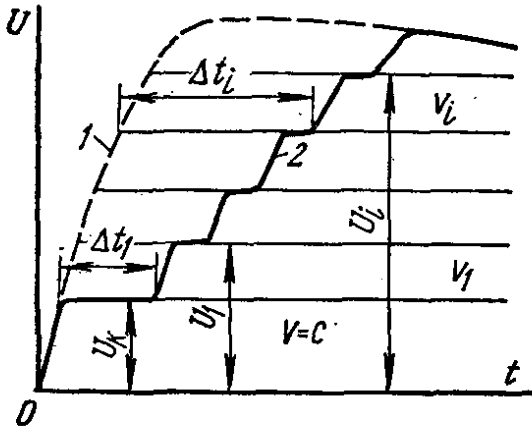


Рис. 8.10. Деформация волны в коронирующей линии:
1 — волна в начале линии; 2 — волна после пробега пути l .

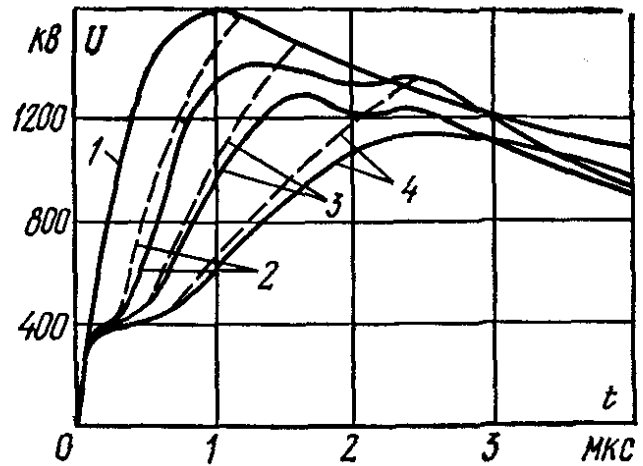


Рис. 8.11. Деформация импульсной волны под действием короны ($r = 0,25$ см, $h = 12$ м):
1 — начальная волна; 2, 3, 4 — после пробега соответственно 660, 1300 и 2200 м.

На рис. 8.11 приведены осциллограммы волн, полученные опытным путем на реальной линии (сплошные кривые), и расчетный фронт этих волн, полученный смещением исходного фронта на величину Δt (пунктирные линии); построение продолжалось до пересечения нового фронта со спадом исходной волны. Из кривых рис. 8.11 видно, что под действием короны происходит не только деформация фронта, но и уменьшение амплитуды (затухание) волны.

Смещение фронта волны после пробега $l \geq 1$ км может превышать 1 мкс, что в ряде случаев является весьма существенным и приводит к соответствующему уменьшению крутизны волны, и поэтому учитывается в схемах защиты электрооборудования от набегающих волн. При пробегах 100—200 м смещение фронта не превышает 0,1—0,2 мкс, деформация фронта волны при этом незначительная, и можно считать, что потери на корону в линии отсутствуют.

8.7. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН В МНОГОПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ

При отсутствии потерь волны на всех проводах многопроводной системы распространяются с одинаковой скоростью и являются плоскими, т. е. не имеют составляющих векторов E и H , направленных вдоль оси провода. Поэтому при распространении волны по одному из проводов в соседних изолированных параллельных про-

Рассмотрим несколько практически важных примеров применения уравнений (8.16).

1. Провод 1 включается под напряжением u_1 . Определить напряжение, возникающее на разомкнутой изолированной от земли линии 2 (рис. 8.13, а).

Ток разомкнутой линии равен нулю, поэтому система уравнений (8.16) запишется в виде $u_1 = z_{11}i_1$ и $u_2 = z_{21}i_1$, откуда $u_2 = u_1 z_{21}/z_{11} = u_1 k_{21}$.

Коэффициент $k_{21} = z_{21}/z_{11}$ называется **геометрическим коэффициентом связи** между проводами 2 и 1; он показывает отношение напряжения на изолированном проводе 2 к напряжению индуктирующей волны на проводе 1. Коэффициент связи тем больше, чем меньше расстояние между проводами (при этом возрастает взаимное волновое сопротивление z_{21}), и для линий электропередачи значения k лежат обычно в пределах 0,2—0,3.

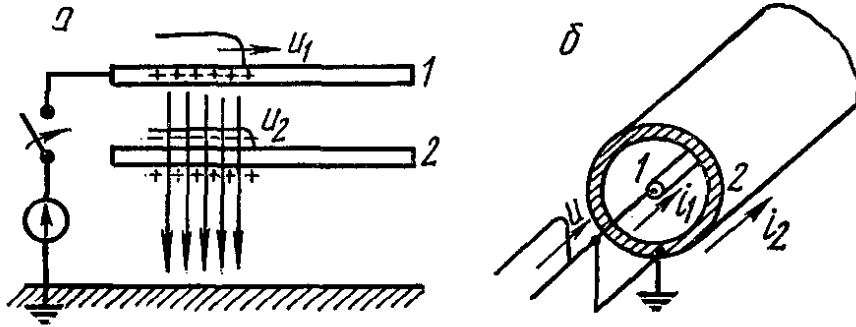


Рис. 8.13. Расчет распространения волн:
а — на изолированном проводе; б — вдоль жилы и оболочки кабеля.

Коэффициент связи определяет разность потенциалов между проводами, т. е. напряжение u_{12} , приходящееся на изоляцию ВЛ:

$$u_{12} = u_1 - u_2 = u_1(1 - k_{12}). \quad (8.17)$$

Из выражения (8.17) видно, что с точки зрения облегчения условий работы изоляции ВЛ желательно иметь большие значения коэффициентов связи.

2. Волна u (рис. 8.13, б) распространяется по соединенным вместе жиле 1 и оболочке 2 кабеля (это имеет место при срабатывании разрядников, установленных в начале кабельного участка). Определим токи i_1 и i_2 .

Ток i_2 , протекающий по оболочке кабеля, создает магнитный поток, охватывающий полностью и оболочку, и жилу кабеля. Потенциал оболочки, являющейся своего рода электростатической клеткой, полностью передается и жиле кабеля. Это означает, что собственное волновое сопротивление оболочки z_{22} равно взаимному волновому сопротивлению оболочки и жилы z_{21} , следовательно, коэффициент связи оболочки с жилой $k_{21} = z_{21}/z_{22} = 1$.

Магнитный поток, создаваемый током жилы i_1 , лишь частично связан с оболочкой, т. е. $z_{12} < z_{11}$. Так как напряжение волны на жиле и оболочке одинаково, то $u = i_1 z_{11} + i_2 z_{12} = i_1 z_{21} + i_2 z_{22}$. В этом выражении $z_{21} = z_{12} = z_{22}$. Следовательно, равенство сохраняется при условии $i_1 z_{11} = i_1 z_{21}$, но так как $z_{11} \neq z_{21}$, то равенство возможно лишь при $i_1 = 0$.

Таким образом, ток волны по жиле кабеля не протекает, а полностью вытесняется на оболочку.

Приведенные выше соотношения справедливы только для линий без потерь, в частности при отсутствии короны. При наличии короны коэффициент связи k между проводами изменится.

Принято различать изменения k в статическом режиме (при неподвижных зарядах на проводах) и при волновом процессе.

Учитывая, что $\alpha_{11} = \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln 2h_1 / r_k = 1/C_1$, коэффициент связи между проводами 1 и 2 при отсутствии короны можно записать как $k_r = z_{12}/z_{22} = \alpha_{12}/\alpha_{22} = C_{1r}/C_{12}$.

Если к проводу 1 приложено напряжение, превышающее критическое напряжение короны U_K , то емкость этого провода возрастает до $C_{ст}$ (см. рис. 8.9), и коэффициент связи при этом будет равен $k_{ст} = C_{1ст}/C_{12} = k_r C_{1ст}/C_{1r}$, т. е. коэффициент связи возрастает пропорционально увеличению статической емкости. Результаты измерения отношения $k_{ст}/k_r$ на коротких отрезках проводов показали, что эта величина может достигать 2—3.

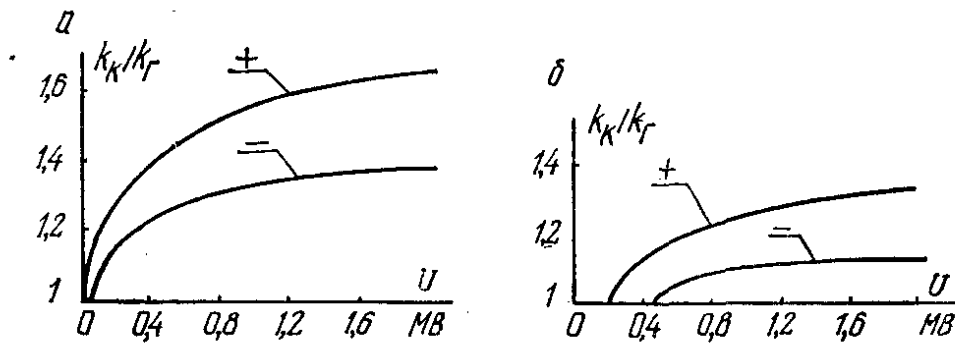


Рис. 8.14. Коэффициенты связи при наличии короны:
а — $h=10$ м, $r=2$ мм; б — $h=20$ м, $r=20$ мм.

При волновом режиме необходимо учитывать разницу скоростей электромагнитных волн при наличии короны и без нее. Если волна напряжения в коронирующем проводе 1 пройдет путь $v_K t$, то в изолированном проводе 2 на том же участке происходит разделение зарядов. При этом заряды противоположного знака также пройдут путь $v_K t$, а заряды одноименного знака будут свободны и, распространяясь со скоростью c , пройдут путь ct . Эти заряды и создают наведенное напряжение, равное $k_{ст} U_1 v/c = U_1 k_K$. Таким образом, коэффициент связи при наличии короны в волновом процессе k_K будет меньше $k_{ст}$ в v/c раз.

Представление о количественном влиянии короны на коэффициент связи в волновом режиме дает рис. 8.14. Из этого рисунка видно, что отношение k_K/k_r лежит в пределах 1,1—1,6 и оно возрастает с уменьшением высоты подвеса h провода и его радиуса r (эти факторы облегчают возникновение короны) и всегда больше (при прочих равных условиях) для положительной полярности волны.

Приближенное значение k_K может быть определено по выражению $k_K = k_r/\beta$, где k_r — коэффициент связи, определенный по геометрическим размерам линии; β — коэффициент, вычисленный по формуле (8.14).

Влияние потерь волны в активных сопротивлениях проводов и земли не учитывают, так как оно незначительно по сравнению с влиянием импульсной короны.

8.8. ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

8.8.1. Переходные процессы в обмотках однофазного трансформатора при воздействии грозовых импульсов

В трансформаторе при падении на обмотку импульсной волны возникают сложные электромагнитные волновые процессы, которые приводят к быстро меняющимся перенапряжениям на элементах главной и продольной изоляции. Точный расчет этих процессов

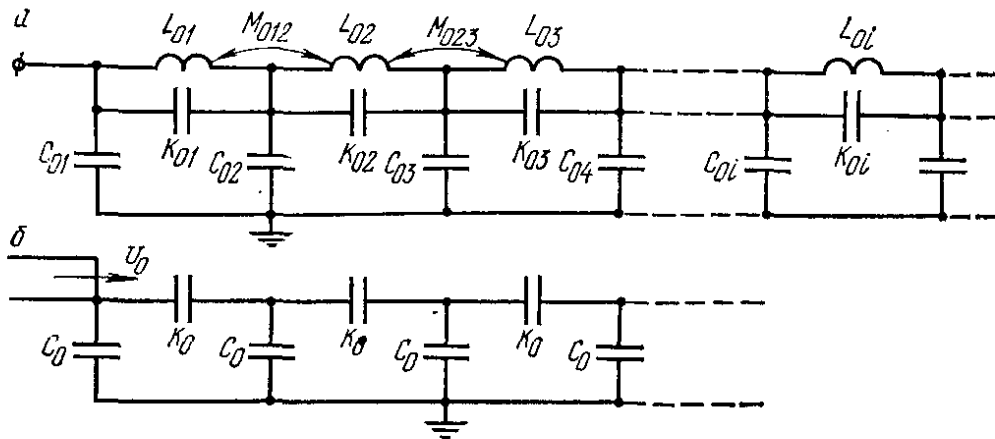


Рис. 8.15. Эквивалентные схемы замещения обмотки трансформатора.

практически невозможен вследствие взаимного влияния многих элементов — распределенных продольных и поперечных емкостей обмоток, собственных и взаимных индуктивностей витков и обмоток и т. д. Поэтому рассмотрим эти процессы в простейшем общепринятом приближении, которое, однако, позволяет выявить основные закономерности и дать конкретные рекомендации по рациональному конструированию обмотки и изоляции.

Приближенную схему замещения обмотки однофазного трансформатора можно представить в виде цепочки элементов (параметров L_{0i} , M_{0ik} , C_{0i} , K_{0i}), отнесенных к единичным виткам или к единице длины обмотки (рис. 8.15, а). При воздействии на обмотку волн с весьма крутым фронтом (в пределе прямоугольным) в начальной стадии процесса можно пренебречь проводимостями собственных L_0 и взаимных M_0 индуктивностей и считать, что распределение напряжения вдоль обмотки зависит только от величин распределенных продольных емкостей K_0 и емкостей относительно земли C_0 , которые для реальных трансформаторов остаются практически неизменными вдоль обмотки (рис. 8.15, б).

Заряд на продольной емкости элемента длины обмотки

$$Q = \frac{K_0}{dx} du = K_0 \frac{du}{dx}. \quad (8.18)$$

Изменение этого заряда:

$$dQ = uC_0 dx; \quad \frac{dQ}{dx} = C_0 u.$$

Дифференцируя выражение (8.18) по x , после простых преобразований получим, что расчет чисто емкостной схемы (см. рис. 8.15, б) сводится к решению дифференциального уравнения для напряжения u относительно земли:

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - \frac{C_0}{K_0} u = 0.$$

Общее решение этого уравнения записывается в виде

$$u = A_1 e^{\alpha x} + A_2 e^{-\alpha x},$$

где

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_0}{K_0}}.$$

Постоянные интегрирования находятся из граничных условий, зависящих от режима нейтрали трансформатора.

Напряжение на заземленной нейтрали равно нулю, т. е. при $x=l$ (l — длина обмотки) $u=0$.

Для изолированной нейтрали в конце обмотки ($x=l$) $\frac{du}{dx} = 0$.

В начале обмотки ($x=0$) в том и другом случае $u = U_0$. С учетом граничных условий получаем следующие выражения для начального распределения напряжения вдоль обмотки трансформатора:

при заземлении нейтрали

$$u = U_0 \frac{e^{\alpha(l-x)} - e^{-\alpha(l-x)}}{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}} = U_0 \frac{\text{sh } \alpha l \left(1 - \frac{x}{l}\right)}{\text{sh } \alpha l};$$

при изолировании нейтрали

$$u = U_0 \frac{e^{\alpha(l-x)} + e^{-\alpha(l-x)}}{e^{\alpha l} + e^{-\alpha l}} = U_0 \frac{\text{ch } \alpha l \left(1 - \frac{x}{l}\right)}{\text{ch } \alpha l}.$$

Параметр

$$\alpha l = \sqrt{\frac{C_0}{K_0}} l = \sqrt{\frac{C_0 l}{K_0 / l}} = \sqrt{\frac{C_{об}}{K_{об}}}$$

определяется соотношением суммарной емкости обмотки относительно земли $C_{об}$ к суммарной продольной емкости обмотки $K_{об}$.

Для современных трансформаторов $\alpha l \approx 5 - 30$. Поэтому $e^{\alpha l} \gg e^{-\alpha l}$, и для большей части обмотки $\left(\frac{x}{l} < 0,8\right) e^{\alpha(l-x)} \gg e^{-\alpha(l-x)}$. При таких условиях распределение напряжения вдоль обмоток с изолированной и заземленной нейтралью в первый момент практически одинаково:

$$U_{нач}(x) = U_0 e^{-\alpha l \frac{x}{l}}. \quad (8.19)$$

На рис. 8.16 показано начальное распределение напряжения по обмотке при $\alpha l = 10$ (кривые 1). В последующие моменты после падения волны в обмотке развивается колебательный переходный процесс, связанный с разрядом емкостей через индуктивности L и M . Спустя некоторое время переходный процесс закончится. Установившееся (конечное) распределение напряжения вдоль обмотки для системы с заземленной нейтралью определяется протеканием сквозного тока через активно-индуктивные элементы обмотки и при равномерном распределении этих пара-

метров будет линейным:

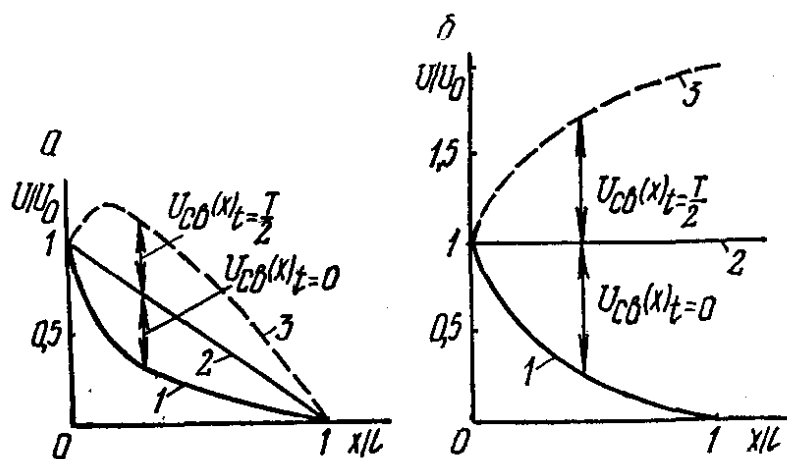


Рис. 8.16. Кривые распределения напряжения вдоль обмотки трансформатора с заземленной (а) и изолированной (б) нейтралью.

метров будет линейным:

$$U_{уст}(x) = U_0 \left(1 - \frac{x}{l} \right).$$

При изолированной нейтрали вся обмотка в установившемся режиме приобретает потенциал U_0 , т. е.

$$U_{уст}(x) = U_0.$$

Зная начальное и установившееся (кривые 2 на рис. 8.16) распределение напряжения, можно определить свободную составляющую напряжения переходного процесса в момент $t=0$:

$$U_{св}(x)_{t=0} = U_{нач}(x) - U_{уст}(x). \quad (8.20)$$

В любой последующий момент напряжение в каждой точке обмотки определяется выражением

$$u(x, t) = U_{уст}(x) + u_{св}(x, t).$$

Напряжение $u_{св}(x, t)$ складывается из суммы пространственных гармоник, которые колеблются во времени относительно своего нулевого значения:

$$u_{св}(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin \gamma_k x \cos \omega_k t.$$

Амплитуды этих гармоник A_k равны: при заземленной нейтрали

$$A_k = \frac{1}{k\pi} \frac{U_0}{1 + \frac{K_{об}}{C_{об}} (k\pi)^2};$$

при изолированной нейтрали

$$A_k = \frac{4}{(2k-1)\pi} \frac{U_0}{\left\{ 1 + \frac{K_{об}}{C_{об}} \left[\frac{(2k-1)\pi}{2} \right]^2 \right\}}$$

Пространственные частоты гармоник $\gamma_k = \frac{k\pi}{l}$ и $\gamma_k = \frac{(2k-1)\pi}{l}$ соответственно при заземленной и изолированной нейтрали.

Каждая пространственная гармоника колеблется с присущей ей частотой ω_k , увеличивающейся с ростом ее номера, и затухает во времени. Поэтому максимальные потенциалы в каждой точке обмотки достигаются неодновременно, что хорошо видно из кривых распределения напряжения вдоль обмотки для различных моментов времени (рис. 8.17).

Для примерной оценки максимально возможных потенциалов в каждой точке обмотки считают, что гармонические колебания не затухают и период колебаний T всех пространственных гармоник одинаков. При таком условии спустя время $T/2$ после падения волны, поскольку

$$U_{св}(x)_{t=T/2} = -U_{св}(x)_{t=0},$$

напряжения в каждой точке обмотки достигают своих максимальных значений:

$$\begin{aligned} U_{\max}(x) &= U(x)_{T/2} = U_{уст}(x) - U_{св}(x)_{t=0} = \\ &= 2U_{уст}(x) - U_{нач}(x). \end{aligned} \quad (8.21)$$

Кривые для $U_{\max}(x)$ (кривые 3 на рис. 8.16) называются огибающими максимальных потенциалов. Эти кривые примерно соответствуют непосредственным измерениям и показывают, что максимальные напряжения при изолированной нейтрали наблюдаются на конце обмотки и могут достигать величин $(1,8-2)U_0$. Поэтому ослабленная изоляция нейтрали (трансформаторы 110 кВ и выше) в этом случае должна быть защищена, например разрядником. Для трансформаторов с заземленной нейтралью максимальные напряжения до $(1,2-1,3)U_0$ наблюдаются вблизи начала обмотки. При конструировании главной изоляции трансформатора должны быть учтены эти повышения напряжения.

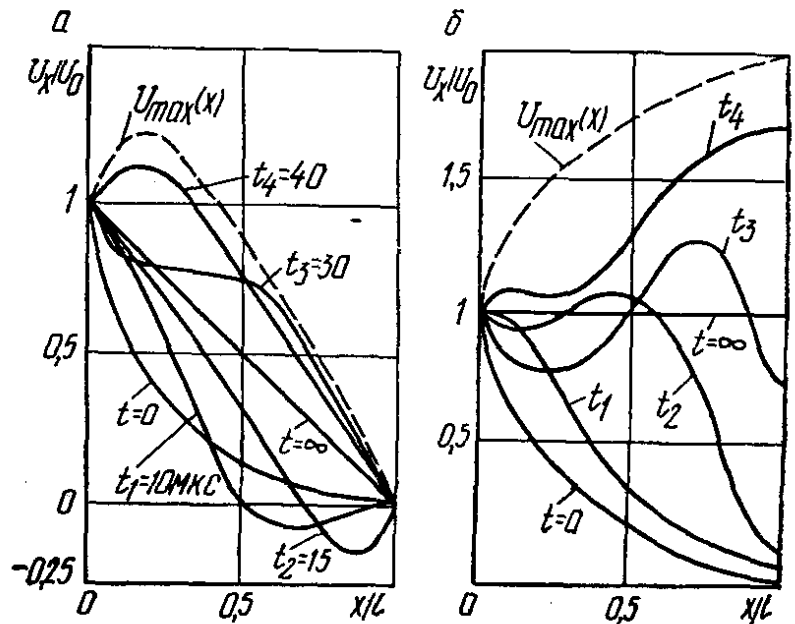


Рис. 8.17. Распределение напряжения вдоль обмотки трансформатора с заземленной (а) и изолированной (б) нейтралью в разные моменты времени.

Как следует из рис. 8.16, наибольшие напряжения в первый момент после падения волны в продольной изоляции наблюдаются на первых витках обмотки. Величину максимального градиента можно определить исходя из формулы (8.19):

$$\left| \frac{du}{dx} \right| = U_0 a e^{-al \frac{x}{l}} \quad \text{или} \quad \left| \frac{du}{dx} \right|_{\max} = U_0 a = \frac{U_0}{l} al.$$

Следовательно, максимальный градиент в al раз превышает напряженность U_0/l , которая наблюдалась бы при равномерном распределении напряжения вдоль обмотки. Поэтому изоляция витков и катушек в начале обмотки выполняется усиленной.

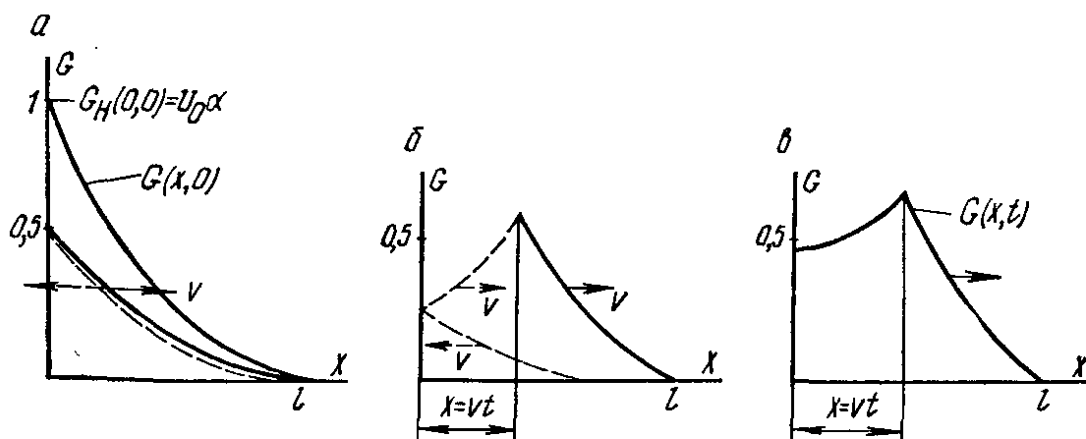


Рис. 8.18. Распределение градиентов в обмотке:

a — начало волнового процесса; *б* — прямая (сплошная линия) и обратная (пунктир) волны градиентов; *в* — действительное распределение градиентов в момент t .

Однако в течение переходного процесса высокие напряженности распространяются (правда, уменьшаясь) в глубь обмотки и практически наблюдаются в любой ее точке.

Распространение максимальных градиентов носит волновой характер. Приблизительно этот процесс решается с помощью построений, приведенных на рис. 8.18. Начальное распределение градиентов $G(x, 0)$ делится на две волны с половинной амплитудой, одна из которых (прямая) со скоростью $v \approx 150$ м/мкс движется к концу обмотки, вторая (обратная) с той же скоростью — к ее началу. Обе волны отражаются от начала и конца обмотки. Отражение от начала происходит с тем же знаком, отражение от конца зависит от режима заземления нейтрали: от заземленной — с тем же знаком, от изолированной — с противоположным. Действительный градиент в каждой точке обмотки $G(x, t)$ находится как сумма составляющих прямой и обратной волн (см. рис. 8.18). Распространение высоких градиентов в глубь обмотки также учитывается при выполнении продольной изоляции.

Падение на обмотку трансформатора волн с определенной конечной крутизной фронта приводит к появлению перенапряжений, величина которых быстро уменьшается при удлинении фронта волны. Мероприятия, направленные на снижение фронта волны, всегда облегчают условия выполнения и работы главной и особенно продольной изоляции трансформаторов и предусматриваются при за-

щите подстанции от набегающих волн атмосферных перенапряжений.

Большие градиенты в продольной изоляции возникают при воздействии срезанных волн. Срез волны может наблюдаться, например, при перекрытии наружной изоляции вблизи трансформатора (рис. 8.19, а). После среза возникает колебательный процесс, так как емкость C трансформатора и индуктивность L участка линии образуют колебательный контур. При этом происходит резкое изменение напряжения на величину, примерно в 1,6 раза превышающую напряжение в момент среза (рис. 8.19, б). Опытные исследова-

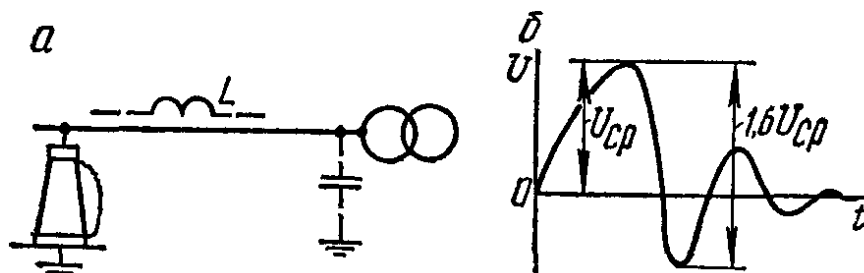


Рис. 8.19. Возникновение (а) и вид (б) срезанной волны на выводах трансформатора.

ования подтверждают, что при срезанных волнах в продольной изоляции возникают напряженности, значительно бóльшие, чем при полной волне. Поэтому испытания изоляции срезанной волной для силовых трансформаторов являются обязательными.

Обмотка трансформатора обладает широким спектром частот собственных колебаний, и при изменении частоты приложенного напряжения могут наблюдаться резонансные явления, а в некоторых точках обмотки — повышение напряжения до 2—3-кратной величины по отношению к приложенному напряжению.

Трудности, возникающие при необходимости точного определения возможных напряженностей в главной и продольной изоляции трансформаторов, решаются практически путем импульсных испытаний моделей трансформаторов с обмером возникающих при этом напряжений между отдельными элементами обмоток.

При расчетах волновых процессов на подстанциях и исследованиях схем грозозащиты подстанций на моделях трансформаторов часто заменяют сосредоточенной емкостью, которая называется **входной емкостью трансформатора**. Такая замена справедлива только в первые моменты по отношению к набегающей волне перенапряжения и позволяет оценить напряжения на выводах трансформатора, однако совершенно не отражает волновых процессов внутри обмоток. Величина входной емкости $C_{вх}$ связана с распределенными параметрами C_0 и K_0 соотношением

$$C_{вх} = \frac{Q_{x=0}}{U_0} = \frac{\left(K_0 \frac{du}{dx}\right)_{x=0}}{U_0} = \sqrt{C_0 K_0} = \sqrt{C_{об} K_{об}}.$$

В зависимости от мощности и номинального напряжения трансформатора $C_{вх}$ меняется в пределах 500—5000 пФ.

8.8.2. Особенности переходных процессов в трехфазных трансформаторах и автотрансформаторах

Переходные процессы в обмотках до сих пор рассматривались применительно к однофазному трансформатору. Все сказанное относится и к трехфазным трансформаторам с заземленной нейтралью, а также к трансформаторам с изолированной нейтралью при падении одинаковых волн на все три фазы одновременно.

При падении волны на одну фазу трехфазного трансформатора с изолированной нейтралью возникающие в течение переходного процесса перенапряжения на главной изоляции оказываются существенно сниженными. Свободные фазы *B* и *C* подключены к проводам линии и сохраняют потенциал, близкий к нулевому. Для простоты можно считать, что фазы *B* и *C* заземлены (рис. 8.20). Полные сопротивления фаз *B* и *C* соединяются параллельно, и получается однофазная схема с удлиненной неоднородной обмоткой, конец которой заземлен.

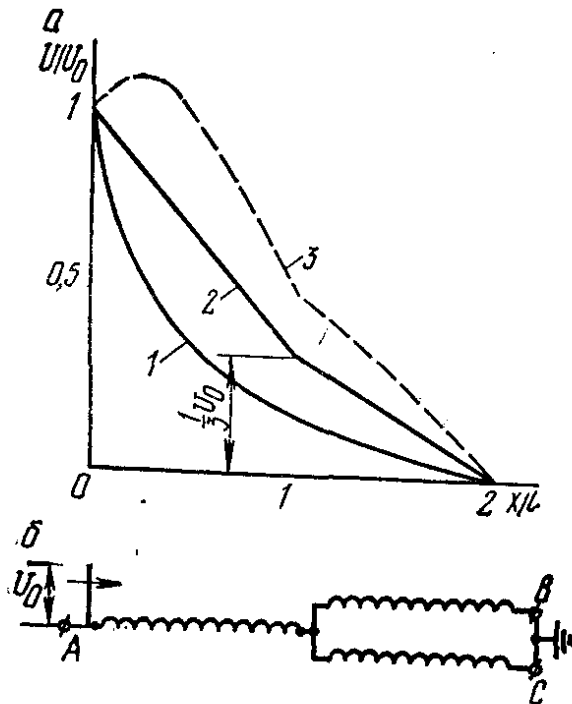


Рис. 8.20. Распределение напряжения (а) и схема падения волны (б) на одну фазу обмотки трехфазного трансформатора с изолированной нейтралью.

Напряжение в первый момент распределяется вдоль обмотки почти по закону $U_{нач}(x) \approx U_0 e^{-\alpha x}$ (кривая 1). Установившееся распределение напряжения $U_{уст}(x)$ (кривая 2) вследствие неодинакового сопротивления первой и второй половин эквивалентной обмотки претерпевает излом в точке $x = l$, и максимальный потенциал нейтрали в переходном режиме, как следует из кривой 3, не превышает $\frac{2}{3} U_0$.

В аналогичном случае при движении волны по двум фазам максимально возможное напряжение на нейтрали может достигнуть величины $1,3 U_0$.

Случай одновременного падения волны по всем трем фазам, как наиболее неблагоприятный, принимается в качестве расчетного, хотя практически он крайне редкий.

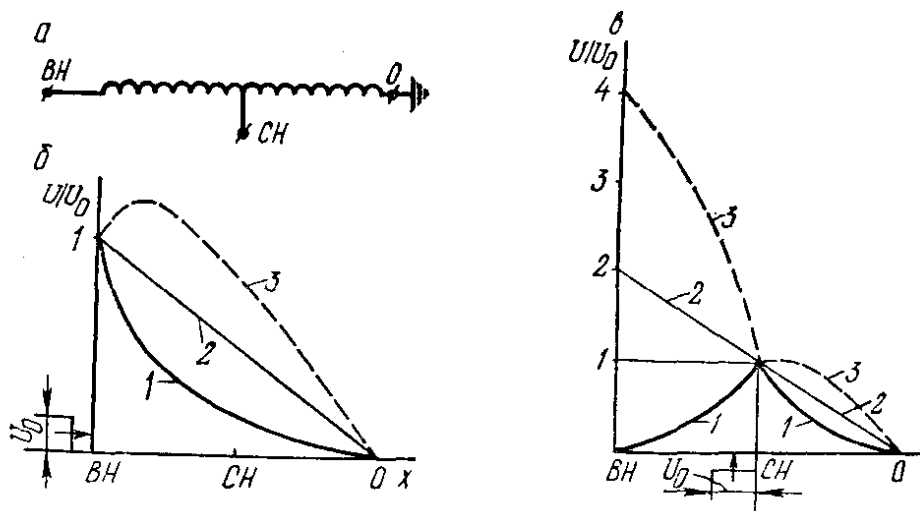


Рис. 8.21. Распределение напряжения в обмотке автотрансформатора:

1 — начальное распределение; 2 — конечное; 3 — огибающие максимальных потенциалов.

Падение волны перенапряжения по всем трем фазам одновременно на обмотку трансформатора, соединенную в треугольник, приводит к появлению максимальных напряжений до $2U_0$ в середине обмотки.

Рассмотрим особенности переходного процесса в обмотках автотрансформаторов. При автотрансформаторном соединении обмоток высокого и низкого напряжений (рис. 8.21, а), падении волны со стороны ввода высокого напряжения (ВН) и разомкнутом вводе среднего напряжения (СН) колебательный переходный процесс развивается, как в однофазном трансформаторе с заземленной нейтралью (рис. 8.21, б).

При падении волны U_0 со стороны обмотки СН (рис. 8.21, в) в установившемся режиме через обмотку среднего напряжения (СН—0) потечет установившийся ток, который наведет в обмотке высокого напряжения (ВН—0) дополнительное напряжение $(k-1)U_0$, где k — коэффициент трансформации. С учетом свободной составляющей переходного процесса максимальное напряжение на вводе высокого напряжения может достигнуть в переходном режиме величины $2kU_0$ (рис. 8.21, в). Такое опасное повышение напряжения на вводе требует специальных мер защиты, например установки разрядников в непосредственной близости к трансформатору.

8.8.3. Переход волны с одной обмотки на другую

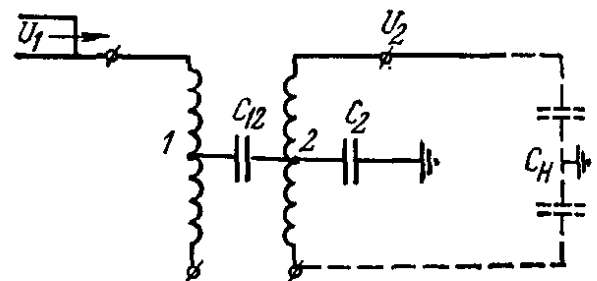
При отсутствии гальванической связи между обмотками перенапряжение в одной из обмоток вследствие влияния электростатических и электромагнитных связей распространяется и на другие обмотки. Например, в первый момент электростатическое поле обмотки 1 (рис. 8.22) создает в обмотке 2 напряжение U_2 , связанное с волной U_1 соотношением

$$U_2 = U_1 \frac{C_{12}}{C_{12} + C_2 + C_H},$$

из которого видно, что перенапряжения на обмотке 2 увеличиваются, если она отключена ($C_H = 0$). Для реальных трансформаторов в этом случае $U_2 = (0,2—0,4)U_1$. При подключении к обмотке 2 шин или линий емкость C_H столь велика, что практически $U_2 \approx 0$.

Переход волн между обмотками посредством электромагнитной связи осуществляется в соответствии с коэффициентом трансформации k . Для однофазного трансформатора при падении на первичную обмотку волны с амплитудой U_0 максимальное напряжение на

Рис. 8.22. Переход волны через емкостную связь между обмотками трансформатора.



вводе вторичной обмотки в переходном режиме может приблизиться к величине $2U_0/k$, однако для большинства практических случаев не превышает U_0/k . Опасные перенапряжения возникают, когда волна набегаёт на обмотку низшего напряжения. После трансформации на обмотке высокого напряжения могут появиться опасные для изоляции потенциалы. Поэтому при импульсных испытаниях изоляции одной из обмоток трансформатора все остальные замыкаются накоротко и заземляются.

8.8.4. Внутренняя защита обмоток трансформатора

Перенапряжения, воздействующие в течение переходного режима на главную и продольную изоляцию трансформатора, можно существенно снизить, если уменьшить свободную составляющую колебательного процесса. Как следует из соотношений (8.20) и (8.21), для этого необходимо принять меры, в результате которых первоначальное распределение напряжения вдоль обмотки приблизится к установившемуся.

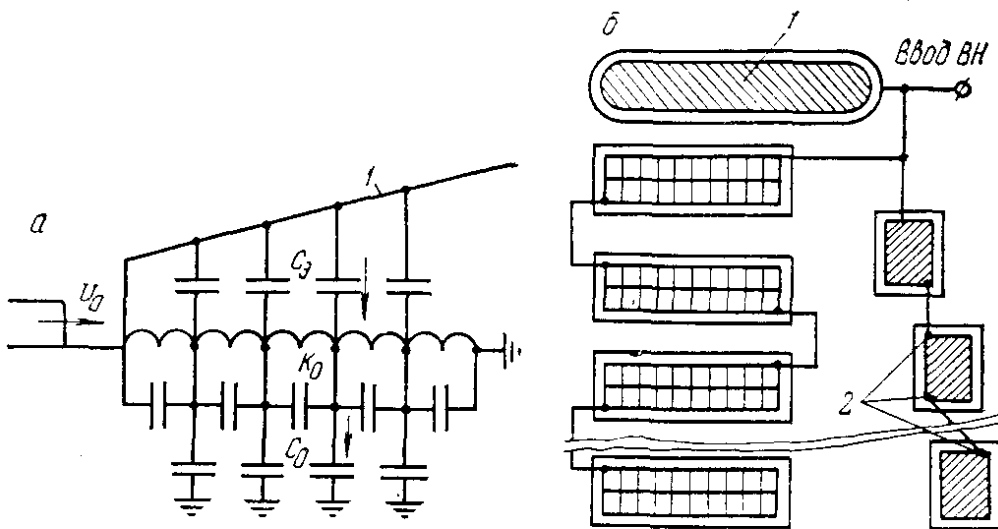


Рис. 8.23. Внутренняя защита обмоток трансформаторов.

Для осуществления таких мер есть ряд способов. Один из них заключается в том, чтобы значительно увеличить распределенную емкость обмотки относительно ее начала. В этом случае поперечные токи, оттекающие от обмотки через емкости C_0 (рис. 8.23, а), компенсируются токами, подтекающими через емкости C_3 экрана 1, и кривая первоначального распределения напряжения вдоль обмотки выравнивается. Полное устранение колебательного процесса в обмотке трансформатора с заземленной нейтралью должно наступить при выполнении условия

$$C_3 = C_0 \frac{l-x}{x}, \quad (8.22)$$

т. е. по мере приближения к началу обмотки емкости C_3 должны возрастать.

Практически ограничиваются частичной компенсацией, и емкость C_3 создается установкой специальных экранов (рис. 8.23, б) в виде разомкнутых колец 2, охватывающих начальную часть обмотки. Экраны соединяются друг с другом и вводом, диаметр экранов по мере удаления от ввода возрастает для выполнения условия (8.22). Экраны изолируются от витков обмотки. Помимо экранов, с торца обмотки устанавливается емкостное кольцо 1, которое выравнивает распределение напряжения на витках первой катушки и сглаживает неоднородность поля в главной изоляции со стороны ввода высокого напряжения, т. е. в наиболее неблагоприятной для выполнения изоляции зоне. Установка емкостных колец и экра-

нов — мероприятия внутренней защиты трансформаторов с номинальным напряжением 110 кВ и выше.

Другой способ заключается в увеличении продольных емкостей K_0 . При этом уменьшается αl и начальное распределение напряжений также приближается к установившемуся.

Увеличение продольных емкостей достигается, например, в переплетенных обмотках. В конструкциях этих обмоток удаленные по порядковому номеру витки располагаются рядом (см. рис. 8.24), что ведет к увеличению емкости K_0 в десятки и сотни раз. Переплетенные обмотки с широкими дисковыми катушками (что также приводит к росту K_0) применяются в трансформаторах высших классов напряжений.

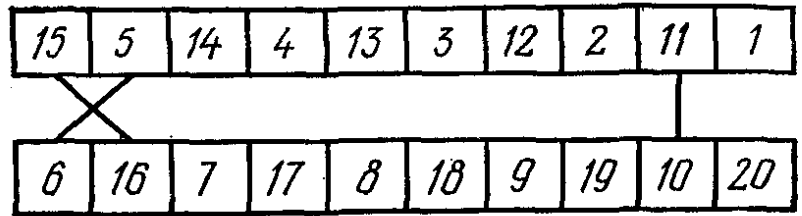


Рис. 8.24. Пример переплетения витков в паре катушек.

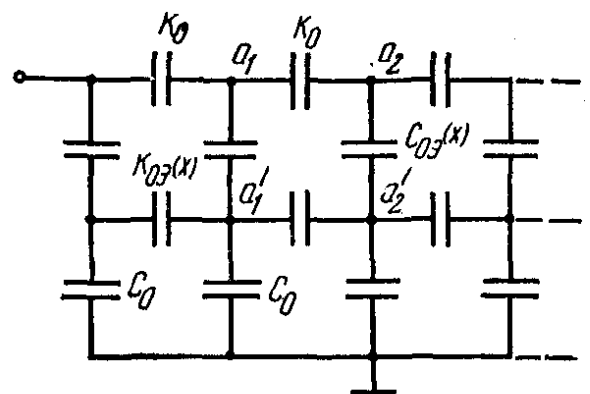
Использование частичной компенсации с помощью емкостных колец и экранов в мощных трансформаторах напряжением 220 кВ и выше встречает серьезные трудности, так как приводит к заметному увеличению габаритов. Переплетенные обмотки также имеют ряд недостатков: они сложны, требуют большого числа паек (которые являются ослабленным местом) и усиления витковой изоляции.

Поиски новых решений регулирования продольной емкости привели, например, к схеме, показанной на рис. 8.25. Параметры схемы выбираются так, чтобы точки $a_1 - a'_1$; $a_2 - a'_2$; ... находились попарно под одинаковыми потенциалами. При этом токи через $C_{0э}(x)$ протекать не будут и напряжение вдоль обмотки при $K_0(x) = K_0 = \text{const}$ распределяется равномерно. Для реализации такого условия при $C_0(x) = C_0 = \text{const}$ необходимо, чтобы

$$K_{0э}(x) = K_{0э}(l) + \frac{C_0(l-x)^2}{2}. \quad (8.23)$$

Рис. 8.25. Схема регулирования начального распределения напряжения с помощью конденсаторного экрана:

$K_{0э}(x)$ — расчетная продольная емкость единицы длины конденсаторного экрана; $C_{0э}(x)$ — емкость единицы длины обмотки относительно экранирующих конденсаторных обкладок.



Дискретное регулирование $K_{0э}(x)$ можно осуществить с помощью изолированных друг от друга конденсаторных обкладок, которые, перекрывая друг друга, экранируют катушки обмотки. Изменяя ширину перекрытия и расстояние между обкладками, добиваются выполнения условия (8.23).

Слоевые цилиндрические обмотки (см. рис. 4.7, а), применяемые в отечественных силовых трансформаторах на напряжение 35 кВ и ниже, отличаются малой емкостью C_0 (исключая торцевые части обмотки) и значительной емкостью K между слоями. Поэтому возникновение свободных колебаний в обмотках такого типа затрудняется. Со слоевыми обмотками выполняются все испытательные трансформаторы на высокие напряжения. Применение слоевых обмоток для силовых трансформаторов на напряжение свыше 35 кВ ограничивается плохими условиями охлаждения таких обмоток.

8.8.5. Волновые процессы в обмотках электрических машин

Генераторы и высоковольтные двигатели, как правило, связаны с воздушными сетями через трансформаторы, и значительные грозовые перенапряжения на их обмотки не воздействуют. Однако в некоторых случаях машины малой и средней мощности питаются непосредственно от воздушных сетей напряжением 6—10 кВ, и, кроме того, импульсы атмосферного происхождения, хотя и существенно ослабленные, проникают к обмоткам машин через трансформаторы. Так как коэффициент импульса изоляции машин близок к единице, появляется необходимость проводить координацию импульсной прочности главной и витковой изоляции обмотки с испытательными напряжениями промышленной частоты и возможными перенапряжениями. При этом оказывается, что машины, непосредственно связанные с воздушными сетями, требуют усиленных мер защиты от набегающих волн перенапряжений.

Точный расчет переходного процесса в обмотке машины очень сложен. Однако на основании опытных испытаний и теоретического анализа было установлено, что в приемлемом приближении можно обмотку машины рассматривать как участок линии с волновым сопротивлением $z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$, где L_0 , C_0 — соответственно индуктивность и емкость на единицу длины обмотки. Волновые сопротивления обмотки уменьшаются при увеличении мощности машины, так как при этом возрастает емкость C_0 и снижается индуктивность L_0 вследствие увеличения сечения проводников.

Рост толщины изоляции при возрастании номинального напряжения машины приводит к росту волнового сопротивления примерно пропорционально $\sqrt{U_n}$. Усредненные значения волновых сопротивлений турбо-

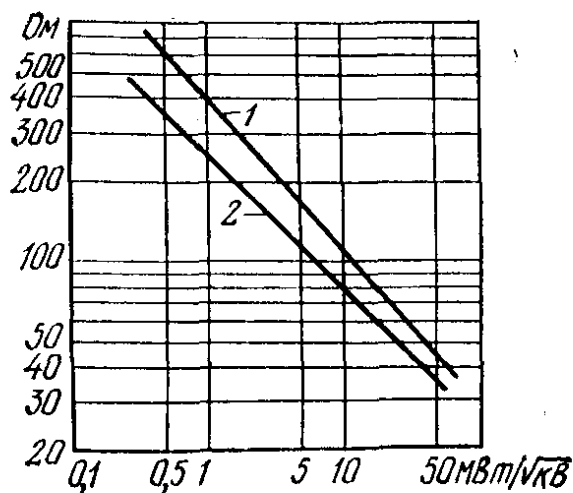


Рис. 8.26. Зависимость волнового сопротивления машины от параметра $MВт/\sqrt{kВ}$ при движении волн по одной фазе (кривая 1) и по трем фазам (кривая 2).

генераторов в зависимости от параметра $MВт/\sqrt{kВ}$ приведены на рис. 8.26.

При движении волны по обмотке происходит ее интенсивное затухание вследствие потерь в проводниках, изоляции и металле. Скорость движения волны в пазовой части обмотки значительно меньше скорости света, так как электромагнитное поле волны проникает в металл статора. В лобовых частях скорость движения волны приближается к скорости света. Средняя скорость уменьшается с увеличением мощности машины и лежит в пределах 8—20 м/мкс.

При воздействии на обмотку косоугольной волны с крутизной a на изоляции между витками появляется напряжение

$$\Delta U_{\text{в}} = \frac{al_{\text{в}}}{v}, \quad (8.24)$$

где a — крутизна волны, кВ/мкс; $l_{\text{в}}$ — длина витка, м; v — скорость распространения волны, м/мкс.

Для многовитковых секций машин малой и средней мощности допустимую крутизну волны $a_{\text{доп}}$ можно определить, ориентируясь на величину испытательного напряжения межвитковой изоляции $U_{\text{исп.в.}}$.

Считая, что $\Delta U_{\text{в}} \leq U_{\text{исп.в.}}$, из выражения (8.24) находим

$$a_{\text{доп}} \leq \frac{\sqrt{2} U_{\text{исп.в.}} \cdot 1,25v}{l_{\text{в}}}.$$

Из расчетов следует, что для защиты межвитковой изоляции крутизна волны должна быть снижена до 5—6 кВ/мкс, что достигается с помощью специальных мер защиты, которые будут рассмотрены далее, в гл. 14.

9. МОЛНИЯ КАК ИСТОЧНИК ГРОВОНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

9.1. РАЗВИТИЕ РАЗРЯДА МОЛНИИ

Молния — одна из разновидностей искрового разряда в длинных воздушных промежутках. Одним из условий возникновения молнии является образование грозовых облаков, в которых накапливаются значительные электрические заряды.

Существует ряд теорий, объясняющих электризацию грозовых облаков. По одной из них, этот процесс происходит следующим образом. В атмосфере, насыщенной водяными парами, под действием мощных восходящих потоков воздуха происходит разбрызгивание водяных капель. При этом, как показали опыты, образующаяся мельчайшая водяная пыль оказывается заряженной отрицательно, а оставшиеся тяжелые водяные капельки — положительно (рис. 9.1).

Ветер относит заряженную отрицательно водяную пыль на значительное расстояние; положительно заряженные капельки или

выпадают в виде дождя, или удерживаются во взвешенном состоянии, образуя скопление положительных зарядов. Как правило, в нижней части облака скапливаются капельки воды, заряженные отрицательно, а в верхней — заряженные положительно. Поэтому в большинстве случаев (80—90 %) разряды молнии имеют отрицательную полярность. Благодаря турбулентному характеру движения воздушных масс заряды могут сосредоточиваться в облаке

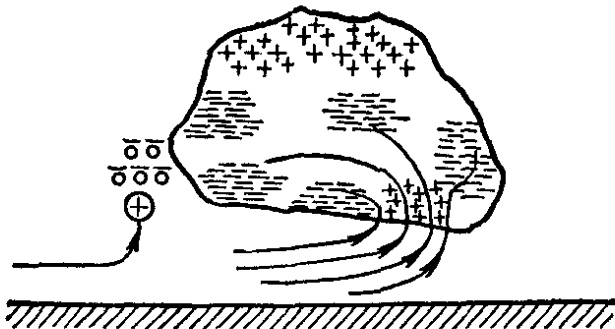


Рис. 9.1. Возможное распределение зарядов в грозовом облаке. Стрелками показано направление воздушных потоков.

в виде отдельных, изолированных друг от друга объемов.

Положительные заряды в облаке чаще всего играют роль своеобразного инициатора разряда, увеличивая напряженность поля около отрицательных зарядов, но в некоторых случаях их величина оказывается достаточной для развития разряда непосредственно из этого скопления.

Грозное облако представляет собой как бы «обкладку» гигантского конденсатора, второй «обкладкой» которого является земля, заряженная под облаком индуктированными зарядами.

Средняя напряженность поля на участке облако — земля не превышает 10 кВ/м, напряженность у поверхности облака, которое является своеобразным «стержнем» по отношению к земле, значительно выше. Когда плотность зарядов в облаке достигает такой величины, при которой напряженность поля у поверхности облака будет достаточной для начала самостоятельного разряда (25—30 кВ/см), начинается развитие разряда в виде молнии.

На рис. 9.2 представлены стилизованная развертка фотографии молнии (а), полученная при съемке разряда на быстро движущуюся пленку, и изменение тока молнии при разряде (б). Разряд начинается с прорастания к земле слабо светящегося канала, движущегося толчкообразно со средней скоростью 10^7 — 10^8 см/с, — так называемого **ступенчатого лидера**. Средняя длина ступени составляет 50 м, паузы между толчками 30—80 мкс, скорость прорастания ступени порядка $5 \cdot 10^9$ см/с. На рис. 9.2 ступенчатый лидер показан в виде нитевидных линий с засвеченными участками на концах, которые соответствуют прорастанию ступеней и усилению ионизации. Лидер показан разветвленным, земли достигает обычно лишь одна из ветвей.

Когда лидер достигает земли, возникает **главный разряд**, движущийся от земли к облаку; на фотографии он представляет след интенсивного свечения. Невооруженным глазом главный разряд воспринимается как собственно разряд молнии. Скорость развития главного разряда достигает 0,05—0,5 скорости света, ток молнии на этой стадии имеет наибольшую величину.

После завершения первого разряда наступает пауза длительностью 0,05 с; в течение части этого времени канал разряда про-

должна светиться (**послесвечение**), затем возможны второй и последующие разряды, что объясняется наличием в облаке нескольких очагов скопления объемных зарядов.

Лидеры повторных разрядов (их называют **стреловидными**) движутся непрерывно со скоростью порядка 10^8 см/с, токи имеют меньшие значения, чем при первом разряде.

Множественный характер разряда молнии наблюдается примерно в 40 % случаев, количество отдельных разрядов может достигать 20, но чаще всего их число равно 3—4.

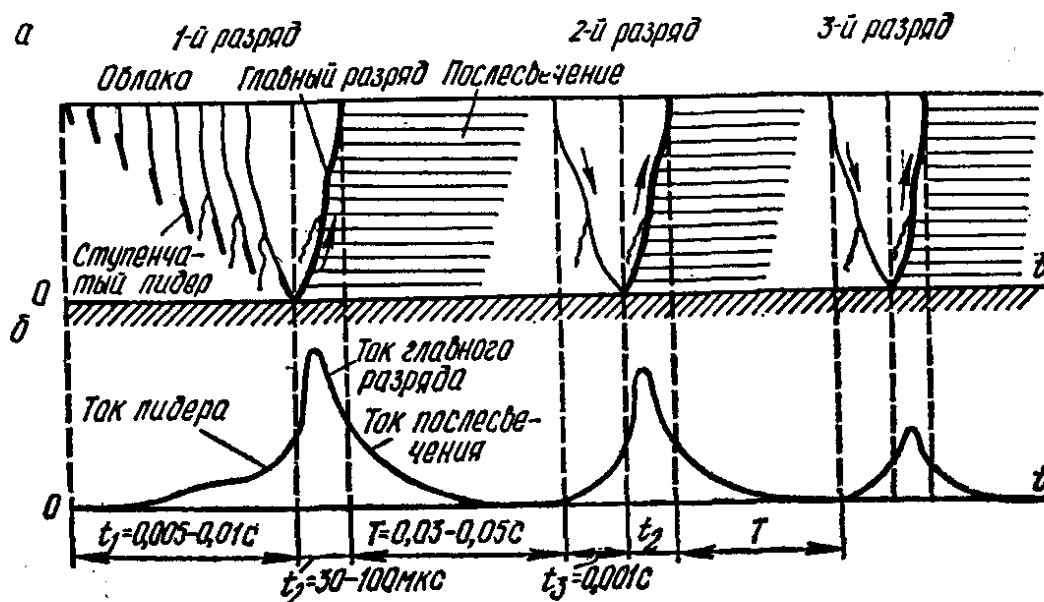


Рис. 9.2. Развитие молнии.

Суммарный заряд, стекающий в землю при многократной молнии, лежит в пределах от нескольких кулонов до 100 Кл и более, в среднем значение этого заряда близко к 20 Кл. Заряды, спускаемые в землю во время гроз, играют, по-видимому, основную роль в поддержании отрицательного заряда земли на неизменном уровне.

9.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЛНИИ. ИНТЕНСИВНОСТЬ ГРОЗОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

При расчетах грозоупорности электротехнических установок основной исходной величиной обычно является не напряжение, а ток молнии, так как непосредственно измерены могут быть только токи молнии.

Ток молнии имеет форму аperiodического импульса (см. рис. 9.2) с длиной фронта до нескольких микросекунд и общей длиной 20—80 мкс. Средняя длительность импульса тока молнии около 50 мкс, что и определило выбор длины волны стандартного импульса (см. § 1.4).

Массовые измерения токов молнии в Советском Союзе и за рубежом показали, что токи молнии лежат в пределах от нескольких до сотен килоампер, но наиболее часты токи молнии до 50 кА, токи 50—100 кА встречаются редко, а токи свыше 100 кА очень

редки и, следовательно, должны учитываться только при проектировании весьма ответственных объектов.

Аналитически вероятность тока молнии, равного или превышающего величину I_m , задается выражением

$$\lg P_I = -I_m / 60. \quad (9.1)$$

В расчетах грозоупорности важное значение имеет также крутизна a_I (скорость роста) тока молнии на фронте волны, которая измеряется в килоамперах в микросекунду (кА/мкс) или килоамперах на метр (кА/м). Аналитически зависимость вероятности крутизны, равной или превышающей заданную a_I , выражается формулой

$$\lg P_a = -a_I / 36. \quad (9.2)$$

Совместные измерения I_m и a_I показали, что крутизна и амплитуды тока в молнии связаны между собой статистически очень слабо. Поэтому вероятность одновременного превышения заданных параметров может, как для независимых переменных, определяться по формуле

$$\lg P_{I, a} = - (I_m / 60 + a_I / 36). \quad (9.3)$$

В формулах (9.1) — (9.3) вероятности (в долях единицы) соответствующих величин даны для равнинных районов. Для горных районов указанные вероятности будут в два раза меньше.

Интенсивность грозовой деятельности очень сильно различается для разных климатических районов. Количество гроз в течение года минимально, как правило, в северных районах и увеличивается к югу, где повышенная влажность и высокая температура воздуха способствуют образованию грозовых облаков.

Интенсивность грозовой деятельности можно характеризовать или числом грозовых дней в году n_d , или числом грозовых часов в году $n_{ч}$. В СССР эту интенсивность характеризуют числом грозовых часов, так как количество поражений молнией каких-либо объектов зависит от общей продолжительности гроз, а не от их числа. Число часов грозовой деятельности устанавливается как среднее за ряд лет наблюдений для данного района, на основании данных таких наблюдений составляют карты грозовой деятельности, на которые наносят линии равной продолжительности гроз.

Для северных районов СССР $n_{ч} = 10—20$, для средних — 40—60 и южных — 80—100 ч/год. Следует отметить, что во многих районах существуют очаги повышенной интенсивности грозовой деятельности, например для средней полосы СССР, в районе Витебска, Киева и др., где создаются благоприятные условия для формирования местных гроз. Как своеобразный рекорд в этом отношении следует отметить район г. Богор (о. Ява), где зарегистрировано 320 грозовых дней в году (это соответствует $n_{ч} \approx 1,5$ $n_d \approx 480$ ч/год).

Чтобы определить возможное число прямых ударов молнии в какое-либо сооружение, необходимо, кроме числа часов грозовой

деятельности, знать также число поражений молнией 1 км² земной поверхности в год. По данным многолетних наблюдений, это число, отнесенное к 1 ч грозовой деятельности, составляет в среднем 0,07.

Таким образом, среднее число ударов молнии в наземные сооружения в год можно определить по формуле

$$N_{уд} = 0,07 n_{ч} S,$$

где S — расчетная площадь поражаемого сооружения, км².

9.3. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРЯМОГО УДАРА МОЛНИИ

В расчетах грозоупорности молнию представляют в виде волнового сопротивления канала молнии z_M , равного приблизительно 200 Ом, по которому движется волна тока молнии. Измерения токов молнии показали, что их амплитуды при сопротивлении заземления объекта R_3 до 25—30 Ом (хорошо заземленные объекты) практически не зависят от R_3 , а при более высоких снижаются обратно пропорционально R_3 . Поэтому при ударах молнии в хорошо заземленные объекты (рис. 9.3, а) ток молнии принимается равным наблюдаемым значениям I_M , а при значительных сопротивлениях заземления снижается до величины

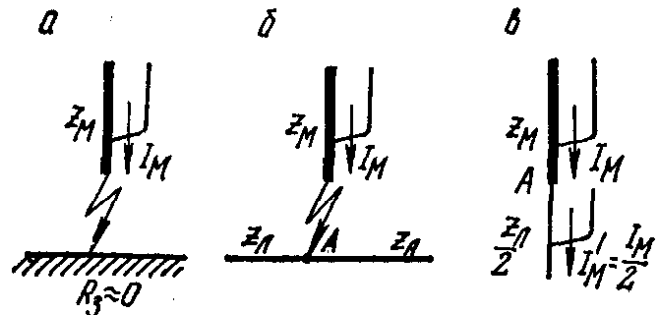


Рис. 9.3. Схемы удара молнии.

$$I'_M = I_M \frac{z_M}{z_M + R_3}.$$

При ударах в тросы или провода ВЛ (рис. 9.3, б) под R_3 подразумевается волновое сопротивление линии, отходящей в обе стороны от точки удара. Следовательно, $R_3 = z_л / 2$ (рис. 9.3, в), и ток молнии в точке удара при $z_л = 400$ Ом будет равен $I'_M = I_M \frac{200}{200 + 200} = I_M / 2$, т. е. снижается вдвое по сравнению с током при ударах в хорошо заземленные объекты.

Ток молнии, протекая через пораженный объект, создает значительное падение напряжения и оказывает электромагнитное, тепловое и механическое воздействие.

Падение напряжения U_3 , создаваемое током молнии в объекте с сопротивлением R_3 , достигает в ряде случаев сотен и даже тысяч киловольт. Действительно, при ударе в молниеотвод с $R_3 = 10$ Ом ток молнии в 100 кА создает падение напряжения $U_3 = I_M R_3 = 100 \cdot 10 = 10^3$ кВ, а при ударе в провода ВЛ (см. рис. 9.3, в) $U_{пр} = (I_M / 2) (z_л / 2) = 100 I_M$. В нашем случае это составит 10^4 кВ.

Вполне очевидно, что под действием таких перенапряжений, которые называют **перенапряжениями прямого удара молнии** ($U_{п.у.м}$), будет повреждена изоляция практически любого класса напряжения.

9.4. ИНДУКТИРОВАННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

При ударах молнии в землю у поверхности земли создается значительная напряженность электрического поля, под действием которого на проводниках образуются индуктированные перенапряжения. Так как напряженность поля имеет две составляющие: электрическую $E_э = -\text{grad } \phi$, определяемую распределением зарядов в пространстве, и магнитную $E_м = -di/dt$, зависящую от скорости изменения во времени магнитного поля, то и индуктированное перенапряжение также можно представить в виде двух составляющих: электрической $U_{ин.э}$ и магнитной $U_{ин.м}$.

Механизм образования этих составляющих и их приближенная оценка могут быть представлены следующим образом. Как отмечалось ранее, молния представляет развивающийся от облака до земли со сравнительно небольшой скоростью ($\approx 2 \cdot 10^7$ см/с) лидер, несущий преимущественно отрицательный заряд.

Электрическое поле заряда лидера показано на рис. 9.4, а. На проводе в каждой точке x действует продольная составляющая напряженности электрического поля $E_{эx}$, примерно пропорциональная высоте подвеса провода $h_{пр}$. Под действием этой напряженности по-

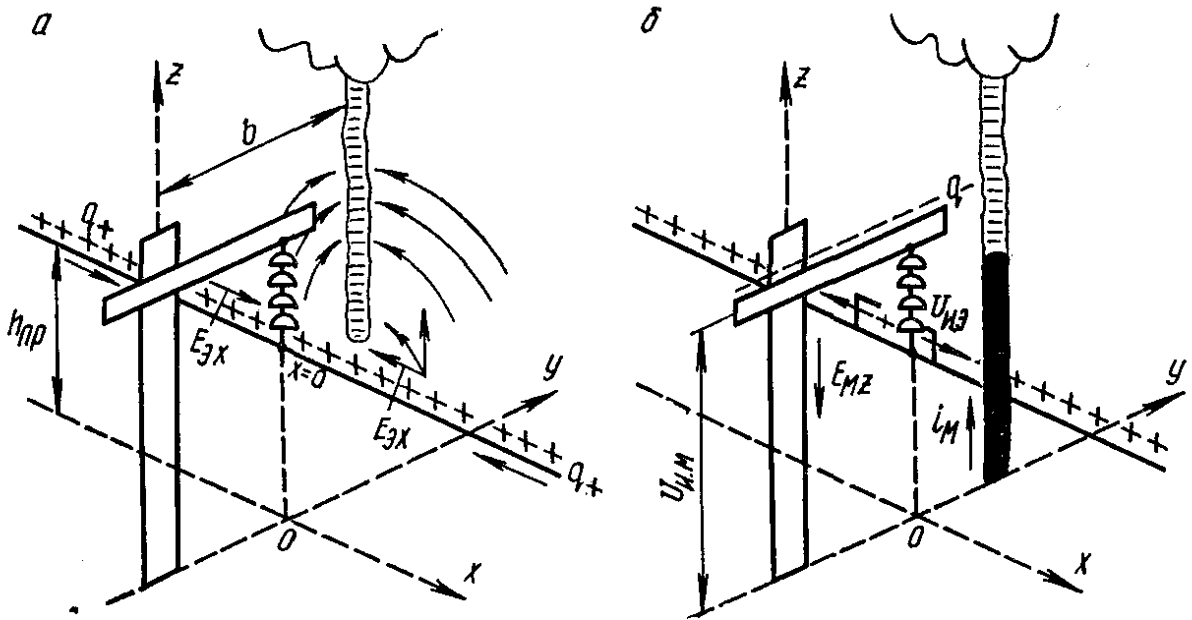


Рис. 9.4. Возникновение индуктированных перенапряжений на линиях.

ля положительные заряды q_+ подтягиваются с дальних участков линии к точке с $x=0$. Линия связана так или иначе с землей (через нейтраль системы, емкости проводов и т. п.), поэтому при сравнительно медленном изменении электрического поля в лидерной стадии разряда отрицательные заряды растекаются по проводам, уходя из зоны влияния лидера. Электрическое поле положительных

зарядов q_+ компенсируется на высоте провода полем $E_{эx}$ отрицательных зарядов лидера, и потенциал проводов сохраняет нулевое значение, примерно равное потенциалу дальних участков проводов (напряжение промышленной частоты не учитывается).

В стадии главного разряда (рис. 9.4, б) электрическое поле лидера распадается, исчезновение составляющей $E_{эx}$ высвобождает заряды q_+ на проводе, которые растекаются по нему со скоростью света, при этом возникает волна индуктированного перенапряжения $U_{ин.э}$, которое имеет наибольшее значение в точке $x=0$, ближайшей к каналу молнии. Полярность волны перенапряжения противоположна полярности тока молнии.

Протекание тока главного разряда молнии i_m (см. рис. 9.4, б) создает в окружающем пространстве быстро меняющееся во времени магнитное поле, которое в свою очередь индуктирует электрическое поле с напряженностью E_{mz} (составляющие по осям x и y отсутствуют). Под действием этой напряженности к верхушке опоры подтекают заряды q_- , т. е. она приобретает потенциал, который называют **магнитной составляющей индуктированного напряжения** ($U_{ин.м} = E_{mz} h_{пр}$), полярность этого напряжения совпадает с полярностью тока молнии.

Таким образом, на изоляцию линии воздействуют суммарное индуктированное перенапряжение $U_{ин} = U_{ин.э} + U_{ин.м}$.

Амплитуда $U_{ин}$ пропорциональна высоте подвеса провода и снижается при уменьшении тока и крутизны тока молнии и увеличении расстояния от места разряда до линии.

Для приближенной оценки амплитуды индуктированного перенапряжения можно применять формулу $U_{ин} = 30 I_m h_{пр} / b$ кВ, где I_m — расчетная амплитуда тока молнии, кА; $h_{пр}$, b — высота подвеса провода и расстояние до места удара молнии, м.

Основной интерес представляют не наибольшие амплитуды индуктированных перенапряжений, а вероятность появления перенапряжения с определенной амплитудой. На рис. 9.5 приведена зависимость числа возникновения N индуктированных перенапряжений (в год) от их амплитуды, подсчитанная для 100 км длины линии с $h_{пр} = 10$ м при числе грозových часов в год $n_{г} = 30$. Как видно из рис. 9.5, индуктированные перенапряжения могут превышать импульсную прочность изоляции ВЛ напряжением 35 кВ ($U_{50\%} \approx 350$ кВ) менее двух раз в год, а импульсную прочность ВЛ напряжением 110 кВ ($U_{50\%} \approx 700$ кВ) — всего один раз за 5 лет.

Как мы увидим из последующих глав, вероятность перекрытия изоляции линий 110 кВ при прямых ударах молнии значительно выше. Таким образом, рассмотренный вид индуктированных пере-

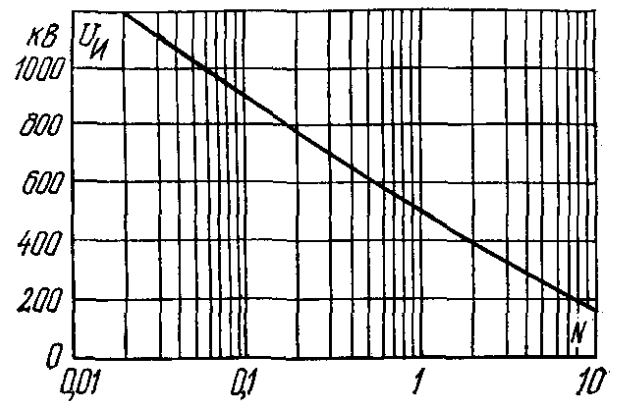


Рис. 9.5. Кривая вероятности амплитуд индуктированных перенапряжений.

напряжений для ВЛ 110 кВ и выше не имеет существенного значения.

Особенностью индуктированных перенапряжений является одновременное их возникновение с примерно одинаковой амплитудой на всех фазах линии электропередачи.

Индуктированные перенапряжения возникают также и при прямых ударах молнии в линию передачи. В этом случае они, накладываясь на перенапряжения прямого удара, увеличивают разность потенциалов на изоляции. Такие индуктированные перенапряжения нужно учитывать при больших токах молнии в том случае, если удар молнии происходит в опору или поблизости от нее.

9.5. ТЕПЛОВЫЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТОКОВ МОЛНИИ

Хорошо известно, что удары молнии в наземные объекты могут вызвать пожары и механические разрушения. Очевидно, что устройства защиты от прямых ударов молнии (молниеотводы, их заземлители) должны выдерживать удары молнии наибольшей интенсивности.

Минимальное сечение проводника, обеспечивающее отсутствие его разрушения при наибольших токах молнии, обычно принимается порядка 50 мм². Стальной проводник при таком сечении при наиболее интенсивных разрядах нагревается до нескольких сотен градусов.

При прохождении тока молнии по системе проводников между ними возникают механические усилия, которые могут быть подсчитаны по известным формулам. Но даже при наибольших токах молнии эти усилия недостаточны для деформации молниеотводов или опор линий электропередачи.

При ударах молнии в объекты с плохой проводимостью (деревья, деревянные опоры, кирпичные строения) может произойти их разрушение. Это объясняется тем, что ток молнии проходит преимущественно по участкам с повышенной проводимостью, имеющимся внутри объекта благодаря его увлажнению. Это приводит вследствие нагрева и испарения влаги к резкому увеличению давления и разрушению объекта. В случае ударов молнии в объекты из легковоспламеняющихся материалов (сухое дерево) возможно также возникновение пожара.

10. ЗАЩИТА ОТ ПРЯМЫХ УДАРОВ МОЛНИИ

10.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Молниеотвод представляет хорошо заземленную проводящую металлическую конструкцию, предназначенную для предотвращения прямых ударов молнии в электротехнические устройства или иные сооружения. Как средство защиты от прямых ударов молнии молниеотводы применялись еще до нашей эры, но всеобщее признание они получили только в середине XVIII века благодаря работам Франклина и Ломоносова.

Любой молниеотвод состоит из молниеприемника, заземлителя и токоотвода, соединяющего молниеприемник с заземлителем. По типу молниеприемников различают **стержневые** и **тросовые** молниеотводы.

Защитное действие молниеотвода проявляется во время лидерной стадии грозового разряда, когда из всех возможных направлений развития разряда преимущественное направление определяется максимальными напряженностями электрического поля.

При большой высоте лидера разряда такое направление устанавливается исключительно самим каналом разряда (рис. 10.1, а), и объекты, расположенные на земле, при этом не влияют на направление развития разряда.

Однако с некоторой высоты H , называемой **высотой ориентации молнии**, начинает проявляться искажение поля различными земными сооружениями и развитие лидера разряда 1 происходит в направлении к наиболее возвышающимся предметам 2 — опорам ВЛ, трубам, молниеотводам и т. п. (рис. 10.1, б). При этом вероятность удара молнии в сооружение, расположенное около молниеотвода, резко снижается, и при некоторой высоте молниеотвода над защищаемым сооружением ни один удар молнии это сооружение поражать не будет.

Вероятность поражения молниеотвода зависит от положения точки ориентировки молнии a , лежащей на горизонтальной прямой в одной плоскости с молниеотводом (см. рис. 10.1, б). Когда эта точка находится над молниеотводом или на небольшом расстоянии R от него, все удары молнии будут попадать в молниеотвод. Начиная с некоторого расстояния R' , при котором разрядные напряжения на молниеотвод U_p и землю U'_p становятся равными, ориентировки разряда молнии происходить уже не будет.

Принято считать, что для молниеотводов высотой h до 30 м $H = (10—20)h$, а при большей высоте принимают $H = 600$ м.

Очевидно, что если возле молниеотвода поместить какой-либо объект, то при определенной высоте молниеотвода разрядные напряжения между каналом молнии и объектом всегда больше разрядных напряжений на молниеотвод или в землю и объект будет защищен от ударов молнии.

10.2. ЗОНЫ ЗАЩИТЫ СТЕРЖНЕВЫХ МОЛНИЕОТВОДОВ

Зоной защиты называют пространство около молниеотвода, попадание ударов молнии в которое маловероятно. Таким образом, защищаемые сооружения должны полностью вписываться в границы зоны защиты.

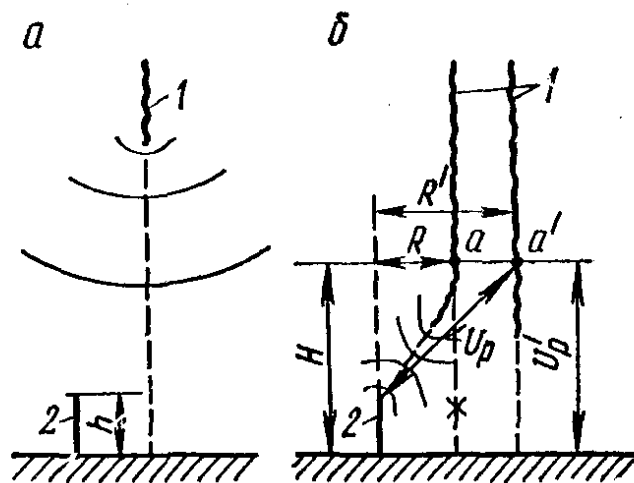


Рис. 10.1. Направление преимущественного развития разряда молнии.

Определение зон защиты различных молниеотводов производится на моделях; канал молнии в них имитируется стержнем, на который подается серия волн от ГИИ возможно большей амплитуды. Стержень располагается на высоте ориентации молнии H на предельном расстоянии R_1 , несколько большем R , откуда вероятность поражения молнией объекта будет наибольшей. Опыты показали, что $R = 3,5h$. Следовательно, зоной 100 %-ного поражения стержневого молниеотвода, защищающего объект высотой h_x , будет пара-

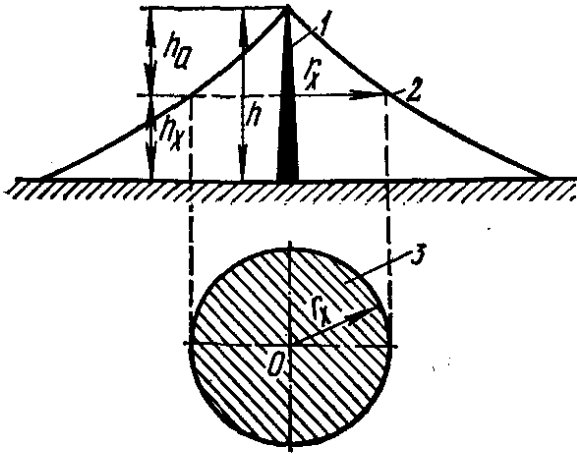


Рис. 10.2. Зона защиты одиночного молниеотвода:

1 — молниеотвод; 2 — граница зоны защиты; 3 — сечение зоны защиты на высоте h_x .

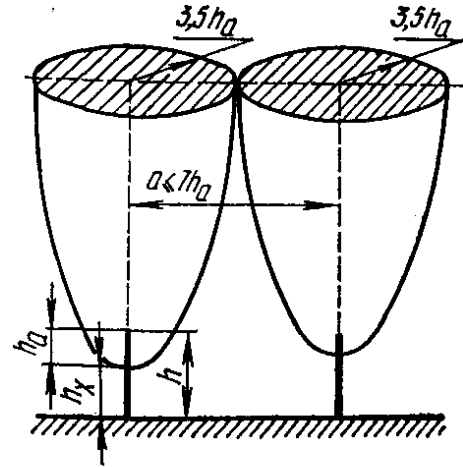


Рис. 10.3. Зоны 100 %-ного поражения двух стержневых молниеотводов.

болоид вращения с радиусом основания $R = 3,5h_a$, где $h_a = h - h_x$ — активная высота молниеотвода.

Разряды молнии при этом сильно отклоняются от вертикали и поражают землю на расстоянии $r = 1,6h$. Это расстояние называют радиусом зоны защиты на уровне земли ($h_x = 0$).

Зона защиты одиночного молниеотвода (рис. 10.2) представляет конус с криволинейной образующей, удовлетворяющей уравнению

$$r_x = 1,6h \frac{h - h_x}{h + h_x} p,$$

где $p = 1$ при $h \leq 30$ м и $p = 5,5 \sqrt{h_a}$ при $h > 30$ м.

Одиночные молниеотводы имеют малую по размерам зону защиты и применяются в случаях отдельных, небольших по размерам объектов.

Лидер молнии, вошедший в зону 100 %-ного поражения, неизбежно поражает молниеотвод. Как следует из рис. 10.3, для защиты объектов с большой площадью можно применять несколько (два, три и более) молниеотводов, располагая их так, чтобы их зоны 100 %-ного поражения касались или даже частично перекрывали друг друга. Следовательно, расстояние a между двумя молниеотводами не должно превышать $7h_a$.

На рис. 10.4, а приведены зоны защиты двух стержневых молниеотводов. Внешняя часть границы зоны строится, как и для оди-

ночного молниеотвода; внутренняя часть (между молниеотводами) имеет форму седловины, верхняя образующая которой представляет дугу окружности, проведенной через точки 1, 2 и 3 (высота точки 3 над землей $h_0 = h - a/7$), а наименьшая ширина $2b_x$ на высоте h_x определяется по кривым или по формуле

$$b_x = 4r_x \frac{7h_a - a}{14h_a + a}.$$

В случае применения молниеотводов различной высоты внешняя часть зоны строится, как для отдельных молниеотводов, высотой h_1 и h_2 ; для построения внутренней зоны строится фиктивный молниеотвод высотой $h_2 = h_1$ (см. рис. 10.4, б).

Построение внешней зоны трех и четырех стержневых молниеотводов (рис. 10.5) производится по общему правилу для каждой двух соседних молниеотводов. Для того чтобы все пространство между молниеотводами было защищено от поражений, необходимо выполнить условие: $D \leq 8h_a$ при $h \leq 30$ м; $D \leq 8ph_a$ при $h > 30$ м, где D — диаметр окружности, проведенный через точки установки трех молниеотводов, или большая диагональ четырехугольника с молниеотводами в его вершинах.

В случае применения многократных молниеотводов, например для защиты крупных подстанций, молниеотводы разбиваются на группы по 3 или 4, и построение внешней зоны защиты производится для каждой пары соседних молниеотводов по общему правилу.

Можно рекомендовать следующий порядок расчета защиты от прямых ударов молнии стержневыми молниеотводами:

1) намечают количество и места установки молниеотводов;

2) разбивают их на группы по 3—4 соседних молниеотвода;

3) определяют для каждой группы активную и полную высоту молниеотводов по выражениям $h_a \geq D/8$ и $h = h_a + h_x$ и останавливаются обычно на больших значениях;

4) строят наружную гра-

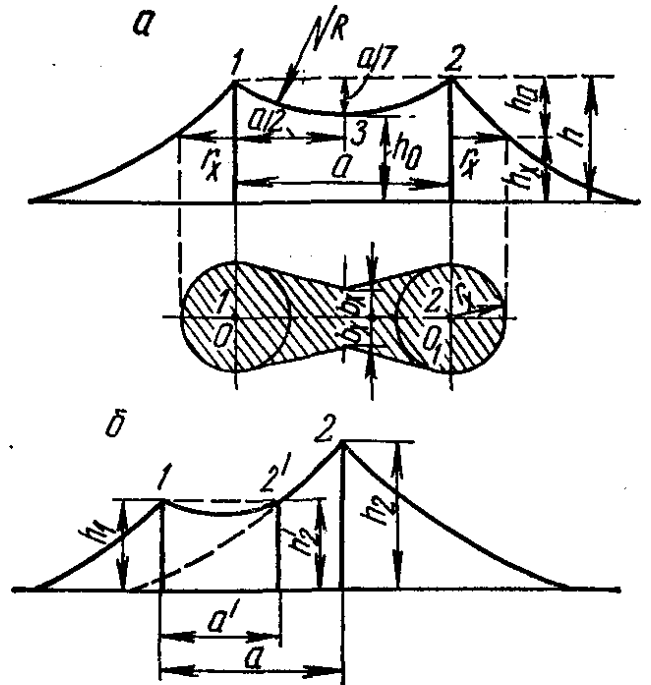


Рис. 10.4. Зоны защиты двух стержневых молниеотводов одинаковой (а) и различной (б) высоты.

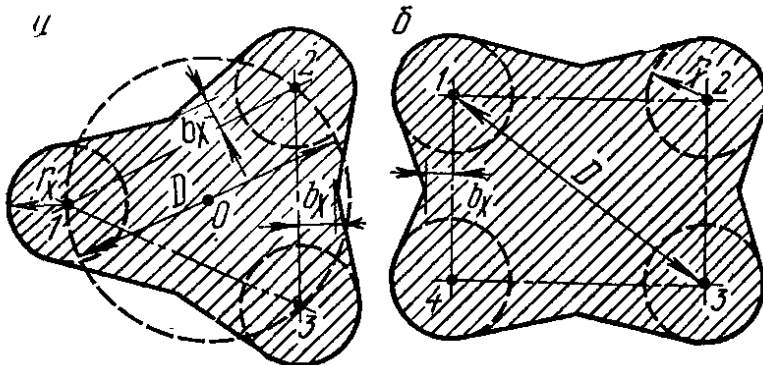


Рис. 10.5. Зоны защиты трех (а) и четырех (б) стержневых молниеотводов.

ницу зоны защиты в плане, выполняя построение последовательно для каждого двух соседних молниеотводов, и проверяют, вписываются ли контуры защищаемого объекта на данной высоте h_x в границу зоны защиты. Если не вписываются, то производят соответствующие изменения в высоте молниеотводов или в их расположении и повторяют расчет.

Для сложных по конфигурации объектов расчет часто приходится производить для разных значений высоты h_x .

Рассмотренные зоны защиты надежно защищают сооружения от п. у. м.— вероятность поражения молнией объектов, не выступающих за границы зоны, не превышает 0,001.

10.3. ЗОНЫ ЗАЩИТЫ ТРОСОВЫХ МОЛНИЕОТВОДОВ

Тросовые молниеотводы применяют для защиты протяженных объектов, например линий электропередачи. Для этой цели подвешивают один или два троса на опорах ВЛ над проводами по всей длине линии электропередачи или на участке, который следует защитить от прямых ударов молнии.

Зона защиты тросового молниеотвода имеет длину, равную длине троса, и поперечное сечение, подобное изображенному на рис. 10.2, только $r_x = 0,8h(h - h_x)p / (h + h_x)$.

Зоной 100 %-ного поражения троса является полоса, половина ширины которой равна $(2-3)h_T$, и поэтому расстояние между двумя защитными тросами не должно превышать $4h_a$. Поперечное сечение зоны защиты двух тросов аналогично показанному на рис. 10.4, а.

Наличие тросов не обеспечивает 100 %-ной надежности защиты проводов ВЛ от ударов молнии, всегда существует некоторая вероятность прорыва молнии через тросовую защиту. В отличие от подстанций, территории которых невелики (не превышают десятых долей квадратного километра) и которые поэтому поражаются молнией обычно один раз за десятки лет, линии электропередачи вследствие большой протяженности поражаются

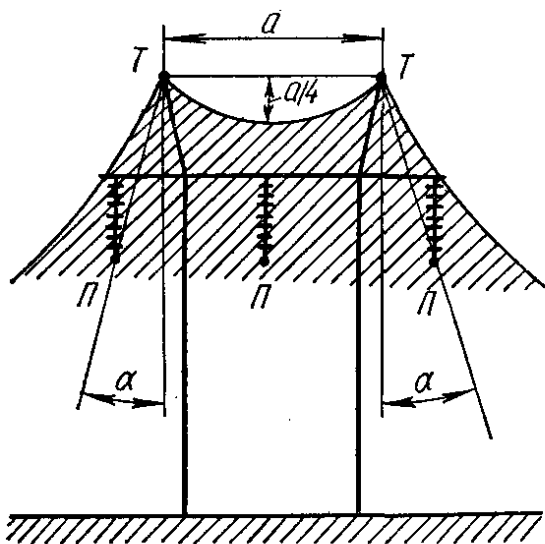


Рис. 10.6. Зона защиты двойного тросового молниеотвода:

T — тросы; P — провода.

молнией десятки и даже сотни раз в году. В таких случаях даже весьма малая вероятность прорыва молнии имеет существенное значение. При применении тросов для защиты ВЛ провода оказываются расположенными в верхней части зоны защиты так, что отношение $h_x/h \approx 0,8$. В этом случае для оценки надежности защиты удобно пользоваться так называемым **углом защиты α** (угол

между вертикалью и прямой, проходящей через трос и крайний провод, рис. 10.6).

Многочисленные опыты и наблюдения показали, что вероятность P_α прорыва молнии через тросовую защиту может быть подсчитана по формуле

$$\lg P_\alpha = \frac{\alpha \sqrt{h_{\text{оп}}}}{90} - 4, \quad (10.1)$$

где α — угол защиты, град; $h_{\text{оп}}$ — высота опоры, м.

При $\alpha=30^\circ$ и $h_{\text{оп}}=16$ м $P_\alpha \approx 0,002$; если высоту опор увеличить до 30 м, то $P_\alpha \approx 0,01$, и для ВЛ 500 длиной 500 км число прорывов молнии составит 2—2,5 в год. Поэтому для уменьшения вероятности прорыва молнии при высоких опорах ВЛ уменьшают защитные углы путем раздвигания тросовых стоек к концам траверсы. Условия надежной защиты среднего провода при этом сохраняются.

10.4. КОНСТРУКТИВНОЕ ВЫПОЛНЕНИЕ МОЛНИЕОТВОДОВ

В качестве несущих конструкций для молниеотводов везде, где это возможно, должны использоваться конструкции самих защищаемых объектов. На подстанциях, например, молниеприемники могут устанавливаться на металлических порталах открытых распределительных устройств, предназначенных для подвески ошиновки, а сами порталы могут применяться в качестве токоотводов.

В качестве несущих конструкций отдельно стоящих молниеотводов при их малой высоте (до 20—25 м) используют железобетонные или деревянные стойки. При высоте более 20—25 м в качестве стоек применяют металлические решетчатые конструкции. Во всех случаях молниеотводы рекомендуется выполнять без растяжек, в виде свободно стоящих конструкций. Если молниеприемник устанавливается на металлической или железобетонной стойке, то в качестве токоотвода используется сама металлическая конструкция стойки или ее арматура; при установке на деревянной стойке по ней прокладывается специальный токоотводящий спуск, обычно из стальной проволоки сечением 35—50 мм².

Сечение токоведущих частей молниеотводов должно удовлетворять условию термической стойкости при протекании тока молнии. При указанном выше сечении токоведущих частей 50 мм² их температура при ударах молнии с токами до 100 кА достигает приблизительно 500 °С, что можно считать приемлемым, так как вероятность больших токов молнии очень мала.

Необходимыми условиями надежной защиты являются хорошее заземление молниеотвода и надежные электрические контакты между всеми его частями. В противном случае на молниеотводе возникают очень высокие потенциалы, начинается искрение в плохих контактах, и все это может привести к пробоем с молниеотвода на защищаемый объект или пожару.

11. ЗАЗЕМЛЕНИЯ В УСТАНОВКАХ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

11.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Назначением заземления в электроустановках является сохранение на каком-либо объекте низкого потенциала, близкого по возможности к потенциалу земли, т. е. нулю. В установках высокого напряжения различают следующие виды заземлений: **рабочее**, к которому относятся заземления нейтралей силовых трансформаторов, генераторов, измерительных и испытательных трансформаторов, дугогасящих катушек и др.; **защитное**, выполняемое для обеспечения безопасности персонала, обслуживающего электроустановки; **заземление грозозащиты**, служащее для отвода токов молнии в землю от разрядников, молниеотводов и других конструкций, в которые произошел удар молнии.

Заземление осуществляется с помощью заземляющего устройства, которое состоит из заземлителя и заземляющих проводников. **Заземлителем** называют металлический электрод или группу электродов, находящихся непосредственно в земле, а **заземляющими проводниками** — проводники, соединяющие заземляемые части электроустановок с заземлителем.

11.2. СОПРОТИВЛЕНИЕ РАСТЕКАНИЯ ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ

Заземлитель характеризуется сопротивлением, которое оказывает окружающая земля стекающему с него току (это сопротивление часто называют **сопротивлением растекания заземлителя**). Сопротивление заземлителя при стекании с него относительно небольших (по сравнению с токами молнии) и медленно меняющихся во времени токов промышленной частоты называют **стационарным**.

Наиболее просто такое сопротивление может быть определено аналитически для полушарового заземлителя в однородном грунте (рис. 11.1). Если через такой заземлитель с радиусом r_0 в землю стекает ток I_3 , например в случае пробоя изоляции трансформатора, то сопротивление заземлителя в грунте с удельным сопротивлением ρ будет равно

а потенциал электрического поля заземлителя

$$R = \int_{r_0}^{\infty} dR = \frac{\rho}{2\pi} \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{r^2} = \frac{\rho}{2\pi r_0},$$

$$U_r = I_3 \int_r^{\infty} dR = \frac{I_3 \rho}{2\pi r}.$$

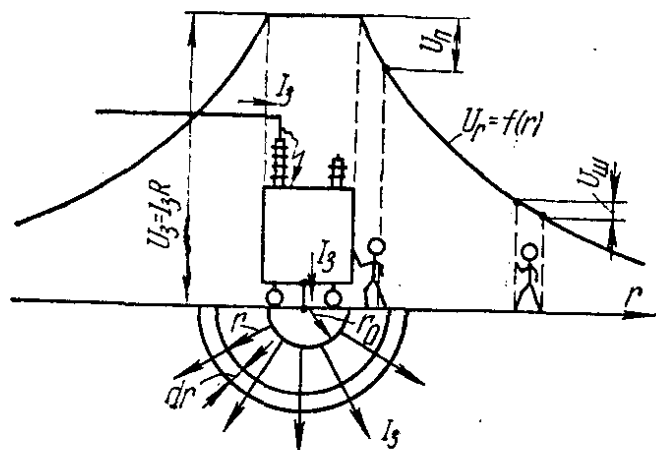


Рис. 11.1. Полушаровой заземлитель.

Этот потенциал будет наибольшим при $r=r_0$ (на границе заземлителя) и практически равен нулю на расстоянии порядка 20 м от него.

Как видно из рис. 11.1, человек, касающийся заземленного электрооборудования при протекании тока I_3 , оказывается под разностью потенциалов $U_n = U_3 - U_r$, где U_n — так называемое напряжение прикосновения; U_r — потенциал земли в месте нахождения ног человека.

Человек, находящийся в поле растекания тока I_3 , окажется под шаговым напряжением $U_{ш}$.

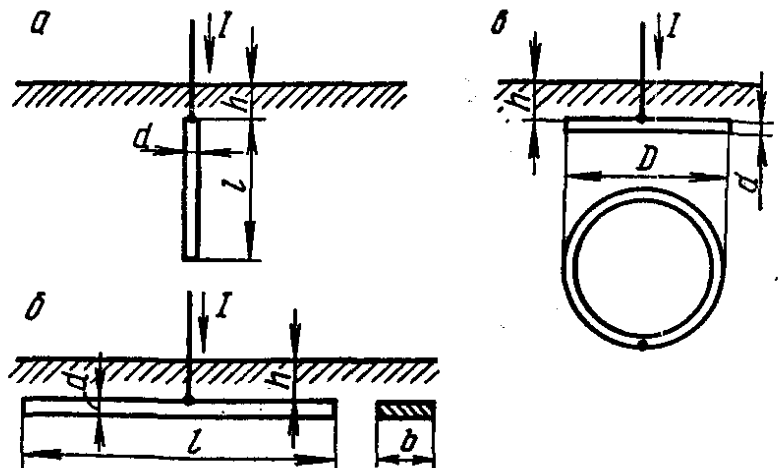
В качестве электродов заземлителей обычно применяют вертикальные электроды длиной 2—3 м (стальные трубы диаметром d до 5—6 см, уголки, стержни) и стальные полосы, уложенные в виде лучей или колец на глубине $h=0,5—0,8$ м или даже на поверхности земли (рис. 11.2).

Сопротивление одиночного вертикального (трубчатого) заземлителя подсчитывают по формуле

$$R_{в} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}, \quad (11.1)$$

Рис. 11.2. Одиночные заземлители:

a — стержневой; *б* — лучевой; *в* — кольцевой.



а горизонтальных лучевых и кольцевых — по формулам, приведенным в табл. 11.1.

Сопротивление одиночных заземлителей даже в хорошо проводящих грунтах обычно превышает требуемое по нормам (0,5 — 10 Ом). Например, сопротивление трубчатого заземлителя с $l=3$ м и $d=50$ мм, заложенного в черноземе

($\rho = 50$ Ом · м), оказывается равным $R_{в} = \frac{50}{2\pi \cdot 3} \ln \frac{4 \cdot 3}{0,05} = 14$ Ом, а сопротивление лучевого (полосового) заземлителя с $l=20$ м, $d=1$ см и $h=50$ см

в том же грунте $R_{г} = \frac{50}{2\pi \cdot 20} \ln \frac{20 \cdot 20}{0,5 \cdot 0,01} = 4,5$ Ом.

Поэтому для обеспечения нужных сопротивлений заземлителей применяют сложные заземлители, состоящие из n вертикальных электродов, соединенных вместе полосами.

При параллельном соединении n электродов с одинаковым сопротивлением R их общее сопротивление при отсутствии взаимного влияния было бы равно $R_{п} = R/n$. В действительности же вследствие эффекта взаимного экранирования расположенных поблизости друг от друга отдельных электродов (рис. 11.3) умень-

Табл. 11.1. Стационарные сопротивления $R_{г}$ горизонтальных заземлителей, Ом

Тип заземлителя	Глубина укладки	Сечение электрода	
		круглое, диаметр d	прямоугольное, ширина b
Лучевой длиной l	h	$\frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{hd}$	$\frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{hb}$
	$h = 0$	$\frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{2l}{d}$	$\frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{4l}{b}$
Кольцевой диаметром D	h	$\frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{4\pi D^2}{hd}$	$\frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{8\pi D^2}{hb}$

Примечание. Все геометрические размеры в этих формулах берутся в метрах, а удельное сопротивление грунта ρ — в Ом · м. В случае применения уголка $d_3 = 0,95b$, где b — ширина уголка; для прямоугольника вместо кольца $D_3 = \sqrt{4AB/\pi}$, где A, B — стороны прямоугольника.

шается сечение грунта, через которое происходит стекание тока с каждого заземлителя, сопротивление каждого электрода возрастает, и в результате сопротивление системы из n одинаковых электродов будет равно $R'_{\text{сист}} = R/n\eta = R_{\Pi}/\eta$, где η — коэффициент использования экранирования заземлителей. Коэффициенты η при стационарном режиме (табл. 11.2) зависят от отношения a/l и общего числа электродов n , они возрастают при увеличении отношения a/l и уменьшении числа электродов (в обоих случаях снижается эффект взаимного экранирования).

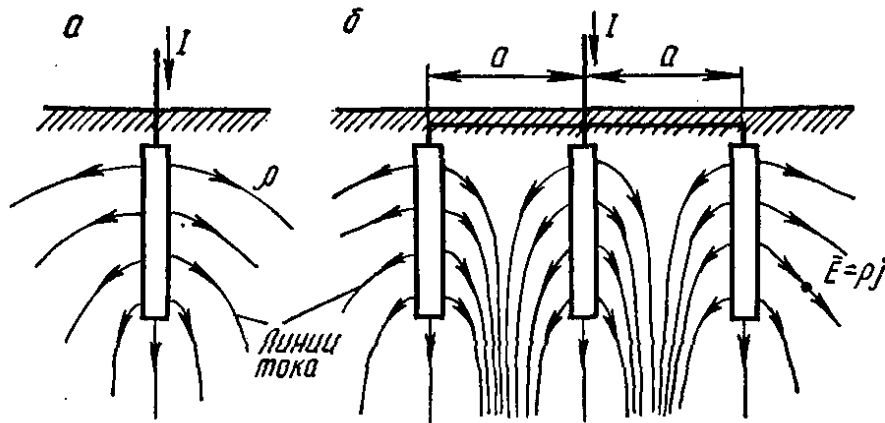


Рис. 11.3. Электрическое поле в земле при стекании тока с одиночного (а) и сложного (б) заземлителей.

Стационарное сопротивление сложного заземлителя, состоящего из n вертикальных электродов и соединительной полосы, может быть определено по формуле

$$R_{\text{сист}} = \frac{R_{\text{в}}}{n\eta_{\text{в}}} \parallel \frac{R_{\Pi}}{\eta_{\Pi}} = \frac{R_{\text{в}} R_{\Pi}}{R_{\text{в}} \eta_{\Pi} + R_{\Pi} n\eta_{\text{в}}},$$

где $R_{\text{в}}$, R_{Π} — сопротивления единичного вертикального электрода и соединительной полосы; $\eta_{\text{в}}$, η_{Π} — их коэффициенты использования.

Табл. 11.2. Коэффициенты использования η при стационарном режиме

a/l	Значение n				
	4	10	20	40	100
Вертикальные заземлители, расположенные по контуру ($\eta_{\text{в}}$)					
1	0,69	0,55	0,47	0,41	0,36
2	0,78	0,68	0,63	0,58	0,52
3	0,85	0,76	0,70	0,66	0,62
Соединительный электрод (полоса) контура вертикальных заземлителей (η_{Π})					
1	0,40	0,34	0,27	0,22	0,19
2	0,55	0,40	0,32	0,29	0,24
3	0,70	0,56	0,45	0,39	0,33

11.3. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ЗЕМЛИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТОВ

Основными составными частями земли являются твердые частицы органического и неорганического происхождения и вода. Электропроводность твердой основы грунта в сухом состоянии и химически чистой воды ничтожна. Однако содержащиеся в грунте различные соли и кислоты при наличии влаги создают электролиты и могут резко увеличить его электропроводность.

Влажность грунта, кроме количества осадков и близости грунтовых вод, определяется также его структурой. Чем меньше размер частиц и больше электро-

Табл. 11.3. Удельные сопротивления грунтов

Группа	Тип грунта	Удельное сопротивление ρ , Ом·м
1	Речная вода	10—50
	Торф	20
	Чернозем	50
	Глина	60
2	Лёсс, супесок, суглинок	100—300
3	Песок	300—500
4	Сухой песок	500—1000
5	Степной песок с глубиной пласта более 10 м; мягкие грунты при толщине слоя менее 1,5 м, на скальном основании	1000

литов (глина, чернозем), тем больше влагоемкость и выше электропроводность; при крупных частицах и малом количестве электролитов (например, песок) влагоемкость меньше и электропроводность также ниже. Ориентировочные значения удельных сопротивлений некоторых грунтов приведены в табл. 11.3.

Грунт, в котором размещаются заземлители, часто является неоднородным на глубине (рис. 11.4), и проектирование заземляющего устройства обычно ведется на основании результатов непосредственных измерений удельного сопротивления различных горизонтальных слоев грунта методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и с учетом сезонных изменений сопротивления верхнего слоя (нижние слои таким изменениям не подвержены).

Такие измерения обычно производятся в теплое время года, когда верхний слой грунта может быть увлажнен осадками. Так как при проектировании необходимо ориентироваться на наибольшие возможные значения ρ , то в качестве

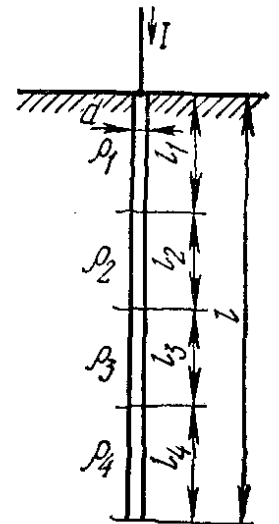


Рис. 11.4. Вертикальный заземлитель в неоднородном грунте.

расчетного значения для верхнего слоя (обычно толщиной 2 м) берут $\rho_{расч} = k\rho_{изм}$, где k — сезонный коэффициент (табл. 11.4).

Большие значения k для рабочих и защитных заземлений объясняются тем, что они работают круглый год и приходится считаться с резким увеличением ρ в зимний период за счет промерзания грунта.

Сопротивление одиночного вертикального заземлителя в неоднородном грунте подсчитывается по формуле

$$R_v = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i}{l_i} \ln \frac{l_i}{d},$$

где ρ_i, l_i — удельное сопротивление и толщина i -го слоя.

Табл. 11.4. Значения сезонного коэффициента k (для средней полосы СССР)

Заземление	Влажность почвы перед измерением		
	повышенная	средняя	пониженная
Рабочее и защитное	5,0	2,7	1,9
Грозозащиты	2,6	1,4	—

11.4. ЗАЩИТНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Ранее отмечалось, что заземления электроустановок делятся на рабочие, защитные и заземления грозозащиты. Выполнить практически все эти заземления в виде отдельных конструкций не представляется возможным, и поэтому обычно в качестве всех названных заземлений используется одно заземляющее устройство.

Наиболее тяжелые нормы в отношении сопротивления предъявляются к защитным заземлениям, поэтому заземляющие устройства электроустановок рассчитываются и проектируются как защитные.

Согласно ПУЭ, расчет заземляющих устройств производится по заданным значениям их сопротивления R_z . Это значительно сокращает объем вычислительных работ по сравнению с расчетом по напряжениям прикосновения и шага.

Наибольшие допустимые значения R_z , установленные ПУЭ для электроустановок свыше 1000 В, составляют: $R_z \leq 0,5$ Ом — при больших токах замыкания на землю (т. е. более 500 А); $R_z \leq 250/I_z$, но не более 10 Ом — при малых токах замыкания на землю во всех случаях; $R_z \leq 125/I_z$, но не более 10 Ом — в тех же случаях, если заземляющее устройство используется одновременно для установок ниже 1000 В. Как видно из приведенных выражений, в установках с малыми токами замыкания на землю напряжение прикосновения в самых неблагоприятных случаях не превысит 250(125) В. Фактически оно будет меньше этих величин из-за выравнивания потенциалов на территории электроустановки и ограничения R_z величиной 10 Ом.

При больших токах замыкания на землю принятое значение сопротивления $R \leq 0,5$ Ом является практически предельно возможным. Дальнейшее его уменьшение, как правило, трудно выполнимо и экономически невыгодно.

В качестве расчетного тока I_z в установках с большими токами замыкания на землю (к ним относятся в основном электроустановки с глухо заземленной нейтралью 110 кВ и выше) принимается наибольшее значение установившегося тока однофазного замыкания на землю, протекающего через рассчитываемое заземляющее устройство.

В установках с малыми токами замыкания на землю без компенсации емкостных токов расчетным является полный ток замыкания на землю, а в установках с компенсацией емкостных токов — остаточный ток замыкания на землю при отключении наиболее мощного из компенсирующих аппаратов.

При выполнении заземляющих устройств необходимо использовать все имеющиеся естественные заземлители, т. е. металлические элементы, проложенные в земле для других целей, но которые можно применять как электроды заземления (грозозащитные заземления опор ВЛ, металлические оболочки кабелей, водопроводные и другие металлические трубопроводы, металлические конструкции и арматура железобетонных зданий и сооружений, соединенные с землей и пр.).

На сопротивление естественных заземлителей влияют многие факторы, которые невозможно учесть при расчетах по формулам, и такие вычисления дают, как правило, значительную ошибку. Поэтому сопротивление естественных заземлителей рекомендуется определять путем непосредственных измерений с учетом в случае необходимости коэффициента сезонности (см. табл. 11.4).

Необходимое сопротивление искусственного заземления R_z при наличии естественных заземлителей определяют из выражения

$$R_{z.н} = \frac{R_{ест} R_z}{R_{ест} + R_z},$$

где $R_{z.н}$ — сопротивление заземления, требуемое по нормам; $R_{ест}$ — сопротивление естественных заземлителей.

Искусственные заземлители электроустановок представляют в общем случае контур, образованный вертикальными электродами 1 и полосами 2, соединяющими эти электроды. Для выравнивания напряжения на территории открытого распределительного устройства (ОРУ) и присоединения частей оборудования, подлежащих заземлению, по площади контура прокладывают соединительные полосы 3, образующие сетку (рис. 11.5).

Аналитический расчет сопротивления заземления такого заземлителя включает определение собственных сопротивлений элементов заземлителя и коэффи-

циентов использования, учитывающих взаимное экранирование отдельных частей заземлителя. Такой расчет требует большего числа вычислений, является достаточно сложным и все же оказывается в определенной мере приближенным.

В последнее время для расчета сложных заземлителей применяют метод физического моделирования заземлителей с исследованием их геометрически подобных моделей в электролитической ванне. Исследования показали, что если площадь, охватываемая полосовым заземлителем, постоянна, а отношение сторон b/a меняется в широких пределах, сопротивление такого контура остается практически неизменным. Это позволяет вести расчет сопротивления заземления таких контуров, заменив реальную конфигурацию контура эквивалентным по площади квадратом со стороной \sqrt{S} .

При выполнении заземлителя в виде сетки, а также в случае применения вертикальных электродов его сопротивление снижается, однако это снижение ограничивается эффектом экранирования. При достаточно густой сетке и наличии вертикальных электродов сопротивление R_3 практически не зависит от диаметра электродов d , глу-

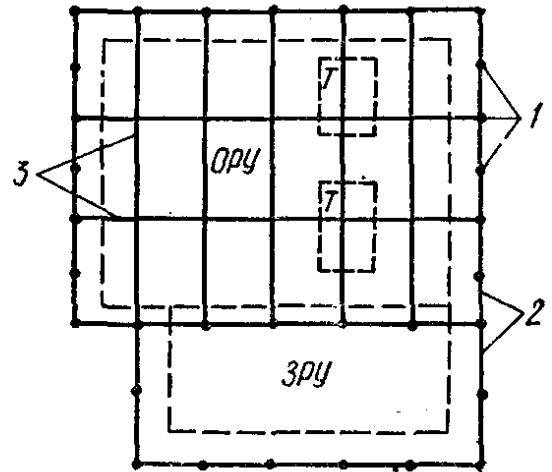


Рис. 11.5. Схема выполнения заземляющего контура подстанции. Пунктиром показаны границы РУ.

бины укладки горизонтального заземлителя и может быть определено приближенно по эмпирической формуле

$$R_3 = \rho \left(\frac{A}{\sqrt{S}} + \frac{l}{L + nl} \right),$$

где L — суммарная длина всех горизонтальных электродов, м; n, l — число и длина вертикальных электродов; A — коэффициент, зависящий от отношения l/\sqrt{S} :

l/\sqrt{S}	0	0,02	0,05	0,10	0,20	0,50
A	0,44	0,43	0,40	0,37	0,33	0,26

При большом числе ячеек сетки ($L \gg 4\sqrt{S}$) или большом n сопротивление R_3 стремится к пределу $\rho A/\sqrt{S}$, что соответствует сопротивлению растекания металлического параллелепипеда объемом Sl .

При прохождении через заземляющее устройство больших токов замыкания на землю вследствие недостаточной поверхности электродов возможны значительный нагрев грунта и испарение содержащейся в нем влаги, что приведет к резкому повышению сопротивления растекания и потенциала заземлителя. Кроме того, при недостаточном сечении заземляющих проводов возможен их чрезмерный нагрев и проводники могут даже перегореть. Поэтому заземлители и заземляющие проводники должны быть проверены на термическую устойчивость.

Заземлители, удовлетворяющие требованиям ПУЭ в отношении величины сопротивления заземления, обладают достаточной поверхностью и на термическую устойчивость не проверяются.

Проверка заземляющих проводов на термическую устойчивость производится лишь для установок свыше 1000 В с большими токами замыкания на землю по формуле

$$s \geq I_3 \sqrt{t/k},$$

где s — требуемое сечение заземляющего проводника, мм²; t — длительность замыкания на землю, с; I_3 — ток замыкания на землю, А; k — коэффициент, равный 74 для стали и 195 для меди.

При этом принято, что начальная температура провода 20 °С, а конечная 400 °С. Если заземляющие провода имеют сечение не менее 4×40 мм и ток замыкания на землю не превышает 10 кА, то они удовлетворяют термической устойчивости и проверке не подлежат.

11.5. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ ПРИ СТЕКАНИИ ТОКОВ МОЛНИИ

Импульсным сопротивлением заземлителя называют отношение импульсного падения напряжения на заземлителе к протекающему через него импульсному току: $R_{и} = U_{и}/I_{и}$.

При расчете импульсного сопротивления заземлителей, кроме ρ грунта, необходимо знать его импульсные характеристики, т. е. зависимость ρ от напряженности электрического поля и величину пробивной напряженности $E_{пр}$.

При стекании тока молнии плотностью j с заземлителя в грунте возникает электрическое поле с напряженностью $E = \rho j$. Исследования показали, что по мере увеличения E удельное сопротивление грунтов плавно уменьшается (на 10—60 % в зависимости от рода грунта). Это связано, по-видимому, с нелинейной проводимостью, свойственной всем полупроводникам, в том числе и грунтам. При дальнейшем увеличении плотности стекающего тока напряженность поля достигает пробивной, и в грунте около заземлителя начинается процесс искрообразования вследствие ионизации воздушных включений между частицами грунта. При еще бóльших значениях E искровой разряд переходит в дуговой с очень малым падением напряжения в зоне разряда. Рассмотренные явления приводят к значительному снижению сопротивления заземлителя.

Кратковременный характер воздействия тока молнии на заземлители приводит к необходимости разделять их на **сосредоточенные** и **протяженные**. К первым относят заземлители малой длины (например, вертикальные), когда потенциал всех точек заземлителя можно считать одинаковым. К протяженным относят заземли-

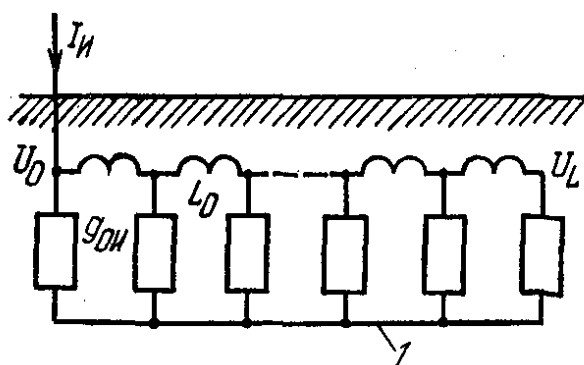


Рис. 11.6. Схема замещения протяженного заземлителя:

1 — уровень нулевого потенциала.

тели большой длины, вдоль которых нужно учитывать волновой процесс распространения тока молнии. Обычно это заземлители горизонтального типа, длина которых в ряде случаев достигает десятков и даже сотен метров. Такой заземлитель может быть представлен цепочечной схемой замещения, состоящей из удельной индуктивности L_0 и нелинейной проводимости $g_{он}$ (рис. 11.6). В первый момент падения волны напряжение на удаленных участках

заземлителя мало, и отвод тока будет происходить только на его начальных участках, т. е. сопротивление такого заземлителя возрастет.

Таким образом, в общем случае импульсное сопротивление заземлителя $R_{и} = \alpha R$, где α — импульсный коэффициент заземлителя; R — стационарное сопротивление заземлителя.

Усредненные значения коэффициента α приведены на рис. 11.7. Как видно из этого рисунка, для сосредоточенных заземлителей α

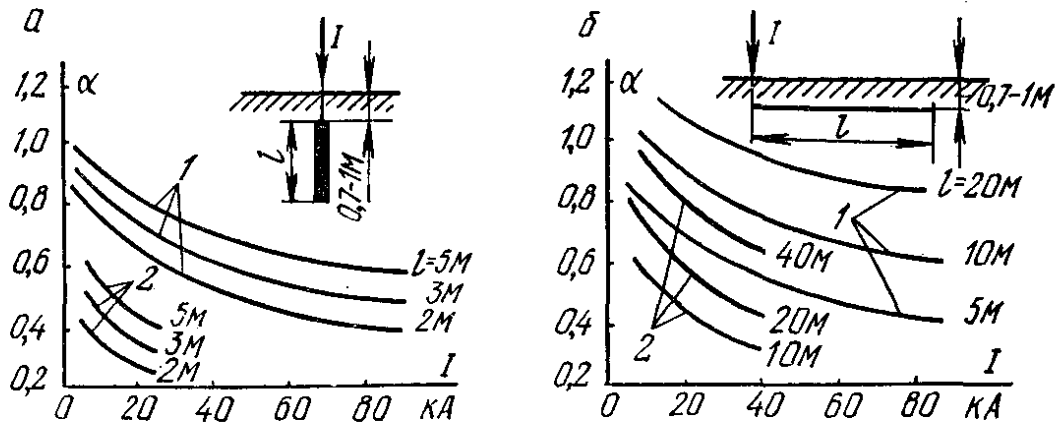


Рис. 11.7. Импульсные коэффициенты α одиночного вертикального (а) и лучевого (б) заземлителей:
1 — $\rho = 100$ Ом·м; 2 — $\rho = 1000$ Ом·м.

всегда меньше единицы и в тем большей степени, чем выше ρ грунта и стекающий ток, — это приводит к усилению процессов искрообразования. Для протяженных заземлителей при их большой длине преобладающее значение имеет индуктивность заземлителя, и его коэффициент α может стать значительно больше единицы. В таких условиях использование заземлителей большой длины становится нерациональным, так как импульсное сопротивление заземлителя с ростом его длины перестает уменьшаться. Ниже приведены предельные рационально используемые длины заземлителей $l_{пр}$ в грунтах с различным ρ при амплитуде тока 40 кА и длине фронта 3—6 мкс:

ρ , Ом·м	500	1000	2000	4000
$l_{пр}$, м	35—40	40—50	60—80	80—100

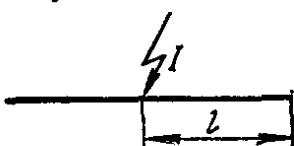
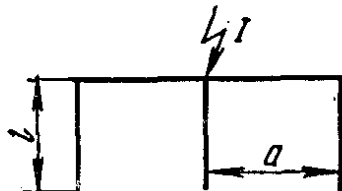
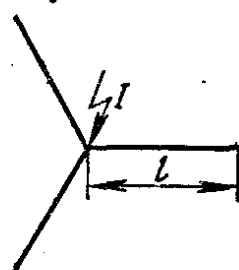
Импульсное сопротивление сложного заземлителя, состоящего из n вертикальных электродов, соединенных полосой длиной l , определяется по формуле

$$R_{и.сист} = \frac{R_{и.в} R_{и.п}}{R_{и.в} + n R_{и.п}} \frac{1}{\eta_{и}}$$

где $R_{и.в}$, $R_{и.п}$ — импульсное сопротивление одиночных вертикального и полосового заземлителей; $\eta_{и}$ — импульсный коэффициент использования сложного заземлителя, учитывающий взаимное экранирование расположенных поблизости друг от друга одиночных заземлителей (см. рис. 11.3). Коэффициент использования $\eta_{и}$ зависит от конструкции заземлителя, тока заземлителя, ρ грунта и $E_{пр}$.

Вследствие этого расчет импульсного коэффициента использования очень сложен и может быть выполнен только для простейших систем заземлителей (табл. 11.5).

Табл. 11.5. Коэффициенты использования и импульсные сопротивления некоторых типов заземлителей

Тип заземлителя	Длина лучей (труб) l , м	Число труб n	a/l	$\eta_{\text{и}}$	$R_{\text{и}}$, Ом
$\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$					
Двухлучевой	При любой длине	—	—	1	10 при $l = 3 \text{ м}$
					
Двухлучевой с трубами	2	2	2	0,80	10
	2	3	3	0,85	10
$\rho = 200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$					
	2	3	2	0,75	10
	2	3	3	0,80	10
$\rho = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$					
Трехлучевой	2	5	2	—	25
	10	—	—	0,75	25
	20	—	—	0,80	20
	40	—	—	0,85	16
	80	—	—	0,90	9
					

Нужно иметь в виду, что вследствие процесса искрообразования при стекании импульсных токов, что как бы сближает соседние электроды, коэффициент использования $\eta_{\text{и}}$ меньше этих же коэффициентов для случая стекания токов промышленной частоты.

11.6. ГРОЗОЗАЩИТНЫЕ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Молниеотводы, защищающие открытые подстанции, устанавливаются чаще всего на конструкциях ОРУ и оказываются, таким образом, присоединенными к рабочему (защитному) заземлению. При этом необходимо, чтобы растекание тока молнии от стоек конструкций ОРУ с молниеотводами происходило в нескольких направлениях. Кроме того, для уменьшения импульсного сопротивления контура заземления возле таких стоек должны быть установ-

лены дополнительно 2—3 вертикальных заземлителя длиной по 3—5 м.

Если защита ОРУ осуществляется отдельно стоящими молниеотводами, последние должны иметь обособленные заземлители, электрически не связанные с заземляющим контуром подстанции.

Заземление металлических опор ВЛ с тросами при грунтах 1-й и 2-й групп ($\rho \leq 300 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) выполняют, используя в качестве естественных заземлителей их железобетонные фундаменты.

В упомянутых выше грунтах при стекающих токах 10—20 кА импульсное сопротивление заземления железобетонных свайных фундаментов составляет 10—15 Ом, а фундаментов, выполненных из грибовидных подножников, — 5—10 Ом. В грунтах с удельным сопротивлением более 300—500 Ом·м необходимо устраивать дополнительный искусственный заземлитель в виде замкнутого контура, укладываемого на дно котлована до установки подножников.

Для заземления деревянных опор с тросами применяют искусственные сосредоточенные заземлители. Выбор типа заземлителя определяется в основном удельным сопротивлением грунта (см. табл. 11.5).

На участках, где сопротивление верхних слоев грунта велико (сухой песок с $\rho > 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), целесообразно устройство глубинных вертикальных заземлителей, при этом заземлители забиваются с помощью специальных станков на глубину до нескольких десятков метров, до слоя грунтовых вод.

11.7. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЙ И УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА

Наибольшее распространение для измерения сопротивления заземлений получил метод амперметра — вольтметра. На рис. 11.8 приведена схема измерения по этому методу сопротивления одиночного вертикального заземлителя R_x . Переменное напряжение от трансформатора T прикладывают к заземлителю R_x и вспомогательному электроду $BЭ$, и по цепи протекает ток I , измеряемый амперметром. Потенциал электрода R_x измеряют вольтметром, который включен между электродом R_x и зондом $З$, находящимся в точке нулевого потенциала. Электроды могут располагаться как по прямой, так и по вершинам треугольника. Необходимо только, чтобы расстояние между электродами R_x и $BЭ$ было не менее 40 м, а зонд $З$ находился в точке нулевого потенциала, т. е. на расстоянии не менее 20 м от электродов R_x и $BЭ$.

Искомое сопротивление заземлителя $R_x = \varphi_x / I$. Так как вольтметр, строго говоря, показывает не весь потенциал φ_x , а только его часть $U = \varphi_x - \varphi_B = \varphi_x - I_B R_B$, где I_B , R_B — ток, потребляемый вольтметром, и сопротивление зонда, то для уменьшения погрешности при измерениях необходимо применить вольтметры с большим внутренним сопротивлением ($R_B \gg R_3$).

Такая же схема может быть применена для измерения сопротивления заземлений подстанций, опор, молниеотводов и т. д., только при этом в ряде случаев расстояния между заземлением и электродом $BЭ$ и $З$, которые всегда должны на-

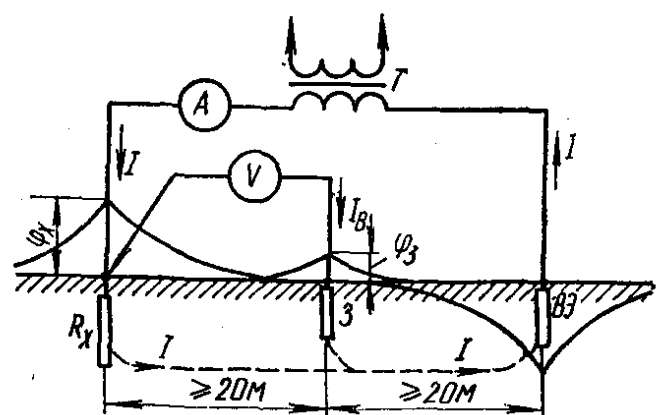


Рис. 11.8. Схема измерения сопротивления заземлителя.

ходиться вне поля растекания тока измеряемого заземлителя, возрастают и составляют в среднем (1,5—3) D , где D — наибольшая диагональ контура измеряемого заземления. На практике для измерения сопротивления заземляющих устройств широко применяют различные измерители заземлений.

Как указывалось ранее, при проектировании заземляющих устройств необходимо пользоваться значениями ρ грунта, полученными при непосредственных измерениях. Для этой цели измеряют сопротивление R_x одиночного, так называемого контрольного, электрода, погруженного в землю на участке расположения будущего заземления. В качестве контрольных желательно применять такие же электроды, которые будут использованы при устройстве заземления.

Зная сопротивление растекания R_x контрольного электрода, удельное сопротивление грунта определяют из формулы (11.1).

12. ЗАЩИТНЫЕ РАЗРЯДНИКИ

12.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Применение молниеотводов полностью не исключает поражения молнией электроустановок, особенно линий электропередачи, так как вероятность прорыва молнии для ВЛ может быть сравнительно высока, и, кроме того, они часто выполняются вообще без тросовой защиты. Волны перенапряжений, возникающие на линиях при ударах молнии, доходят до подстанций (поэтому их и называют **набегающими волнами**) и могут представлять опасность для изоляции установленного там оборудования.

Для предупреждения повреждения какой-либо изоляционной конструкции параллельно ей включают искровой промежуток ИП, вольт-секундная ($u-t$) характеристика которого должна лежать ниже $u-t$ -характеристики защищаемой изоляции (см. рис. 1.23). При соблюдении этого условия падение волны перенапряжения U_{II} вызовет во всех случаях пробой ИП с последующим резким падением («срезом») напряжения на ИП и защищаемой изоляции.

Вслед за импульсным током через искровой промежуток начнет протекать ток, обусловленный напряжением промышленной частоты электроустановки, — **сопровожающий ток**.

В установках с заземленной нейтралью или при пробое ИП в двух-трех фазах дуга сопровождающего тока самостоятельно может и не погаснуть, и импульсный пробой в этом случае перейдет в устойчивое короткое замыкание, что приведет к отключению установки. Поэтому, чтобы избежать такого отключения установки, необходимо обеспечить гашение дуги сопровождающего тока через ИП.

Устройства, которые обеспечивают не только защиту изоляции от перенапряжений, но и гашение дуги сопровождающего тока в течение времени, меньшего, чем время действия релейной защиты, называют **защитными разрядниками** в отличие от обычных искровых промежутков, которые принято называть **защитными промежутками** (ПЗ).

Существует два основных типа разрядников, отличающихся принципом гашения дуги сопровождающего тока: **трубчатые** (РТ),

в которых гашение дуги осуществляется за счет создания интенсивного продольного дутья, и **вентильные (РВ)**, в которых дуга гаснет благодаря уменьшению сопровождающего тока с помощью дополнительного сопротивления, включенного последовательно с искровым промежутком.

12.2. ТРУБЧАТЫЕ РАЗРЯДНИКИ

Трубчатый разрядник (рис. 12.1, *а*) представляет трубку 2 из изолирующего газогенерирующего материала, внутри которой имеется дугогасящий нерегулируемый промежуток S_1 , образованный стержневым электродом 3 и фланцем 4. Разрядник отделяется от

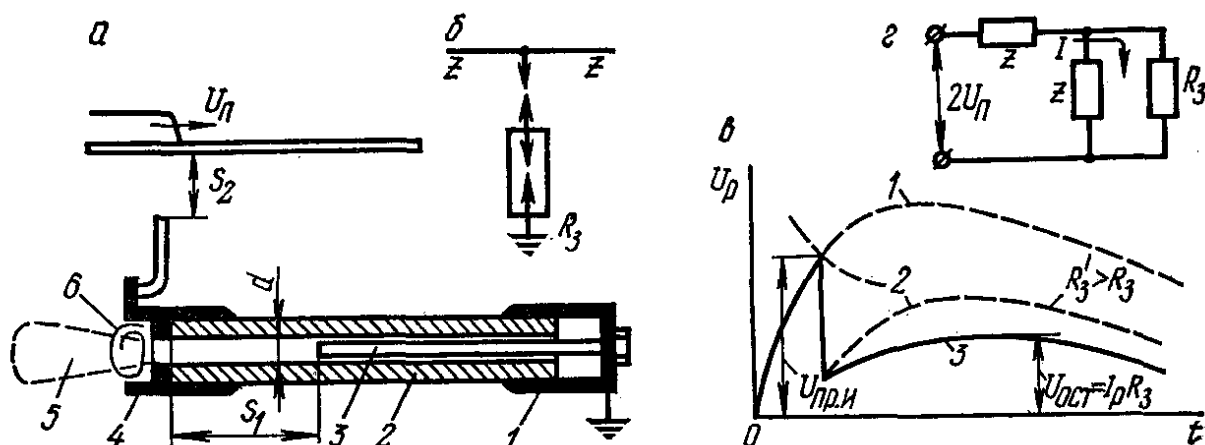


Рис. 12.1. Трубчатый разрядник:

а — устройство и схема включения; *б* — условное обозначение на схемах; *в* — напряжение на разряднике; *г* — схема замещения.

рабочего напряжения внешним искровым промежутком S_2 , так как трубка 2 не рассчитана на длительное нахождение под напряжением из-за разложения газогенерирующего материала под действием токов утечки. Второй фланец 1 разрядника заземляется.

При перенапряжении в сети (рис. 12.1, *в*) оба искровых промежутка пробиваются и волна перенапряжений (кривая 1) срезается. По пути, созданному импульсным разрядом, начинает протекать сопровождающий ток, и искровой разряд переходит в дуговой. Под действием высокой температуры канала дуги сопровождающего тока материал трубки разлагается с выделением большого количества газов, давление в ней резко возрастает (до десятков атмосфер) и газы с силой вырываются через отверстие фланца 4, создавая интенсивное продольное дутье. В результате дуга гаснет при первом же прохождении тока через нуль.

При срабатывании разрядника из него выбрасываются раскаленные ионизированные газы в виде факела 5 длиной 1,5—3,5 м и шириной 1—2,5 м (в зависимости от номинального напряжения разрядника) и раздается звук, напоминающий выстрел. Поэтому для предупреждения междуфазовых замыканий при монтаже разрядников нужно следить, чтобы в зону выхлопа не попали токоведущие части соседних фаз.

Напряжение срабатывания разрядников можно регулировать, изменяя расстояние внешнего искрового промежутка S_2 , но их нель-

зя снижать ниже определенного минимума, так как это вызывает слишком частые срабатывания разрядников и их повышенный износ. Минимальные расстояния внешнего промежутка приведены ниже:

$U_{\text{НОМ}}$, кВ	3	6	10	35	110	220
S_2 , мм	8	10	15	100	400	500

Величину остающегося напряжения (кривые 2 и 3 на рис. 12.1, в) можно оценить, составив по правилу Петерсена схему замещения линии с трубчатым разрядником после пробоя его искровых промежутков (рис. 12.1, г). Так как $z \gg R_3$, то сопротивлением z , включенным параллельно R_3 , можно пренебречь. Тогда $U_{\text{ост}} = I_p R_3 = = 2 U_{\text{п}} R_3 / (z + R_3)$, т. е. $U_{\text{ост}}$ определяется в основном сопротивлением заземления разрядника R_3 , которое должно быть по возможности малым. По нормам, $R_3 \leq 10$ Ом, следовательно, при $z = 400$ Ом $U_{\text{ост}} \approx 0,05 U_{\text{п}}$.

Так как электрическое поле стержневых электродов трубчатого разрядника резконеоднородно, то его вольт-секундная характеристика имеет падающий характер на участке до 6—8 мкс, что плохо согласуется с пологими вольт-секундными характеристиками трансформаторов и электрических машин.

Для успешного гашения дуги необходима определенная интенсивность газообразования, поэтому существует нижний предел отключаемых токов I_{min} , при котором разрядник еще может погасить дугу в течение 1—2 полупериодов. Верхний предел отключаемых токов I_{max} также ограничивается, так как слишком интенсивное газообразование может привести к разрушению разрядника (разрыву трубки или срыву фланцев).

Диапазон отключаемых токов указывается в обозначении типа разрядника, например РТВ $\frac{35}{0,5-2,5}$ означает трубчатый разрядник винипластовый на 35 кВ с пределами отключаемых токов 0,5—2,5 кА.

При уменьшении длины дугогасящего промежутка S_1 и увеличении его диаметра d оба предела отключаемых токов разрядника смещаются в сторону бóльших значений. Так как работа разрядника сопровождается выгоранием части материала дугогасящей трубки, то после 8—10 срабатываний, когда диаметр d возрастает на 20—25 % по сравнению с первоначальным, разрядник становится непригодным (так как изменяются пределы отключаемых им токов) и подлежит замене. Для учета числа срабатываний РТ снабжаются указателем срабатывания в виде металлической ленты б (см. рис. 12.1, а), разгибаемой выбрасываемыми разрядником газами.

В настоящее время промышленностью выпускаются трубчатые разрядники типа РТФ, в которых газ генерируется фибровой трубкой, и типа РТВ с трубкой из винипласта. Вследствие малой механической прочности фибры она заключается в толстую трубку из бакелизированной бумаги, которая для уменьшения ее гигроскопич-

ности покрывается влагостойким лаком (обычно перхлорвиниловой эмалью), хорошо выдерживающим атмосферные воздействия летнего и зимнего периодов. Особенностью разрядников типа РТФ является наличие камеры у закрытого конца трубки, которая усиливает продольное дутье при прохождении тока через нулевое значение и способствует тем самым гашению дуги.

В разрядниках РТВ газ генерируется трубкой из винипласта, который обладает более высокой газогенерирующей способностью и изолирующими свойствами, хорошо сохраняющимися даже при работе на открытом воздухе при любой погоде. Разрядники РТВ имеют более простую конструкцию (у них нет внутренней камеры, не требуют лакировки) и более высокие верхние пределы отключаемых токов (15 кА вместо 7—10 кА для разрядников РТФ).

Для работы в сетях с очень большими отключаемыми токами (до 30 кА) выпускаются усиленные разрядники типа РТВУ, повышенная механическая прочность которых достигается путем обмотки винипластовой трубки слоями стеклоленты, пропитанной атмосферостойким эпоксидным компаундом.

Импульсная пропускная способность трубчатых разрядников, которые пропускают через себя практически весь ток молнии при ударе ее в линию, достаточно высока и составляет 30—70 кА.

Выбор трубчатых разрядников производится по номинальному напряжению сети и пределам токов короткого замыкания сети в точке установки РТ. Максимальный ток к.з. рассчитывают при условии включения всех элементов сети (линии, трансформаторы, генераторы) с учетом апериодической составляющей тока к.з., минимальный ток — при схеме сети с частично выключенными элементами (например, для капитального ремонта) и без учета апериодической составляющей. Найденные пределы тока к.з. должны укладываться в пределы отключаемых токов трубчатого разрядника, т. е. $I_{\min} \leq I_{\text{к.з. min}}$; $I_{\text{к.з. max}} \leq I_{\text{max}}$.

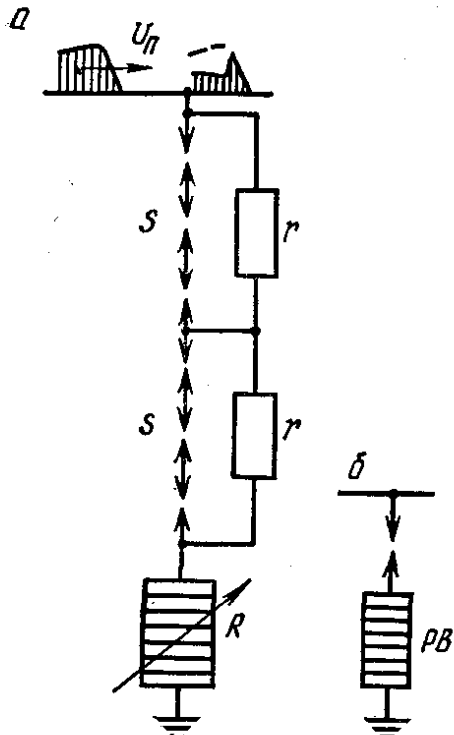
Трубчатые разрядники выпускаются в соответствии с ГОСТ 11475—69 на напряжения от 3 до 220 кВ, отключаемые токи лежат в пределах от 0,2—7 и 1,5—30 кА при напряжении 3—35 кВ до 0,4—7 и 2,2—30 кА при напряжении 110 кВ. Разрядник на 220 кВ состоит из двух трубчатых разрядников на 110 кВ, соединенных между собой стальной обоймой с выхлопными патрубками.

Основными недостатками трубчатых разрядников являются наличие зоны выхлопа, крутой срез волны перенапряжения, замыкание (хотя и кратковременное) линий на землю и особенно крутая вольт-секундная характеристика, исключающая возможность широкого применения РТ в качестве аппарата защиты подстанционного оборудования. Недостатком трубчатых разрядников является также наличие предельных отключаемых токов, что осложняет их производство и эксплуатацию.

Благодаря своей простоте и низкой стоимости трубчатые разрядники широко применяются в качестве вспомогательных средств защиты подстанций, для защиты маломощных и малоответственных подстанций, а также отдельных участков линий.

12.3.1. Принцип действия и основные характеристики

Вентильный разрядник (РВ) (рис. 12.2) состоит из системы соединенных последовательно искровых промежутков S и варистора (нелинейного сопротивления) R . Сопротивление варистора в значительной степени зависит от приложенного напряжения, поэтому его вольт-амперная характеристика (и соответственно разрядника в целом) также нелинейна (кривая 1 на рис. 12.3, б).



Работает вентильный разрядник следующим образом. Когда мгновенное значение волны перенапряжения $U_{\text{п}}$ на разряднике достигнет импульсного пробивного напряжения искровых промежутков $U_{\text{пр.и}}$ (рис. 12.3, а), они пробиваются и срезают волну перенапряжения. Сопротивление разрядника при этом мало, и через него протекает значительный по величине импульс-

Рис. 12.2. Устройство (а) и схема включения (б) вентильного разрядника.

ный ток $I_{\text{р}}$, который и определяет напряжение на разряднике. Наибольшее напряжение на разряднике при максимально допустимом импульсном токе через него $I_{\text{доп.и}}$ называют **остающим напряжением** $U_{\text{ост}}$. Это напряжение должно быть примерно на 20—25% меньше импульсной прочности защищаемой изоляции (так называемый координационный интервал $U_{\text{к}}$ на рис. 12.3, б).

После прохождения импульсного тока через разрядник начинает протекать сопровождающий ток промышленной частоты $I_{\text{сопр}}$, обусловленный рабочим напряжением сети. Так как это напряжение

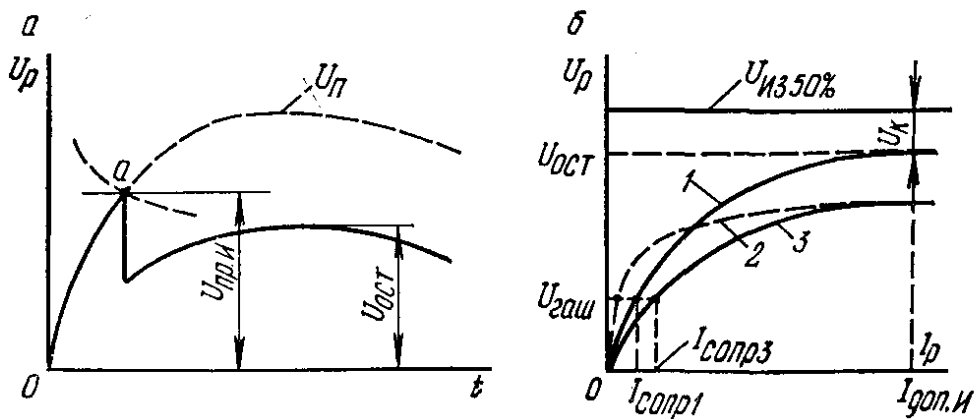


Рис. 12.3. Срез волны вентильным разрядником (а) и его вольт-амперные характеристики (б).

значительно ниже значений перенапряжения, то сопротивление варисторов резко возрастает и величина сопровождающего тока ограничивается до значения, при котором дуга, разбитая к тому же в искровых промежутках на большое число отдельных дужек небольшой длины, легко ими гасится. Таким образом, в основе работы вентильного разрядника лежит зависимость его сопротивления R от величины приложенного напряжения, поэтому разрядники и названы вентильными.

Защитное действие вентильных разрядников определяется рядом параметров.

Импульсное пробивное напряжение $U_{пр.и}$ и близкое к нему по величине остающееся напряжение $U_{ост}$ должны быть ниже импульсной прочности защищаемой изоляции, т. е. их величина определяет уровень изоляции электрических установок.

Пробивное напряжение $U_{пр 50}$ при 50 Гц должно быть выше возможных амплитуд внутренних перенапряжений, чтобы исключить при этом срабатывание грозовых разрядников.

Напряжение гашения дуги $U_{гаш}$, при котором надежно обрывается проходящий через разрядник сопровождающий ток (называемый током гашения $I_{гаш}$), должно быть выше максимально возможного напряжения на разряднике при гашении дуги, иначе разрядник может не погасить дугу сопровождающего тока при первом прохождении его через нуль и выйдет из строя. Так как во время одной и той же грозы (разряда молнии) могут произойти и пробой изоляции в одной фазе, и срабатывание разрядника в других, то напряжение гашения должно быть равно напряжению на неповрежденных фазах при однофазном замыкании на землю: $U_{гаш} = k_3 U_{ном}$, где $U_{ном}$ — номинальное линейное напряжение; k_3 — коэффициент, зависящий от способа заземления нейтрали (см. п. 12.3.5). Условия гашения дуги в РВ характеризуются коэффициентом $k_{гаш} = U_{пр}/U_{гаш}$.

Важной характеристикой вентильных разрядников является коэффициент защиты

$$k_{защ} = U_{ост}/U_{гаш}.$$

Так как $U_{гаш}$ зависит от номинального напряжения установки, то $k_{защ}$ определяет значение $U_{ост}$ разрядника, т. е. требуемый уровень изоляции сети. Снижение уровня изоляции (снижение $k_{защ}$) при сохранении надежности защиты ее с помощью РВ может быть достигнуто или путем применения разрядников с более пологой вольт-амперной характеристикой (кривая 2 на рис. 12.3, б), или путем увеличения тока гашения за счет улучшения дугогасящих свойств искровых промежутков (кривая 3).

Пропускная способность разрядников оценивается наибольшими амплитудами импульсного и сопровождающего токов, а также наибольшей энергией, выделяющейся при этом в разряднике, которые не вызывают изменения их электрических характеристик. Пропускная способность определяется материалом и конструктивными размерами варисторов разрядника.

В заключение нужно отметить, что вентильные разрядники являются основными аппаратами в схемах защиты изоляции электрооборудования станций и подстанций.

12.3.2. Искровые промежутки

Искровые промежутки S вентильных разрядников делаются многократными, т. е. состоящими из большого числа последовательно соединенных единичных промежутков. На рис. 12.4, а изображен единичный промежуток с неподвижной дугой разрядников серий РВП и РВС. Этот промежуток образован штампованными латунными шайбами 1, разделенными миканитовой кольцевой прокладкой 2. Электрическое поле промежутка близко к однородному.

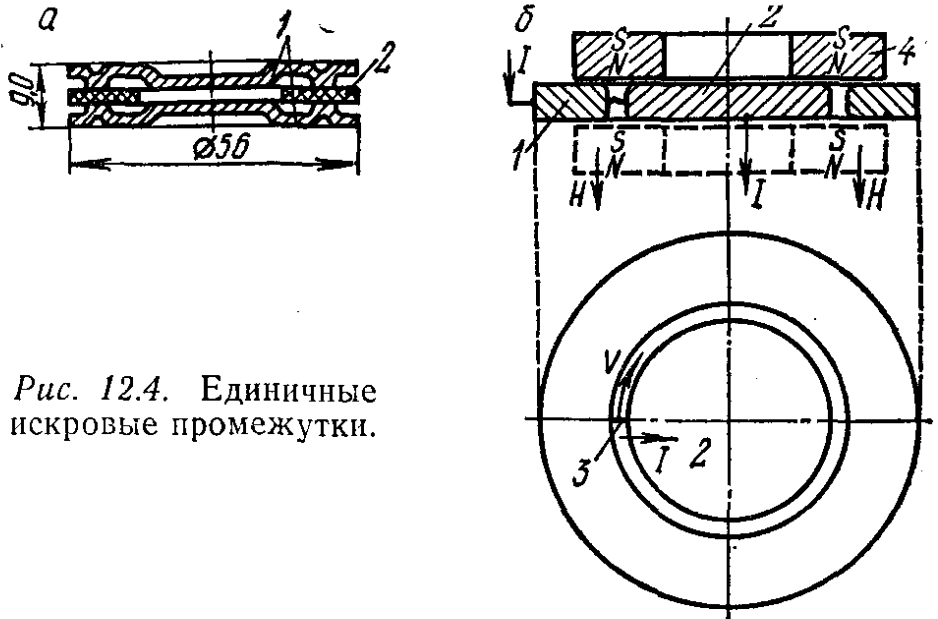


Рис. 12.4. Единичные искровые промежутки.

При действии импульсного напряжения в воздушных зазорах в местах соприкосновения миканитовой прокладки с латунными шайбами возникает коронный разряд, подсвечивающий промежуток и снижающий тем самым время статистического запаздывания t_c .

Количество единичных промежутков в разряднике устанавливают из расчета примерно 1 промежуток на 1—2 кВ фазового номинального напряжения разрядника. Таким образом, дуга сопровождающего тока оказывается разбитой на ряд дуг малой длины, что обеспечивает при токах $I_{сопр}$ до 100 A_m надежное гашение дуги при первом же прохождении тока через нуль. Это объясняется тем, что процессы в дуге при малой ее длине определяются в основном явлениями у электродов (см. п. 1.3.6). При указанных токах термоэлектронная эмиссия еще не наступает и основным видом ионизации промежутка является электростатическая эмиссия, которая при прохождении тока и напряжения разрядника через нуль прекращается практически мгновенно.

При сопровождающих токах свыше 100 A_m и неподвижной дуге электроды промежутков нагреваются настолько, что становится возможной термоэлектронная эмиссия, и вследствие значительной тепловой инерции электродов гашения дуги при прохождении тока

через нуль не происходит. Поэтому в разрядниках с пониженным значением $U_{ост}$ (т. е. с меньшим значением $k_{защ}$ и повышенной величиной $I_{гаш}$) применяют промежутки с подвижной дугой. Такой промежуток (рис. 12.4, б) представляет зазор между кольцом 1 и диском 2. Дуга 3, горящая между этими электродами, в результате взаимодействия с магнитным полем H , создаваемым постоянным магнитом 4, перемещается с большой скоростью v по кольцевому зазору, что облегчает вследствие меньшего нагревания электродов гашение дуги. Указанные промежутки надежно гасят дугу при $I_{сопр}$ до 250—300 А_т и применяются в разрядниках серии РВМ (разрядник вентильный с магнитным гашением).

Принцип действия искровых промежутков с растягивающейся дугой показан на рис. 12.5. Два электрода 1 располагаются между стенками дугогаситель-

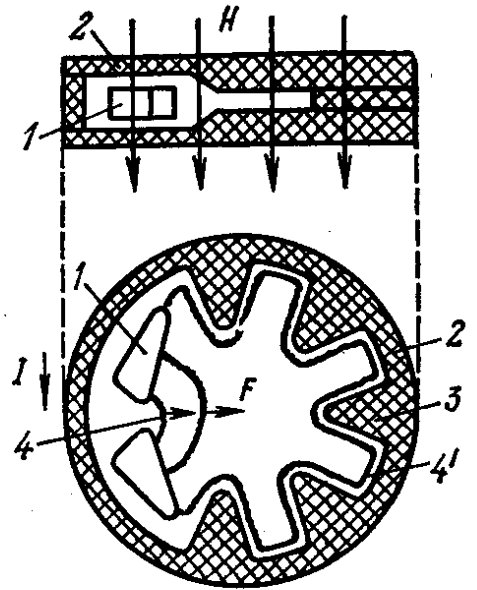


Рис. 12.5. Искровой промежуток с растягивающейся дугой.

ной камеры 2 в магнитном поле H . В таком поле на дугу 4 сопровождающего тока действует сила F , в результате чего дуга перемещается и растягивается между перегородками 3 камеры 2, стремясь занять конечное положение 4', охлаждается и гаснет. Стенки камеры 2 изготавливаются из дугостойкой керамики. Промежутки с растягивающейся дугой применяются в разрядниках серий РВТ и РВРД.

Для увеличения пробивного напряжения разрядников при промышленной частоте и облегчения гашения дуги сопровождающего тока распределение напряжения по искровым промежуткам при 50 Гц должно быть равномерным. Для этого искровые промежутки шунтируют резисторами r (см. рис. 12.2), сопротивление которых выбирают так, чтобы через них протекал ток, превышающий в несколько раз емкостный ток искровых промежутков.

При импульсных напряжениях многократный искровой промежуток представляет емкостную цепочку, подобную, например, схеме замещения гирлянды изоляторов. Импульсное напряжение по такой цепочке распределяется очень неравномерно, что и приводит к быстрому каскадному пробою всех промежутков разрядника. Сочетание неравномерного распределения напряжения по промежуткам с предварительной ионизацией единичного промежутка с достаточно однородным полем обеспечивает низкие коэффициенты импульса и пологие вольт-секундные характеристики вентильных разрядников.

В разрядниках на 110 кВ и выше число одиночных промежутков столь велико, что неравномерность распределения напряжения при крутых фронтах волн приводит к коэффициенту импульса меньше единицы. Для того чтобы удержать этот коэффициент близким

к единице, разрядники при таком напряжении приходится снабжать экранирующими кольцами, способствующими, как и в гирляндах изоляторов, выравниванию распределения напряжения по изоляторам.

12.3.3. Варисторы вентиляных разрядников

Рабочие сопротивления (варисторы) R разрядника изготавливаются из порошка электротехнического карборунда SiC . На поверхности зерен карборунда имеется тонкий запорный слой из окиси кремния SiO_2 .

Удельное сопротивление собственно зерен карборунда невелико — порядка 10^{-2} Ом·м, а сопротивление запорного слоя нелинейно зависит от напряженности электрического поля. При малых напряженностях (небольших напряжениях на варисторе) удельное сопротивление запорного слоя составляет 10^4 — 10^6 Ом·м, все приложенное напряжение падает при этом на запорный слой, который и определяет сопротивление варистора. При повышении напряженности поля сопротивление за-

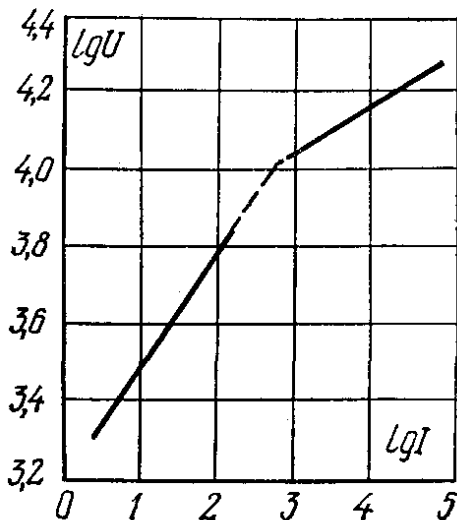


Рис. 12.6. Вольт-амперная характеристика вилитового диска ($d=100$ мм, $h=60$ мм).

порного слоя резко падает и величина сопротивления варистора начинает определяться сопротивлением собственно карборунда.

Рабочие сопротивления вентиляных разрядников выполняются в виде дисков, состоящих из карборундового порошка и связующего вещества. В вилитовых дисках в качестве связки применяют жидкое стекло. Обжиг дисков производят при температуре порядка 300°C , при этом вентиляльные свойства запорного слоя практически не нарушаются. Плоскости, которыми диски соприкасаются, для лучшего электрического контакта металлизуются алюминием, а боковые поверхности для защиты покрываются изолирующей обмазкой.

Вольт-амперные характеристики варисторов имеют вид, показанный на рис. 12.6, и хорошо описываются на каждом участке выражением

$$\lg U = \lg A + \alpha \lg I$$

или

$$U = AI^\alpha, \quad (12.1)$$

где A — коэффициент, определяемый опытным путем при $I=1$ А; α — коэффициент нелинейности варистора. Коэффициент α вилита составляет 0,11—0,2 в диапазоне грозовых токов ($I > 2000$ А) и 0,28—0,32 в диапазоне сопровождающих токов ($I < 2000$ А).

Кроме низкого коэффициента нелинейности, рабочие варисторы разрядников должны обладать достаточной пропускной способ-

ностью, и их электрические характеристики не должны меняться при многократной работе. Выделение в варисторе слишком большого количества энергии может привести к тому, что диск будет пробит и потеряет свои вентильные свойства. Поэтому пропускная способность варистора зависит от амплитуды и длительности проходящего через него тока. Например, вилитовый диск диаметром 100 мм выдерживает без повреждений не менее 20—30 раз ток 10 кА при длительности импульса 20/40 мкс и ток 150—200 А при длительности прямоугольного импульса 2000 мкс.

Материал, получаемый на основе карборунда и жидкого стекла и обжигаемый при температуре $t \approx 1000^\circ\text{C}$, называется **тервитом**. Вследствие обжига при повышенной температуре запорный слой зерен карборунда частично разрушается, поэтому нелинейные свойства тервита оказываются хуже, чем у вилита ($\alpha = 0,15—0,25$ в области грозовых токов и $0,35—0,38$ в области сопровождающих токов), но стабильность характеристик и пропускная способность выше. В частности, тервитовые диски диаметром 115 мм выдерживают без повреждений токи до 1500 А при длительности импульса 2000 мкс. Поэтому тервит применяется в разрядниках, предназначенных для защиты от коммутационных перенапряжений, где важно иметь большую пропускную способность.

Для изготовления варисторов r (см. рис. 12.2) применяют обычно **тирит**, связкой в котором является глина; обжигается тирит при $t \approx 1200^\circ\text{C}$. Тирит отличается от вилита и тервита большей стабильностью свойств; $\alpha = 0,3—0,4$ (в области сопровождающих токов).

Вольт-амперная характеристика разрядника хорошо выражается соотношением, аналогичным (12.1):

$$U_p = m A I_p^\alpha,$$

где m — количество дисков варистора в разряднике. Постоянные A и α должны быть взяты для соответствующих участков характеристики.

Предельно допустимым импульсным током для вилитовых и тервитовых дисков РВ является ток $I_{\text{доп.и}} = 5—14$ кА (в зависимости от их диаметра). Токи молнии, как известно, могут достигать значительно больших значений. Поэтому импульсные токи, проходящие через разрядники, необходимо ограничивать до допустимой величины путем применения схем защитного подхода (см. гл. 14).

За последние годы разработаны и освоены промышленностью высоконелинейные керамические резисторы на основе окиси цинка (резисторы оксидные нелинейные керамические — РОНК). Они изготавливаются в виде дисков диаметром 28 мм и высотой 8 мм с металлизированными торцами, которые служат контактами. Основной особенностью РОНК является высокая нелинейность — коэффициент α для них в выражении (12.1) в диапазоне токов от 10^{-5} до 10 А равен 0,02, при больших токах α возрастает (при $I = 1000$ А примерно до 0,1). Пропускная способность РОНК достаточно высока — они выдерживают не менее 20 импульсов 8/20 мкс при токе 3 кА и 20 прямоугольных импульсов 2 мс при токе 100 А.

12.3.4. Конструктивные особенности вентильных разрядников различных серий

Разрядники на напряжения 3—35 кВ выпускаются в виде одного элемента, на напряжения 110 кВ и выше комплектуются из нескольких элементов на 33 кВ. Каждый элемент является самостоятельной единицей и содержит искровые промежутки и блоки варисторов. Искровые промежутки, собранные по четыре в общем фарфоровом чехле и шунтированные для лучшего распределения напряжения промышленной частоты варистором r , образуют стандартный комплект промежутков. Для защиты от воздействия внешней среды все элементы разрядников помещаются в фарфоровый чехол, который снабжается металлическими крышками, являющимися выводами разрядника, и вся конструкция тщательно герметизируется.

По ГОСТ 16357—70, который устанавливает требования к электрическим характеристикам вентильных разрядников, они разделены на четыре группы. К I группе отнесены разрядники с наилучшими защитными свойствами, т. е. имеющие наименьшие значения остающихся напряжений; к этой группе относятся разрядники серий РВТ и РВД с $k_{\text{защ}} \approx 1,7$. Затем следуют разрядники II группы серии РВМ с $k_{\text{защ}} \approx 2,2$ разрядники III группы серии РВС и IV группы серии РВП (обе с $k_{\text{защ}} \approx 2,6$).

Облегченные разрядники серии РВП применяются для защиты изоляции подстанций напряжением 3—10 кВ. Они имеют варисторы из вилитовых дисков диаметром 55 мм, импульсный ток для них не должен превышать 5 кА.

Разрядники унифицированной серии РВС служат для защиты электрооборудования подстанций и выпускаются в виде элементов на напряжения 15, 20, 33 и 35 кВ, причем элемент на 33 кВ предназначен исключительно для комплектования разрядников на напряжения 110—220 кВ. Пропускная способность разрядников 10 кА (диаметр вилитовых дисков 100 мм).

Вентильные разрядники с магнитным гашением маркируются на напряжения 3—35 кВ как РВМ, на напряжения 110 кВ и выше как РВМГ (грозозащитные). Разрядники РВМ применяются в основном для защиты изоляции вращающихся машин, так как их характеристики лучше выпускавшихся ранее специально для этой цели разрядников серии РВММ. На напряжения 3—35 кВ разрядники выпускаются в виде отдельных элементов, на напряжения 110 кВ и выше комплектуются из нескольких элементов. В разрядниках применяются вилитовые диски диаметром 150 мм, что позволяет вдвое увеличить пропускную способность по сравнению с разрядниками серии РВС. Поэтому разрядники РВМГ применяются также для защиты от кратковременных внутренних перенапряжений.

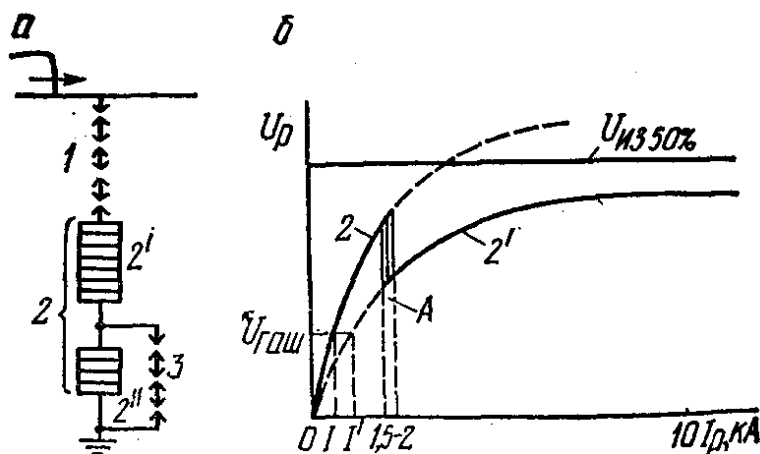
Для защиты изоляции как от грозových, так и от внутренних перенапряжений выпускаются **комбинированные разрядники серии РВМК**. Эти разрядники предназначены для ограничения как грозо-

вых перенапряжений при токах до 10 кА и длительностью 25—50 мкс, так и коммутационных, при которых токи, протекающие через разрядник, обычно не превышают 1,5—2 кА, но имеют длительность до 2000 мкс. Для обеспечения необходимой пропускной способности разрядников их рабочее сопротивление изготавливают из тервита (три параллельные колонки дисков диаметром по 70 мм).

Вследствие высокого значения коэффициента α тервита остающееся напряжение при прохождении расчетного импульсного тока (10 кА) значительно превышает допустимые значения. Поэтому в разрядниках РВМК используется схема, показанная на рис. 12.7, а.

Рис. 12.7. Схема разрядника РВМК (а) и его вольт-амперная характеристика (б):

А — область переключения в грозовой режим.



При внутренних перенапряжениях, когда токи, протекающие через разрядник, не превышают 1,5—2 кА, работают искровые промежутки 1 и рабочие сопротивления 2, падение напряжения на рабочем сопротивлении 2'' при этом недостаточно для срабатывания промежутков 3; сопровождающий ток разрядника 1 ограничен до величины, при которой он гасится промежутками 1.

При атмосферных перенапряжениях, когда токи, протекающие через разрядники, превышают 1,5—2 кА, срабатывает промежуток 3 и часть рабочего сопротивления 2'' шунтируется, в работе остается только часть рабочего сопротивления 2'. Характеристика разрядника при этом (кривая 2' на рис. 12.7, б) идет ниже характеристики разрядника при внутренних перенапряжениях (кривая 2); сопровождающий ток I' , определяемый сопротивлением 2', гасится промежутками 1 и 3. Разрядники РВМК выпускаются на напряжения 330—750 кВ.

В магнитно-вентильных разрядниках РВТ (разрядник вентильный токоограничивающий) применены токоограничивающие искровые промежутки с узкой щелью (см. рис. 12.5). Магнитное поле H создается катушками, включенными последовательно с искровыми промежутками S . За время протекания импульсного тока дуга не успевает существенно растянуться и сопротивление ее невелико (как и в остальных типах искровых промежутков). При протекании сопровождающего тока промышленной частоты дуга вводится в «узкую щель» разрядника, растягивается, ее сопротивление возрастает и величина сопровождающего тока ограничивается уже не только сопротивлением рабочего варистора разрядника, но и сопротивлением дуги. Это позволяет уменьшить сопротивление варистора, что приводит к дальнейшему снижению (по сравнению с разряд-

никами серии РВМ) остающегося напряжения и, следовательно, к улучшению характеристик разрядников.

Варисторы разрядников РВТ на напряжения 3—10 кВ комплектуются из тервитовых дисков диаметром 70 мм, а разрядников 110—500 кВ — из тервитовых дисков диаметром 100 мм. Остающееся напряжение разрядников РВТ примерно на 20 % ниже, чем разрядников серии РВМ, при этом у разрядников РВТ на 3—10 кВ, предназначенных для защиты вращающихся машин, импульсное пробивное напряжение и остающееся напряжение при токе 3 кА не превышают испытательных напряжений изоляции машин.

Высокая пропускная способность тервита позволяет применять разрядники этой серии также для ограничения внутренних перенапряжений.

Разрядники серии РВРД (с растягивающейся дугой) аналогичны разрядникам серии РВТ, несколько отличаясь от последних конструкцией. В частности, у разрядников РВРД магнитное поле создается постоянными магнитами вместо катушек; дугогасящие камеры изготовлены из более пористой керамики. По своим импульсным характеристикам они не отличаются от разрядников РВТ, однако за счет улучшенных условий гашения дуги напряжение гашения у разрядников РВРД примерно на 25 % выше, чем у разрядников РВТ, что существенно повышает эффективность их действия. Выпускаются разрядники РВРД на напряжения 110 кВ и выше.

Для защиты сетей напряжением до 500 В выпускается разрядник типа РВН-0,5; его пробивное напряжение при 50 Гц составляет 2,5—3 кВ при импульсах не более 4,5 кВ; остающееся напряжение — не более 2,5 кВ (при токе 5 кА).

Высокая нелинейность РОНК позволяет выполнить аппараты для защиты от перенапряжений без применения искровых промежутков. При этом токоограничивающие резисторы таких аппаратов (они получили название **нелинейных ограничителей перенапряжений** — ОПН) постоянно находятся под напряжением.

Табл. 12.1. Электрические характеристики вентильных разрядников

Тип разрядника	U рабочее наибольшее, кВ _д	$U_{пр}$ 50, кВ _д		$U_{пр. н.}$ кВ (не более)	$U_{ост}$ при импульсном токе (кА) с $T_{ф} = 10$ мкс, кВ (не более)		
		не менее	не более		3	5	10
РВМ-6	7,6	15	18	17	17	18	20
РВМ-10	12,7	25	30	28	28	30	33
РВМ-10	12,7	25	30	35	35	37,5	41,5
РВМ-35	40,5	70	83	105	97	105	116
РВМГ-110	100	170	195	265	245	265	295
РВС-110	100	200	250	285	315	335	367
РВМГ-330	205	485	560	700	—	730	800
РВМГ-500	420	712	828	1200	—	1060	1180
РВТ-500	420	630	725	940	805	890	1010
ОПН-500	—	—	—	—	—	860	920

В табл. 12.1 приведены основные электрические характеристики некоторых разрядников, там же для сравнения приведены данные об ОПН-500.

Как видно из табл. 12.1, значения остающихся напряжений ОПН при импульсных токах ниже остающихся напряжений даже таких разрядников, как РВТ. При коммутационных импульсах остающиеся напряжения ОПН также ниже соответствующих напряжений вентильных разрядников на 15—25 %.

Выпускаемые в настоящее время ОПН по высоте близки к опорным изоляционным конструкциям соответствующего класса напряжений, поэтому их можно использовать на подстанциях в качестве таких конструкций и как опорные колонны разъединителей. Таким образом, применение ОПН может вызвать существенное сокращение габаритов ЗРУ.

Изготовленные до настоящего времени ограничители перенапряжений на 110 кВ и выше проходят опытную эксплуатацию в ряде энергосистем. Результаты такой эксплуатации показали, что ОПН по надежности и пропускной способности не уступают вентильным разрядникам и обеспечивают более глубокое ограничение коммутационных перенапряжений — до $(1,65—2,1) U_{\phi}$ при напряжении 110 кВ и $(1,65—1,8) U_{\phi}$ при 220 кВ.

12.3.5. Влияние способа заземления нейтрали на выбор разрядников и уровни изоляции

Выше (см. п. 12.3.1) было указано, что напряжение гашения разрядников должно быть равно напряжению на неповрежденных фазах установки при однофазном замыкании на землю.

Для установок с заземленной нейтралью расчет этого напряжения производится по методу симметричных составляющих. Для этого в месте замыкания, например на фазе A , включают эквивалентный источник с напряжением $-\dot{U}_A$, равным и противоположным по направлению напряжению U_A нормального симметричного режима.

Обозначив через Z_1 , Z_2 и Z_0 сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей относительно точки замыкания, получим, что ток однофазного замыкания на землю будет равен (при условии, что все источники питания закорочены)

$$I_{к.з}^{(1)} = 3\dot{U}_A / (Z_1 + Z_2 + Z_0).$$

Токи различных последовательностей при этом будут равны

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dot{I}_0 = I_{к.з}^{(1)} / 3 = \dot{U}_A / (Z_1 + Z_2 + Z_0).$$

Напряжение на каждой из фаз можно представить в виде суммы четырех составляющих:

1) составляющей прямой последовательности нормального режима, т. е. \dot{U}_A , \dot{U}_B и \dot{U}_C ;

2) составляющей прямой последовательности аварийного режима

$$\dot{U}_{A1} = -I_1 Z_1 = -\dot{U}_A Z_1 / (Z_1 + Z_2 + Z_0);$$

3) составляющей обратной последовательности

$$\dot{U}_{A2} = -I_2 Z_2 = -\dot{U}_A Z_2 / (Z_1 + Z_2 + Z_0);$$

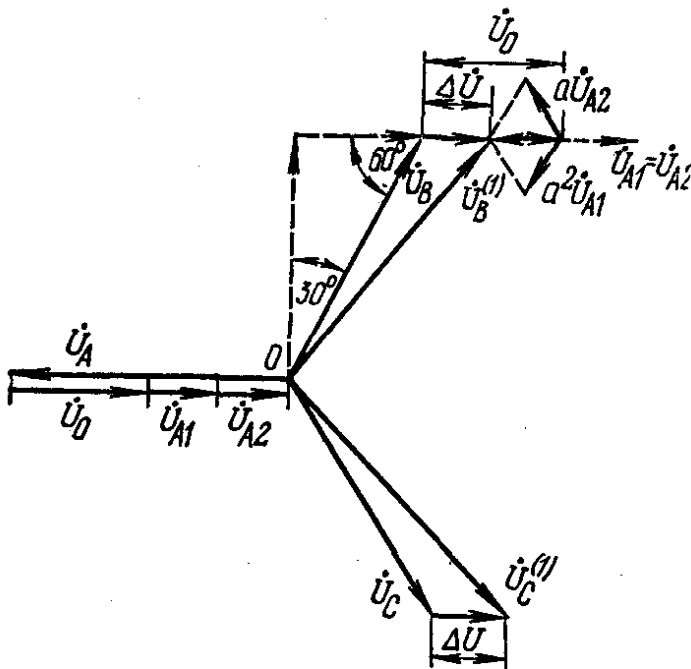
4) составляющей нулевой последовательности

$$\dot{U}_{A0} = -I_0 Z_0 = -\dot{U}_A Z_0 / (Z_1 + Z_2 + Z_0).$$

При замыканиях, достаточно удаленных от шин генераторного напряжения, можно принять $Z_1 = Z_2$. Обозначив $Z_0/Z_1 = Z_0/Z_2 = m$, получим:

$$\dot{U}_{A1} = \dot{U}_{A2} = -\dot{U}_A Z_1 / (Z_0 + 2Z_1) = -\dot{U}_A / (m + 2);$$

$$\dot{U}_{A0} = -\dot{U}_A Z_0 / (Z_0 + 2Z_1) = -\dot{U}_A m / (m + 2).$$



Напряжение на неповрежденных фазах B и C можно определить из векторной диаграммы (построенной для случая, когда сопротивления всех последовательностей чисто реактивные и $m > 1$) (рис. 12.8).

Рис. 12.8. Векторная диаграмма напряжения при однофазном к.з.

В поврежденной фазе все три составляющие \dot{U}_{A1} , \dot{U}_{A2} и \dot{U}_{A0} совпадают по направлению и в сумме дают $-\dot{U}_A$, т. е. результирующее напряжение этой фазы равно нулю.

В двух других фазах B и C составляющие нулевой последовательности имеют то же направление, что и в фазе A , а составляющие прямой и обратной последовательностей сдвигаются на углы 240 и 120° соответственно. Сумма этих векторов и для фазы B , и для фазы C дает вектор, совпадающий с вектором \dot{U}_0 , но обратный по знаку. Таким образом, геометрическая сумма составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей $\Delta\dot{U}$ в неповрежденных фазах будет равна

$$\Delta\dot{U} = \dot{U}_0 + \dot{U}_1 + \dot{U}_2 = \dot{U}_0 - \dot{U}_{A1} = -\dot{U}_A \frac{m-1}{m+2}.$$

Напряжения на неповрежденных фазах B и C могут быть определены как геометрические суммы напряжений нормального режима этих фаз (\dot{U}_{B1} или \dot{U}_{C1}) и вектора $\Delta\dot{U}$. Из векторной диаграммы следует, что

$$U_{B1}^{(1)} = U_{C1}^{(1)} = \sqrt{(U_B \cos 30^\circ)^2 + (U_B \cos 60^\circ + \Delta U)^2} = \\ = \sqrt{\left(U_A \frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 + U_A^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{m-1}{m+2}\right)^2} = U_A \sqrt{0,75 + \left(\frac{3m}{2m+4}\right)^2}$$

Для установок с заземленной нейтралью значения m обычно лежат в пределах $1 < m < 3$. Для точек замыкания, удаленных от источников питания, когда Z_0 и Z_1 определяются в основном параметрами линий, т. е. индуктивностями нулевой и прямой последовательностей, значения m близки к 3.

Тогда с учетом возможного повышения напряжения на 10 % по сравнению с номинальным получим, что напряжение на неповрежденных фазах

$$U_B^{(1)} = U_C^{(1)} = 1,1 \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} \sqrt{0,75 + 0,81} \approx 0,8 U_{\text{ном}}$$

Для установок с изолированной нейтралью при замыкании фазы A на землю напряжение на неповрежденных фазах будет равно линейному, т. е.

$$U_B = U_C \approx 1,1 U_{\text{ном}}$$

Таким образом, в установках с изолированной нейтралью необходимо применять так называемые 110 %-ные разрядники, рассчитанные на напряжение гашения $U_{\text{гаш}} = 1,1 U_{\text{ном}}$. В установках с заземленной нейтралью применяют 80 %-ные разрядники, у которых гашение дуги осуществляется при $U_{\text{гаш}} = 0,8 U_{\text{ном}}$, что дает возможность уменьшить сопротивление варистора, а следовательно, и остающееся напряжение на разряднике.

Поскольку уровень изоляции электрооборудования скоординирован с характеристиками разрядников, применение 80 %-ных разрядников позволяет снизить его по сравнению с уровнем изоляции, защищенной 110 %-ными разрядниками. Это является одним из основных преимуществ установок с заземленной нейтралью.

12.4. ЗАЩИТНЫЕ ИСКРОВЫЕ ПРОМЕЖУТКИ

В ряде случаев, например при отсутствии необходимых трубчатых разрядников, а также в упрощенных схемах грозозащиты подстанций, применяют защитные искровые промежутки (ПЗ). Защитные промежутки по конструктивным соображениям обычно выполняют в виде стержневых электродов, расположенных на соответствующих расстояниях и укрепленных на колонках опорных изоляторов или на гирляндах, а также в виде рогов (при напряжениях 3—10 кВ). При роговых электродах дуга под действием электродинамических усилий и тепловых потоков воздуха перемещает-

ся вверх, сильно растягивается и гаснет. Установлено, что самопогасание дуги в таких электродах осуществляется успешно при токах однофазного замыкания на землю до 300 А.

Стержневые (а также роговые) электроды обладают резконеоднородным полем, следовательно, их вольт-секундные характеристики имеют крутой подъем в области малых значений времени, поэтому не всегда удается осуществить координацию вольт-секундных характеристик изоляции и ПЗ во всем диапазоне времени. Другим недостатком защитных промежутков является переход импульсного пробоя ПЗ в устойчивую дугу, переходящую в ряде случаев в к. з. с последующим отключением поврежденного участка релейной защитой. Поэтому защитные промежутки рекомендуется применять только на тех участках, которые оборудованы автоматами повторного включения (АПВ).

13. ГРОЗОЗАЩИТА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

13.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АТМОСФЕРНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

Линии передачи имеют наибольшую протяженность и чаще всего испытывают поражения молнией. Перенапряжения, образовавшиеся на линии, не только могут привести к перекрытию линейной изоляции, но доходят в виде блуждающих волн до подстанций и являются одной из возможных причин повреждения изоляции подстанций. Для оценки грозоупорности линий передачи можно пользоваться такими показателями, характеризующими техническую эффективность средств грозозащиты, как защитный уровень и число грозовых отключений линии в год.

Защитный уровень линии оценивается тем наибольшим током молнии $I_{з.у}$ в килоамперах, при ударе которого в линию еще не происходит перекрытия ее изоляции.

Число грозовых отключений линии в год обычно рассчитывается для удобства сравнения различных линий на 100 км длины линии и 30 грозовых часов в году (удельное число отключений).

Число грозовых отключений линии в год $N_{откл}$ может быть определено следующим образом. Ранее было отмечено, что удар молнии в объект может произойти в том случае, если головка лидера на высоте ориентировки находится в пределах некоторого расстояния от него (для стержневого молниеотвода это расстояние равно $3,5 h$). Для проводов (тросов) линии передачи соответствующее расстояние принимается равным $3 h$. Таким образом, ширина зоны 100%-ного поражения линии составляет $6 h$, где h — средняя высота подвеса тросов (или проводов на линии без тросов), м.

Следовательно, линия принимает на себя удары молнии с площади $6 hl \cdot 10^{-3}$, где l — длина линии, км. Число поражений ВЛ прямыми ударами молнии (при $l = 100$ км и $n_{ч} = 30$) будет равно

$$N_{уд} = 0,067 n_{ч} \cdot 6 hl \cdot 10^{-3} = 1,2 h. \quad (13.1)$$

Из этого числа ударов молнии в линию перекрытие изоляции произойдет только при таких сочетаниях амплитуды и крутизны тока молнии, при которых на изоляции линии возникнет напряжение, превышающее ее импульсную прочность. Обозначив вероятность перекрытия изоляции при ударе молнии через $P_{\text{пер}}$, получим число импульсных перекрытий изоляции в год $N_{\text{пер}} = 1,2 h P_{\text{пер}}$.

Линия будет отключена защитой, если импульсное перекрытие изоляции перейдет в силовую дугу. Вероятность (коэффициент) такого перехода η и определяет долю всех перекрытий, приводящих к отключению. Таким образом, число грозовых отключений

$$N_{\text{откл}} = 1,2 h P_{\text{пер}} \eta. \quad (13.2)$$

Вероятность η зависит главным образом от средней рабочей напряженности $E_{\text{ср}}$ (кВ/м) на изоляции линии и может быть определена по формуле $\eta = (1,5 E_{\text{ср}} - 4) 10^{-2}$.

На линиях с металлическими опорами перекрытие происходит между проводом и траверсой, т. е. $E_{\text{ср}} = U_{\text{ф}} / l_{\text{г}}$, где $l_{\text{г}}$ — длина гирлянды, м. Для ВЛ напряжением 110 кВ с 7 изоляторами ПФ6-А в гирлянде получим $E_{\text{ср}} = \frac{110}{\sqrt{3} \cdot 7 \cdot 0,17} = 54$ кВ/м и $\eta = 0,77$.

Обычно в расчетах для ВЛ напряжением не более 220 кВ принимают в этом случае $\eta = 0,7$, а для ВЛ напряжением 330 кВ и выше, у которых $E_{\text{ср}}$ больше, принимают $\eta = 1$.

На линиях с деревянными опорами перекрытие происходит между проводами по пути гирлянда — траверса — гирлянда, т. е. $l_{\text{пер}} = 2l_{\text{г}} + l_{\text{д}}$, где $l_{\text{д}}$ — расстояние между проводами по дереву траверсы. Тогда для ВЛ напряжением 110 кВ получим (при 6 изоляторах в гирлянде и $l_{\text{д}} = 4$ м) $E_{\text{ср}} = \frac{110}{2 \cdot 6 \cdot 0,17 + 4} = 18,2$ кВ/м и $\eta \approx 0,23$.

Обычно при расчетах в этом случае принимают $\eta = 0,2 - 0,25$ для ВЛ напряжением 110 кВ и $\eta = 0,1$ для более низких напряжений.

Из выражения (13.2) следует, что уменьшения числа отключений линии можно достигнуть путем уменьшения $P_{\text{пер}}$ или η . Уменьшение $P_{\text{пер}}$ достигается путем подвески грозозащитных тросов, что повышает уровень грозоупорности ВЛ, а уменьшение η возможно, как показал приведенный выше расчет, путем увеличения пути перекрытия при применении деревянных опор.

В настоящее время нельзя с помощью экономически приемлемых средств создать абсолютно грозоупорные линии, поэтому задачей грозозащиты является не полное устранение, а лишь уменьшение до разумного предела числа грозовых отключений.

Система грозозащиты должна удовлетворять не только определенным техническим требованиям, но и требованиям экономическим, т. е. сумма затрат на осуществление грозозащиты и возможных убытков, причиненных грозовыми авариями (перерывы в электроснабжении, вывод оборудования из строя и т. п.), должна быть минимальной, иначе говоря, расходы на усиление грозозащитных мероприятий должны быть приведены в соответствие со стоимостью ущерба от грозовых отключений, который зависит от характера по-

требителя, наличия быстродействующего АПВ, степени резервирования линии.

Исходя из условий надежности электроснабжения, можно ориентировочно принять, что допустимое число грозовых отключений определяется по формуле

$$N_{\text{откл. доп}} = N_{\text{доп}} / (1 - \beta_{\text{АПВ}}), \quad (13.3)$$

где $N_{\text{доп}}$ — допустимое число перерывов электроснабжения по линии в год ($N_{\text{доп}} \leq 1$ при наличии резервирования и $N_{\text{доп}} \leq 0,1$ при его отсутствии); $\beta_{\text{АПВ}}$ — коэффициент успешности действия АПВ, равный 0,8—0,9 для ВЛ 110 кВ и выше на металлических опорах.

Приняв $\beta_{\text{АПВ}} = 0,8$, получим, что число допустимых грозовых отключений при наличии резервирования не должно превышать 5, а при отсутствии резервирования — 0,5.

Дополнительное ограничение на число допустимых отключений накладывается условиями работы выключателей, для которых допускается определенное число отключений к. з. за период между капитальными ремонтами и определенное число случаев работы в цикле АПВ. На основании этих соображений $N_{\text{откл. доп}}$ не должно превышать 1—4 в зависимости от типа выключателей. Для особо ответственных линий число отключений должно быть уменьшено по сравнению с приведенными значениями.

13.2. ПРЯМОЙ УДАР МОЛНИИ В ЛИНИЮ БЕЗ ТРОСОВ

Применение тросов для защиты линий от прямого удара молнии целесообразно не во всех случаях, поэтому в эксплуатации находится большое количество линий, не имеющих тросовой защиты. В этом случае основное число ударов молнии приходится в провод, разряды молнии в опоры очень редки, и ими пренебрегают.

При ударе молнии в провод ток в точке удара (см. § 9.3) $I'_m = I_m/2$, и в каждую сторону от точки удара будет распространяться волна с напряжением $U_{\text{пр}} = 100 I_m$.

Рассмотрим воздействие этого напряжения на изоляцию линий на металлических и деревянных опорах отдельно.

При ударе молнии в провод линии на металлических опорах все напряжение провода прикладывается к гирлянде изоляторов (рис. 13.1, а), перекрытие которой произойдет, если $U_{\text{пр}} = 100 I_m \geq U_{\text{Г} 50\%}$, где $U_{\text{Г} 50\%}$ — импульсное 50%-ное разрядное напряжение гирлянды. Перекрытие изоляции произойдет при токе молнии

$$I_m = I_{\text{з.у}} = \frac{U_{\text{Г} 50\%}}{100}, \quad (13.4)$$

т. е. перекрытие изоляции определяется только одним параметром разряда молнии — амплитудой тока — и не зависит от крутизны. Следовательно, $P_{\text{пер}} = P_{\text{Г}}$.

Для линии напряжением 110 кВ (гирлянда из 7 изоляторов ПФ6-А) $U_{\text{Г} 50\%} = 780$ кВ, следовательно, $I_{\text{з.у}} = 7,8$ кА и в соответствии с выражением (9.1) $P_{\text{Г}} = 0,8$. Вероятность η была определена

выше и принята 0,70. Следовательно, число отключений в год для $h_{\text{пр}} = 10$ м $N_{\text{откл}} = 1,2 h_{\text{пр}} P_{I\eta} = 1,2 \cdot 10 \cdot 0,8 \cdot 0,7 = 7$. Такое число отключений является достаточно большим ($N_{\text{откл. доп}} \leq 4$), поэтому линии 110 кВ на металлических опорах в районах со средней или большой интенсивностью грозовой деятельности не могут работать достаточно надежно. То же самое относится и к линиям более высокого напряжения.

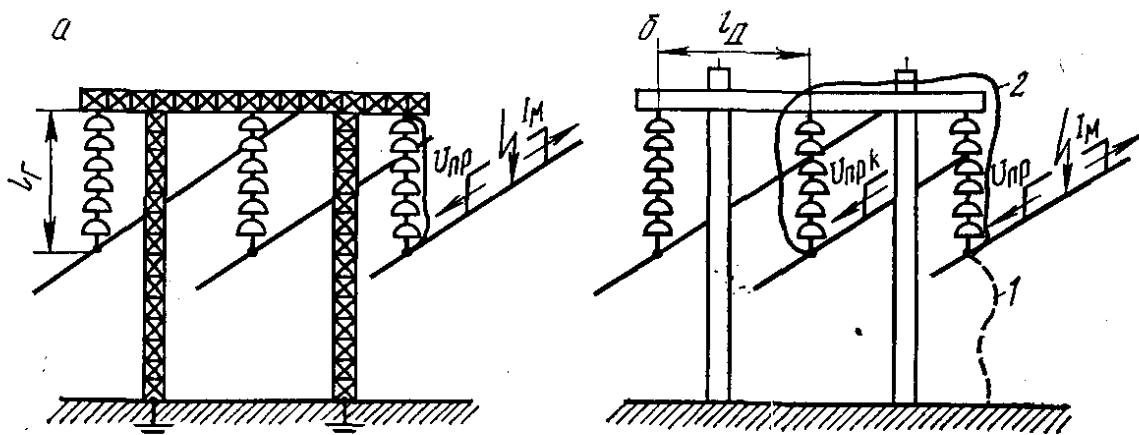


Рис. 13.1. Удар молнии в провод линии на металлических (а) и деревянных (б) опорах.

В системах с изолированной нейтралью, когда однофазное замыкание на землю не приводит к отключению линии, после того как при ударе молнии в провод произойдет перекрытие изоляции этого провода относительно земли, ток молнии начнет стекать в землю через опору и заземлитель. В путь тока молнии вместо сопротивления $z_{\text{пр}}/2$ включается значительно меньшее сопротивление заземлителя опоры $R_{\text{и}}$, и через опору начинает протекать почти полный ток молнии. В результате этого опора вместе с пораженным проводом приобретает потенциал, равный приблизительно $I_{\text{м}} R_{\text{и}}$, на остальных проводах при этом наводятся напряжения $I_{\text{м}} R_{\text{и}} k_{\text{к}}$, где $k_{\text{к}}$ — коэффициент связи между проводами с учетом короны. Таким образом, на изоляцию этих проводов будет действовать напряжение $I_{\text{м}} R_{\text{и}} (1 - k_{\text{к}})$, и перекрытие изоляции (гирлянд) с опоры на провод произойдет, если

$$I_{\text{м}} \geq I_{\text{з.у}} = \frac{U_{\text{Г } 50\%}}{R_{\text{и}} (1 - k_{\text{к}})}$$

Если принять для ВЛ 35 кВ $U_{\text{Г } 50\%} = 350$ кВ, $k_{\text{к}} = 0,3$, $h_{\text{пр}} = 10$ м и $R_{\text{и}} = 10$ Ом, то $I_{\text{з.у}} = \frac{350}{10 (1 - 0,3)} = 50$ кА и $P_{I} \approx 0,15$,

что дает удельное число отключений в год $N_{\text{откл}} = 1,2 \cdot 10 \cdot 0,15 \times 0,7 \approx 1,3$, т. е. в несколько раз меньше, чем в системах с заземленной нейтралью.

На рис. 13.1, б показаны возможные пути перекрытия изоляции при ударе молнии в провод линии на деревянных опорах. Перекрытие по пути 1 маловероятно, так как импульсная прочность воздуха значительно выше импульсной прочности при разряде по поверхности гирлянд и траверсы (путь 2), хотя в последнем случае воздей-

ствующее на изоляцию напряжение оказывается ниже, чем в первом.

Напряжение, воздействующее на изоляцию при разряде между проводами, $U_{из} = 100(1 - k_k)$, следовательно,

$$I_{з.у} = \frac{U_{50\%}}{100(1 - k_k)}$$

Минимальная импульсная прочность мокрого дерева составляет 100 кВ/м, следовательно, для ВЛ напряжением 110 кВ (гирлянда из 6 изоляторов ПФ6-А) $U_{50\%} = 2U_{г 50\%} + U_{д 50\%} = 2 \cdot 670 + 4 \times \times 100 = 1740$ кВ.

Коэффициент связи k_k с учетом интенсивной импульсной короны, которая имеет место при ударе молнии в провод, можно принять равным 0,3. Тогда $I_{з.у} = \frac{1740}{100 \cdot 0,7} = 25$ кВ, $P_I = 0,38$, и при $\eta = 0,23$ получим число отключений в год $N_{откл} = 1,2 \cdot 10 \cdot 0,38 \times \times 0,23 \approx 1,1$.

Из приведенного расчета видно, что линии на деревянных опорах без тросов имеют значительно бóльшую грозоупорность и меньшее число грозовых отключений, чем линии на металлических опорах того же номинального напряжения.

13.3. ПРЯМОЙ УДАР МОЛНИИ В ЛИНИЮ С ТРОСАМИ

При расчетах обычно рассматривают три основных варианта поражения молнией линии с тросами (рис. 13.2): 1 — прорыв молнии через тросовую защиту; 2 — удар молнии в опору; 3 — удар молнии в трос. Во всех случаях предполагается линия на металлических опорах.

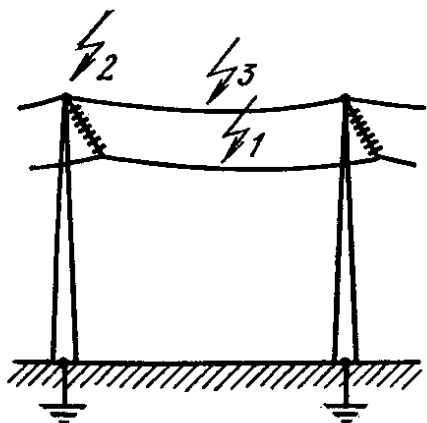


Рис. 13.2. Основные случаи поражения линии с тросами.

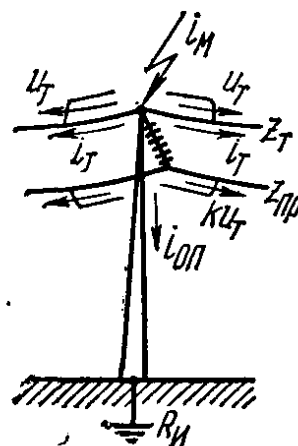


Рис. 13.3. Удар молнии в опору.

Несмотря на наличие грозозащитных тросов на линии, сохраняется некоторая вероятность P_α прямого удара молнии в провод (прорыв молнии через тросовую защиту), зависящая от величины угла α и высоты подвески троса h_T [см. выражение (10.1)].

Число отключений линии вследствие прорыва молнии подсчитывается так же, как и для линии без тросов на металлических

опорах, защитный уровень линии определяют по формуле (13.4), число отключений — по выражению (13.2), в которое в качестве множителя добавляется вероятность P_α , т. е. $N_{\text{откл } \alpha} = 1,2 h_T P_{\Gamma} \eta P_\alpha$.

Для линии 110 кВ при высоте подвеса тросов $h_T = 25$ м и защитном угле $\alpha = 30^\circ$ вероятность прорыва молнии $P_\alpha \approx 0,002$, следовательно, число отключений такой линии вследствие прорывов молнии будет равно $N_{\text{откл } \alpha} = 1,2 \cdot 25 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,002 \approx 0,034$.

В случае удара молнии в опору (рис. 13.3), вследствие того что $R_{\text{и}} \ll z_T$, большая часть тока молнии ($i_{\text{оп}}$) стекает по пораженной опоре в землю, а меньшая часть (i_T) растекается по тросам к заземлителям соседних опор (влияние более удаленных опор обычно не учитывают). Напряжение на изоляции опоры будет иметь следующие составляющие.

1. Падение напряжения на заземлении опоры $u_z = i_{\text{оп}} R_{\text{и}}$, где $R_{\text{и}}$ — импульсное сопротивление заземления опоры при токе $i_{\text{оп}}$. Напряжение u_z достигает максимума при амплитудном значении тока $i_{\text{оп}}$. Приняв, что ток молнии имеет косоугольный фронт с крутизной a , получим для фронта тока молнии $u_z = at R_{\text{и}}$.

2. Магнитная составляющая индуктированного напряжения $u_{\text{ин.м}}$, обусловленная самоиндукцией тока в опоре и взаимоиндукцией тока в канале молнии с контуром опоры — провод.

Коэффициент самоиндукции опор зависит в основном от их высоты и конструкции и для типовых опор лежит в пределах $(0,55—0,65) h_{\text{оп}}$ мкГн ($h_{\text{оп}}$ — высота опоры до уровня подвески верхнего провода (троса), м).

Коэффициент взаимоиндукции M между каналом молнии и контуром опоры зависит от длины этого канала и скорости главного разряда. Обычно $M \ll L_{\text{оп}}$, и его влиянием пренебрегают. Тогда в приближенных расчетах можно считать $u_{\text{ин.м}} \approx L_{\text{оп}} di_{\text{оп}}/dt$.

3. Электрическая составляющая индуктированного напряжения $U_{\text{ин.э}}$, обусловленная нейтрализацией зарядов в канале молнии.

4. Напряжение, наведенное на проводе распространяющимися по тросу волнами. Если потенциал троса равен u_T , то эта составляющая напряжения равна $k_{\text{т.п}} u_T$, где $k_{\text{т.п}}$ — коэффициент связи между тросом и проводом.

Первые три составляющие имеют одинаковый знак и приводят к увеличению напряжения на изоляции, последняя имеет обратный знак и, следовательно, уменьшает результирующее напряжение на изоляции.

Таким образом, на изоляцию пораженной опоры действует напряжение

$$u_{\text{из}} = i_{\text{оп}} R_{\text{и}} + (L_{\text{оп}} di_{\text{оп}}/dt) + u_{\text{ин.э}} - k_{\text{т.п}} u_T.$$

Так как при распространении волн по тросу происходит процесс многократного отражения волн, в результате чего потенциал троса может понижаться и процесс импульсного коронирования может прекращаться, коэффициент связи $k_{\text{т.п}}$ для осторожности следует брать без поправки на корону.

Характерные кривые изменения напряжения $u_{\text{из}}$ и его составля-

ющих приведены на рис. 13.4, а. Эти кривые справедливы только для фронта волны тока молнии, после чего все составляющие резко падают и напряжение $u_{из}$ снижается, т. е. имеет вид, показанный на рис. 13.4, б (кривая 1). Перекрытие изоляции возможно лишь на фронте волны, время разряда $t_{р1}$ определяется пересечением кривой 1 с вольт-секундной характеристикой изоляции 3.

Если длина фронта $T_{ф1}$ меньше $t_{р1}$, то перекрытия изоляции не произойдет (участок кривой 1').

Если кривая $u_{из}$ построена для определенной крутизны a_1 , то тем самым определена опасная амплитуда тока молнии $I_{м1} = a_1 t_{р1}$. Оче-

видно, что все разряды с амплитудой $I_{м} \geq I_{м1}$ и крутизной $a \geq a_1$ будут приводить к перекрытию изоляции. Произведя аналогичное построение для другой крутизны a_2 , получим соответствующее значение опасной амплитуды $I_{м2} = a_2 t_{р2}$ (кривая 2) и т. д.

В результате можно построить так называемую «кривую опасных параметров», которая ограничивает область опасных сочетаний крутизны и амплитуды тока молнии (рис. 13.5); все раз-

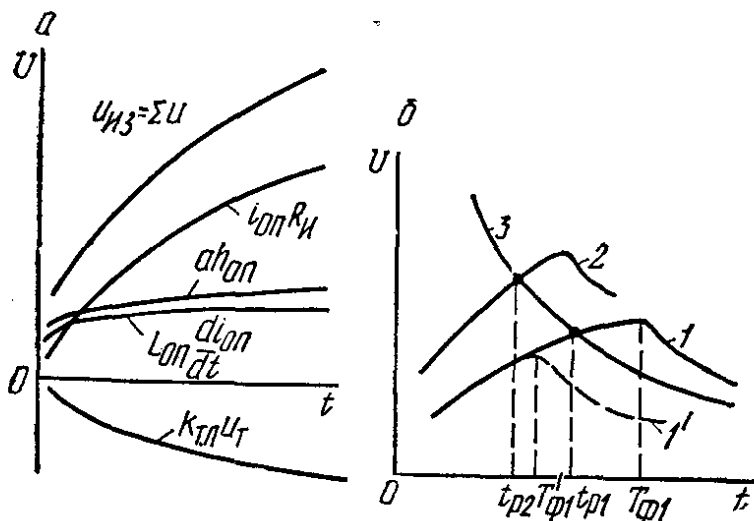


Рис. 13.4. Кривые изменения напряжения при ударе молнии в опору.

ряды с параметрами, соответствующими заштрихованной области, будут приводить к перекрытию изоляции линии.

Из вышеизложенного следует, что для определения числа отключений необходимо знать вероятность сочетания амплитуды и крутизны тока молнии. В настоящее время на основании имеющихся данных эта вероятность не может быть установлена достаточно надежно. Благодаря этому, а также в силу сложности теоретического расчета «кривой опасных параметров» для определения числа отключений целесообразно воспользоваться приближенным методом. Для этого можно ввести понятие защитного уровня (как и для линий без тросов), которое в данном случае будет носить условный характер, так как не учитывает влияния крутизны тока молнии.

Из рис. 13.4, а следует, что индуктированные напряжения в сумме превышают напряжение $k_{т.п} u_{т}$, т. е. напряжение на изоляции линии всегда больше $i_{оп} R_{н}$ и даже больше $i_{м} R_{н}$. Таким образом, индуктированные напряжения как бы приводят к увеличению сопротивления заземления опоры на некоторую величину, пропорциональную высоте опоры $h_{оп}$, т. е. условие перекрытия изоляции можно записать в виде $U_{из} = I_{м} (R_{н} + \delta h_{оп}) \geq U_{50\%}$ или

$$I_{з.у} = \frac{U_{50\%}}{R_{н} + \delta h_{оп}}, \quad (13.5)$$

где δ — коэффициент, определяемый сравнением с результатами расчетов по более точным методам. Можно принять $\delta=0,15$ для ВЛ с двумя тросами и $\delta=0,3$ для ВЛ с одним тросом.

Как видно из выражения (13.5), защитный уровень линии с тросом определяется сопротивлением заземления опор.

На рис. 13.6 представлено графическое решение выражения (13.5) для ВЛ напряжением 110 кВ с одним тросом, $h_{оп} = 30$ м и $I_{з.у} = \frac{780}{R_{н} + 0,3 \cdot 30} = \frac{780}{R_{н} + 9}$, из которого следует, что при импульсном сопротивлении заземления опор 10 Ом защитный уровень $I_{з.у} \approx 40$ кА.

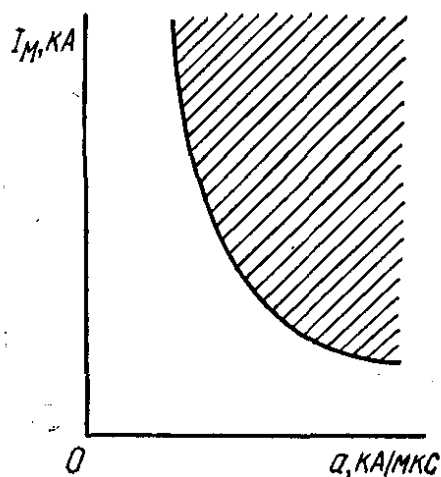


Рис. 13.5. «Кривая опасных параметров» линии с тросами.

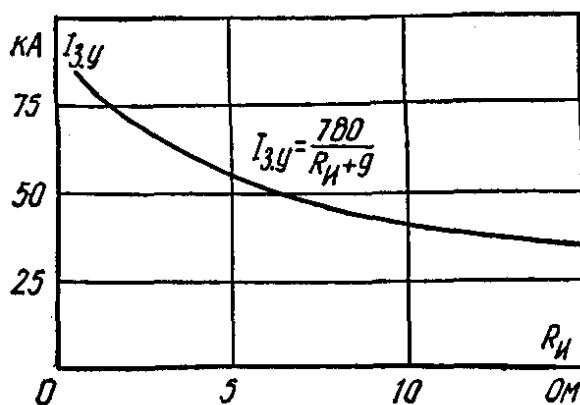


Рис. 13.6. Зависимость уровня грозаупорности линии напряжением 110 кВ с тросами от сопротивления заземления опор.

Определим удельное число отключений такой линии вследствие ударов молнии в опору. Число ударов молнии в опору подсчитывают по эмпирической формуле

$$N_{уд.оп} = N_{уд} \cdot 4h_{оп}/l_{пр} = 4,8h_{т}h_{оп}/l_{пр},$$

где $N_{уд}$ — общее число ударов молнии в линию, определяемое по выражению (13.1); $h_{оп}$, $l_{пр}$ — высота опоры и длина пролета линии, м. Для рассматриваемой линии $h_{оп}=30$ м, $l_{пр}=300$ м, $\eta=0,7$ и $\lg P_I = -I_{з.у}/60 = -0,67$, т. е. $P_{пер} = P_I = 0,2$. Следовательно, $N_{откл.оп} = (4,8 \cdot 25 \cdot 30/300) 0,2 \cdot 0,7 = 1,7$.

При ударе молнии в середину пролета наибольшее напряжение в точке удара зависит от времени прихода отраженных от опор волн, поэтому необходимо учитывать изменение тока молнии во времени. Обычно принимают стилизованную косоугольную форму тока молнии $i_m = at$. Тогда напряжение в точке удара до прихода отраженных от опор волн будет определяться по формуле, аналогичной выражению (13.3):

$$u_{т} = (I_m/2) (z_{т}/2) = atz_{т}/4 = 100 at,$$

так как $z_{т} \approx z_{п} \approx 400$ Ом.

В отличие от проводов тросы заземлены на каждой опоре и $R_{\text{н}} \ll z_{\text{т}}$, поэтому волна напряжения, дойдя до заземленной опоры, отразится практически как от короткозамкнутого конца линии (рис. 13.7, а), т. е. с обратным знаком. Если считать, что удар произошёл в середине пролёта, то в точке удара после прихода туда

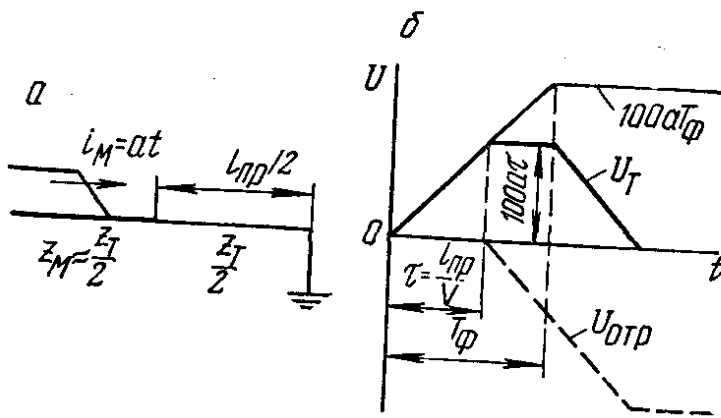


Рис. 13.7. Удар молнии в середину троса: а — схема замещения; б — напряжение в точке удара.

через время $\tau = l_{\text{пр}}/v$ отраженной от опоры волны никаких преломлений и отражений не произойдет, так как $z_{\text{м}} = z_{\text{т}}/2$. Напряжение в точке удара будет изменяться так, как показано на рис. 13.7, б, и $U_{\text{т max}} = 100al_{\text{пр}}/v$, где $l_{\text{пр}}$ — длина пролёта, м; v — скорость распространения волны, м/мкс. Наибольшее напряжение между тросом и проводом в точке удара $U_{\text{т.п max}} = 100al_{\text{пр}}(1 - k_{\text{т.п}})/v$.

Импульсная разрядная напряженность между проводами составляет величину порядка 750 кВ/м, тогда $U_{\text{т.п 50\%}} = 750 S$, где S — расстояние между проводами, м. Следовательно, условие разряда между тросом и проводом запишется в виде $100al_{\text{пр}}(1 - k_{\text{т.п}})/v \geq 750S_{\text{т.п}}$ или

$$a = \frac{750S_{\text{т.п}}v}{(1 - k_{\text{т.п}})100l_{\text{пр}}} = \frac{2250S_{\text{т.п}}}{(1 - k_{\text{т.п}})l_{\text{пр}}} \quad (13.6)$$

По этому выражению можно определить крутизну тока молнии a , при которой произойдет разряд, и затем по формуле (9.2) найти вероятность P_a ударов молнии с такой или большей крутизной.

На практике расстояние $S_{\text{т.п}}$ между тросом и проводом обычно выбирают таким, чтобы при ударах молнии с достаточно большой крутизной ($a \approx 60$ кА/мкс) разряд между ними был маловероятен. Для этого, исходя из выражения (13.6) при $k_{\text{т.п}} = 0,25$, необходимо, чтобы

$$S_{\text{т.п}} = \frac{100a_{\text{max}}l_{\text{пр}}(1 - k_{\text{т.п}})}{750v} = 0,02l_{\text{пр}} \text{ (не менее).}$$

При ударах молнии в трос возможны также перекрытия изоляции опоры, прочность изоляции которых значительно ниже, чем в середине пролёта. Вероятность таких перекрытий значительно меньше, чем при непосредственном поражении опоры, так как при ударе в опору через нее протекает практически весь ток молнии и изоляция подвержена сильным индуктированным перенапряжениям; при ударе же в трос ток молнии снижается в два раза и делится между соседними опорами и канал молнии удален на значительное расстояние от опоры, т. е. индуктированные перенапряжения на ней будут меньше, и ими можно пренебречь по сравнению

с падением напряжения на сопротивлении заземления опор. Условие перекрытия изоляции опоры в этом случае принимает вид

$$I_m \geq I_{з.у} = 2(U_{г 50\%} - U_{раб})/R_{н}.$$

В нашем примере $I_{з.у} = 2(780 - 65)/10 \approx 140$ кА и $P_I \approx 0,0045$. Тогда $N_{откл.т} = 1,2h_T(1 - 4h_{оп}/l_{пр})P_I \eta = 18 \cdot 0,0045 \cdot 0,7 = 0,065$.

Полное число отключений линии будет равно сумме отключений от различных случаев поражения молнией, т. е.

$$N_{откл} = N_{откл.с} + N_{откл.оп} + N_{откл.т} = 0,034 + 1,7 + 0,065 \approx 1,8.$$

Из приведенных результатов видно, что основная доля отключений линий приходится на случаи ударов молнии в опоры.

Вследствие сложности и трудоемкости расчетов числа отключений линий с тросами в настоящее время часто пользуются усредненными кривыми зависимости удельного числа отклю-

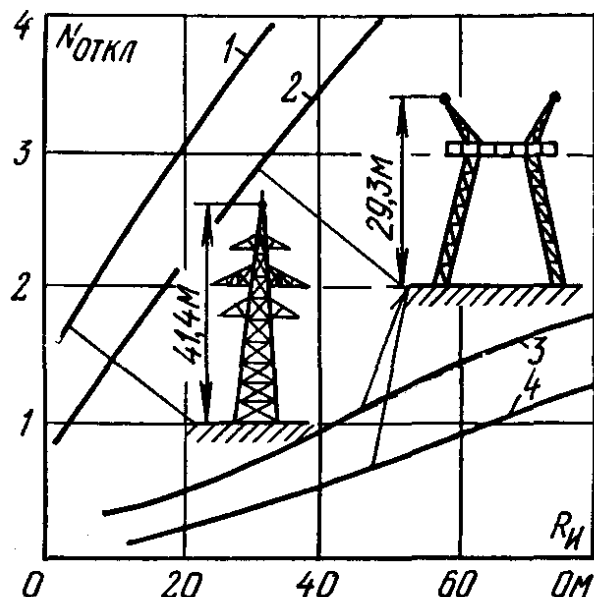


Рис. 13.8. Удельное число отключений линий:

1 — 2 — 110 кВ; 3 — 220 кВ; 4 — 500 кВ.

чений типовых линий в год от импульсного сопротивления заземления опор (рис. 13.8). Из этого рисунка следует, что двухцепные линии, имеющие опоры большей высоты и один трос (кривая 1), отключаются чаще, чем одноцепные, и что число отключений линий уменьшается с увеличением номинального напряжения (при прочих равных условиях) за счет больших разрядных напряжений изоляции (кривые 2—4).

13.4. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ СПОСОБЫ ГРОЗОЗАЩИТЫ ЛИНИЙ РАЗЛИЧНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Линии напряжением 220 кВ и выше в подавляющем большинстве сооружаются на металлических (или железобетонных) опорах и должны защищаться тросами по всей длине. Подвеска тросов повышает стоимость таких линий всего на 5—7 %, а число отключений при хорошем заземлении получается небольшим — порядка 0,25—1,0 при $R_{н} = 10$ Ом.

Линии напряжением 110 кВ на металлических опорах также рекомендуется защищать тросами по всей длине. При $R_{н} = 10$ Ом число отключений одноцепных линий составляет 0,5—1,0, а двухцепных — 1—2.

Сопротивление заземления опор с тросами должно быть не более величин, указанных ниже:

Удельное сопротивление грунта ρ , Ом·м	< 100	100—500	500—1000	1000—3000	> 3000
---	-------	---------	----------	-----------	--------

Наибольшее сопротивление заземления, Ом	10	15	20	30	$6 \cdot 10^{-3} \rho$
---	----	----	----	----	------------------------

Линии на металлических опорах, пролегающие в районах со слабой грозовой деятельностью, например в районах Крайнего Севера, некоторых областях Средней Азии и других, где $n_{\text{г}} \leq 20$, защищать тросами нецелесообразно.

Линии напряжением 110 кВ на деревянных опорах никакой дополнительной грозозащиты не требуют, за исключением подвески тросов и установки трубчатых разрядников на подходах к подстанциям. Это объясняется тем, что число отключений этих линий и так мало, а применение тросов увеличивает их стоимость на 20—30 %. Следует иметь в виду, что на таких линиях при п. у. м. вследствие большой импульсной прочности изоляции возникают весьма высокие перенапряжения, и если на линии есть хотя бы несколько опор с пониженной изоляцией, например металлических, то число отключений такой линии будет столь же высоким, как и линии с металлическими опорами. Поэтому все такие опоры должны быть защищены трубчатыми разрядниками.

Линии напряжением 35 кВ на деревянных опорах также не требуют дополнительной защиты. Благодаря меньшей рабочей напряженности на изоляции число отключений таких линий еще ниже, чем линий напряжением 110 кВ. Защита мест с ослабленной изоляцией желательна, но менее обязательна, чем для линий 110 кВ.

Линии напряжением 35 кВ на металлических опорах также обычно не защищаются тросами. Это объясняется тем, что системы напряжением 35 кВ работают с изолированной нейтралью и однофазные замыкания на землю не приводят к отключению линий, а число отключений таких линий в результате двух- и трехфазных замыканий на землю, как было показано в § 13.2, не превышает 1—2, что вполне допустимо.

Линии напряжением 3—10 кВ выполняются на железобетонных и деревянных опорах, и никаких специальных мер грозозащиты для них не требуется. Для защиты деревянных опор линий 3—10 кВ от повреждений (расщеплений) при ударах молнии и перекрытиях изоляции применяют заземленные металлические спуски, бандажи и скобы. Места с ослабленной изоляцией и подходы к подстанциям необходимо защищать трубчатыми разрядниками.

Грозозащитные тросы крепят на опорах ВЛ с помощью подвешенного изолятора (желательно стеклянного), шунтированного искровым промежутком 40 мм. При напряжениях 220 кВ и выше эти тросы на каждом участке длиной до 10 км заземляют в одной точке — на анкерной опоре. На подходе к подстанциям тросы, если они не используются для плавки гололеда, емкостного отбора или связи, заземляют на каждой опоре. При напряжениях 150 кВ и ниже крепление тросов выполняют изолированным по всей длине ВЛ.

Грозозащита пересечений ВЛ между собой и с линиями связи должна быть достаточно надежной. Для этого на деревянных опорах, ограничивающих пролет пересечения, устанавливают трубчатые разрядники или искровые промежутки (при $U < 35$ кВ) с импульсным сопротивлением заземления 10—20 Ом. В случае металлических опор они также должны иметь сопротивление заземления 10—20 Ом, независимо от наличия троса. Наименьшее расстояние по вертикали между проводами пересекающихся линий зависит от напряжения, сопротивления заземления, длины пролета и расстояния от пересечения до ближайшей опоры (эти расстояния определяют по кривым, и для линий 110 кВ они составляют 3—8 м, для линий 150—220 кВ — 4—12 м).

В настоящее время все воздушные линии напряжением 35 кВ и выше оборудуются АПВ, которое также является эффективным средством грозозащиты, но при частом действии АПВ возникает необходимость дополнительных ревизий и ремонтов выключателей, а также нарушается механическая прочность обмоток трансформаторов. Поэтому АПВ обязательно должно сочетаться с другими методами грозозащиты, при которых число автоматических выключений будет минимальным.

14. ГРОЗОЗАЩИТА ОБОРУДОВАНИЯ ПОДСТАНЦИЙ И ВРАЩАЮЩИХСЯ МАШИН

14.1. ПОКАЗАТЕЛЬ ГРОЗОУПОРНОСТИ ПОДСТАНЦИЙ

На подстанциях и станциях устанавливается наиболее дорогое и ответственное оборудование энергосистем. При этом испытательные напряжения изоляции такого оборудования ниже электрической прочности линейной изоляции, например для трансформаторов на напряжение 110 кВ $U_{исп} = 425—480$ кВ, а импульсное разрядное напряжение гирлянд 110 кВ составляет 670—780 кВ, т. е. примерно на 40—50 % выше.

Кроме того, повреждение изоляции на подстанции означает дуговое к. з. в непосредственной близости от сборных шин, которое даже при современных средствах релейной защиты может привести к серьезным системным авариям. Поэтому грозозащита оборудования подстанций должна выполняться по сравнению с грозозащитой ВЛ особенно тщательно и быть весьма надежной. Подстанции должны защищаться как от прямых ударов молнии, так и от грозовых волн, набегающих со стороны линий.

Повреждения изоляции на подстанции могут быть вызваны следующими причинами: прорывом молнии мимо молниеотводов; возникновением высокого потенциала на заземлении пораженного молниеотвода, приводящего к обратному перекрытию с заземленной конструкцией на токоведущие части установки; возникновением высоких потенциалов в результате воздействия волн, набегающих с линий.

В настоящее время для ориентировочной оценки и сопоставления различных схем грозозащиты пользуются показателем **грозопорности подстанций** M , который численно равен расчетному числу лет безаварийной работы подстанции. Обозначив число опасных случаев в год, обусловленных перечисленными выше причинами, через β_1 , β_2 и β_3 соответственно, получим $M = 1/(\beta_1 + \beta_2 + \beta_3)$. Чтобы обеспечить по возможности наименьшую вероятность повреждения изоляции, принимают, что число M должно не менее чем на порядок превышать нормальный срок службы оборудования, т. е. измеряться десятками и сотнями лет.

Экономическое обоснование допустимого значения M должно производиться на основании технико-экономических расчетов, путем сравнения расчетных затрат на средства защиты от перенапряжений и ущерба от аварий. Очевидно, что значения M должны быть дифференцированы в зависимости от категории потребителей, наличия резерва, стоимости ремонта оборудования и т. п. Однако задача такого обоснования допустимых значений M пока еще не решена.

14.2. ЗАЩИТА ОТ ПРЯМЫХ УДАРОВ МОЛНИИ И ЗАЗЕМЛЕНИЕ МОЛНИЕОТВОДОВ

Для защиты токоведущих частей ОРУ от прямых ударов молнии применяются стержневые молниеотводы. Зоны защиты молниеотводов рассчитывают в соответствии с рекомендациями, приведенными в гл. 10. Закрытые распределительные устройства, а также другие помещения и сооружения защищаются от п. у. м. либо заземлением их металлической крыши или железобетонной конструкции, либо молниеотводами.

Число поражений молнией оборудования ОРУ подстанций в год, защищенного молниеотводами высотой h , можно подсчитать, приняв, что ширина зоны 100%-ного поражения молниеотводов с внешней стороны подстанции составляет, как и для линий передач, $3h$. Тогда поражаемая площадь подстанции со сторонами a и b составит $S_{\text{пор}} = (a + 6h)(b + 6h)10^{-6}$ км², а число ударов молнии в молниеотводы в год (при 30 часах грозовой деятельности) $N_{\text{уд}} = 2(a + 6h)(b + 6h)10^{-6}$.

Для ОРУ со сторонами $a = b = 20—80$ м при высоте молниеотводов $h = 25—30$ м получим $N_{\text{уд}} = 0,05—0,15$. При допускаемой вероятности поражения объектов, защищенных стержневыми молниеотводами, в 10^{-3} число поражений оборудования ОРУ составит $10^{-3}N_{\text{уд}}$, т. е. $\beta_1 = (0,5—1,5)10^{-4}$, или примерно 1 поражение за 10^4 лет. Столь малым числом поражений можно пренебречь и считать, что защита от п. у. м. выполнена с очень высокой степенью надежности.

С целью упрощения конструкций подстанции и экономии металла стержневые молниеотводы целесообразно устанавливать на имеющихся конструкциях подстанций, например порталах. При этом молниеотводы оказываются присоединенными к общему кон-

туру заземления подстанции. Посмотрим, как это может повлиять на ожидаемое число лет безаварийной работы $1/\beta_2$. Импульсное сопротивление контура подстанции обычно значительно выше (иногда в 5—10 раз) его стационарного сопротивления. Это объясняется, во-первых, тем, что заземляющий контур подстанции имеет значительные размеры и выступает как протяженный заземлитель с коэффициентом α , достигающим 2—5, а во-вторых, естественные

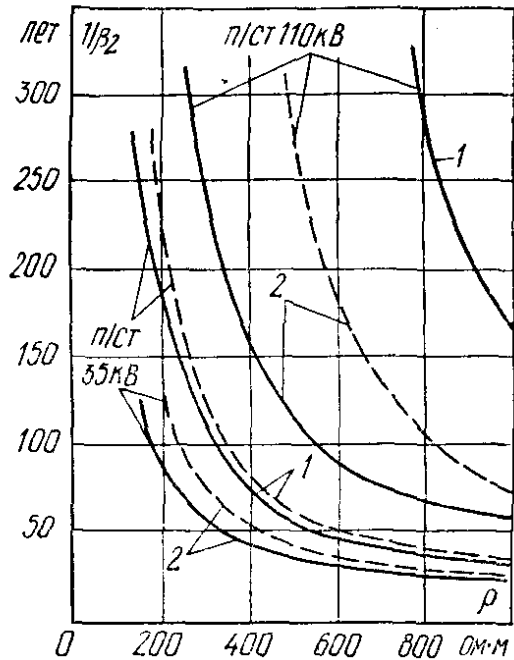


Рис. 14.1. Число лет безаварийной работы $1/\beta_2$ в зависимости от ρ грунта подстанции.

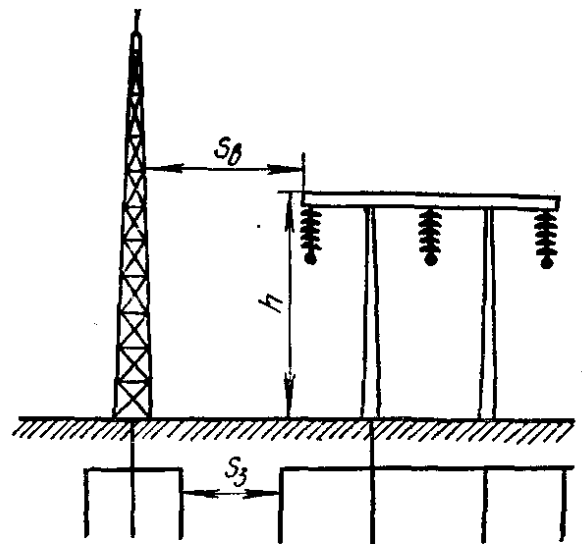


Рис. 14.2. Допустимые расстояния при установке отдельно стоящего молниеотвода.

заземлители, как правило, удалены от места установки молниеотвода и в отводе тока не участвуют. В результате на изоляцию установки воздействуют напряжения, обусловленные падением напряжения $I_M R_{и}$ и достигающие в ряде случаев значений 500 кВ и более (при $I_M \geq 100$ кА и $R_{и} = 5$ Ом). Такие напряжения представляют опасность не только для изоляции 35 кВ и ниже, но зачастую и для изоляции 110 кВ.

На рис. 14.1 приведены ожидаемые значения числа лет безаварийной работы $1/\beta_2$ подстанций 35 и 110 кВ при размерах заземляющего контура 80×80 м и 20×20 м (кривые 1 и 2 соответственно) в зависимости от удельного сопротивления грунта ρ . Контур выполнен в виде сетки 10×10 м² (пунктир — сетка с вертикальными электродами $l_{в} = 8$ м). Как видно из рис. 14.1, обеспечить приемлемое значение показателя грозоупорности при $\rho \geq 300—500$ Ом·м затруднительно не только при напряжениях 35 кВ, но и для малых подстанций 110 кВ. В таких случаях подстанция должна быть защищена от прямых ударов молнии отдельно стоящими молниеотводами, имеющими обособленные заземлители с сопротивлением не более 80 Ом, электрически не связанные с заземляющим контуром подстанции.

При установке молниеотводов на порталах подстанции 35 и 110 кВ для повышения надежности грозозащиты необходимо:

- 1) у стоек конструкций с молниеотводами устраивать дополнительный заземлитель из 2—3 труб длиной по 3—5 м;
- 2) обеспечить растекание тока молнии от конструкции с молниеотводами не менее чем в 3—4 направлениях;
- 3) число изоляторов в гирляндах на порталах 35 кВ с молниеотводами увеличить на 2 изолятора по сравнению с обычным;
- 4) присоединение заземления трансформаторов производить на расстоянии не менее 15 м (вдоль заземляющей полосы) от заземления молниеотвода.

При установке молниеотводов на конструкциях подстанции 220 кВ и выше каких-либо дополнительных мероприятий по повышению уровня грозоупорности обычно не требуется.

Чтобы избежать обратного перекрытия с отдельно стоящего молниеотвода на какую-либо часть распределительного устройства или другого сооружения, расстояние по воздуху S_B (рис. 14.2) должно удовлетворять соотношению $S_B \geq 0,12R_{и} + 0,1h$, но быть не менее 5 м.

Наименьшее расстояние в земле между заземлением отдельно стоящего молниеотвода и заземляющим контуром п/ст должно удовлетворять условию $S_3 \geq 0,2R_{и}$, но быть не менее 3 м ($R_{и}$ — импульсное сопротивление заземления отдельно стоящего молниеотвода при импульсном токе 60 кА, Ом).

Тросовые молниеотводы, защищающие подходы линий, могут присоединяться к заземленным конструкциям распределительного устройства при условии, что расстояние по магистралям заземления между конструкцией подстанции, к которой присоединен трос, и трансформаторами не менее 15 м. Если установка молниеотводов на конструкциях подстанции не допускается (особенно при напряжениях 35 кВ), тросовые молниеотводы должны заканчиваться на ближайшей к ОРУ опоре. Первый бестросовый пролет таких линий должен быть защищен стержневыми молниеотводами.

Допускается не защищать от прямых ударов молнии ОРУ 20—35 кВ с трансформаторами единичной мощности 1000 кВ·А и менее при $n_{ч} \leq 70$ ч, ОРУ 20—35 кВ при $n_{ч} \leq 20$ ч и подстанции 220 кВ и ниже на площадках с $\rho \geq 2000$ Ом·м и $n_{ч} \leq 20$ ч.

14.3. ЗАЩИТНОЕ ДЕЙСТВИЕ ВЕНТИЛЬНОГО РАЗРЯДНИКА

Основным аппаратом грозозащиты изоляции оборудования подстанции является вентильный разрядник (РВ), который включается на шины п/ст параллельно защищаемой изоляции.

Рассмотрим защитное действие РВ, подключенного к шинам п/ст (рис. 14.3, а). Как следует из схемы замещения (рис. 14.3, б), $2U_{п} = (I_p + I_2)z_1 + U_p = (I_p + U_p/z_2)z_1 + U_p$ или

$$U_p = U_{п} \frac{2z_2}{z_1 + z_2} - I_p z_1 \frac{z_2}{z_1 + z_2} = U_{п} \alpha - I_p z_1 \alpha/2. \quad (14.1)$$

Дальнейшее рассмотрение вопроса удобнее всего провести графическим способом, для этого на рис. 14.3, в нанесены следующие кривые: напряжение на шинах п/ст без разрядника $U_{п\alpha}$; вольт-амперная характеристика разрядника $U_p = f(I_p)$; падение напряжения от тока разрядника в сопротивлении линии $z_1 - I_p z_1 \alpha / 2$ и сумма двух последних напряжений $U_p + I_p z_1 \alpha / 2$.

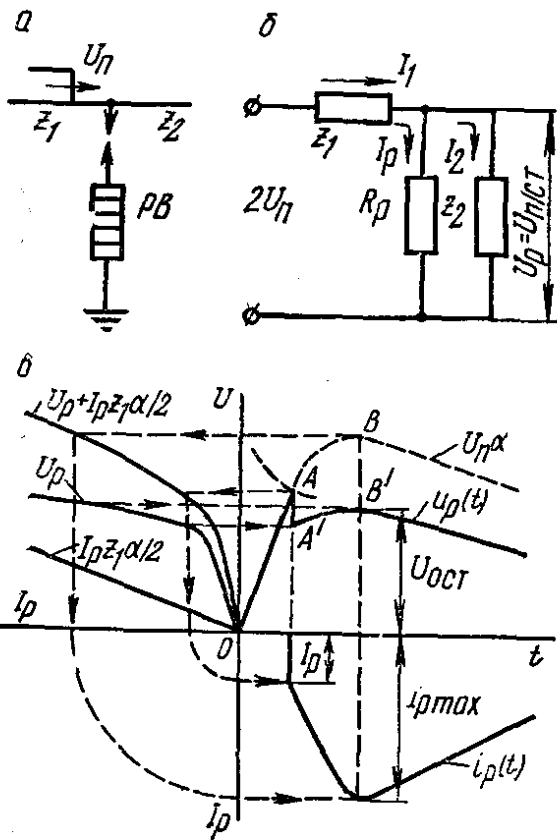


Рис. 14.3. Защитное действие вентильного разрядника:
 а — схема включения; б — схема замещения; в — графики напряжений и тока.

Для нахождения напряжения на шинах п/ст $u_{п/ст}(t) = u_p(t)$ и тока разрядника $i_p(t)$ после срабатывания разрядника для определенных значений $u_{п\alpha}$ находим графически напряжение u_p и ток i_p (построение показано пунктирными линиями со стрелками). Точка А пересечения $u_{п\alpha}$ и $u-t$ -характеристики разрядника опреде-

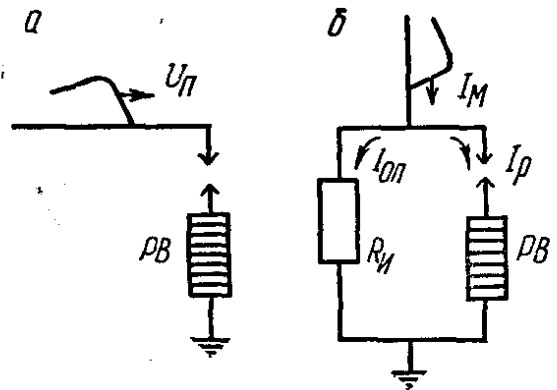


Рис. 14.4. Схемы для оценки тока разрядника.

ляет момент срабатывания разрядника и начальное значение тока I_p ; точка В, соответствующая наибольшему значению $u_{п\alpha}$, определяет $I_{p \max}$ и $U_{ост}$.

Как видно из рис. 14.3 и выражения (14.1), напряжение на шинах подстанции будет меньше напряжения $U_{п\alpha}$ на величину падения напряжения $I_p z_1 \alpha / 2$, вызванного током разрядника в волновом сопротивлении линии z_1 .

Оценим значения токов $I_{p \max}$ (см. рис. 14.3, в), которые могут протекать через РВ. Рассмотрим два предельных случая. Если удар молнии происходит вдали от подстанций и отражением волн на участке от шин п/ст до места удара можно пренебречь вследствие большого времени пробега волны по этому участку (рис. 14.4, а), ток I_p можно определить из выражения (14.1), считая, что $U_{п}$ определяется защитным уровнем линии, т. е. $U_{п} = 100I_{з.у}$. Тогда без учета величины U_p для большей надежности для тупиковой (наиболее тяжелый случай, $\alpha = 2$) п/ст 110 кВ с разрядником РВМГ-110 при падении волны по линии с деревянными опорами

получим $I_p = 2U_{\text{п}}/z_1 = 2 \cdot 100 \cdot 25/400 = 12,5$ кА, что несколько превышает пропускную способность разрядника (10 кА).

В случае падения волны по линии с металлическими опорами этот ток будет вследствие более низкого защитного уровня линии значительно меньше (порядка 4 кА), что вполне допустимо.

При ударе молнии в непосредственной близости от п/ст, например у ближайшей опоры с последующим перекрытием ее изоляции, ток разрядника $I_p = I_m - I_{\text{оп}} = I_m - U_p/R_{\text{и}}$ (рис. 14.4, б). Тогда при $I_m = 100$ кА, $U_p = U_{\text{ост}} = 300$ кВ и $R_{\text{и}} \leq 10$ Ом $I_p = 100 - 300/10 = 70$ кА, что в несколько раз превышает пропускную способность и ток координации разрядника.

Следовательно, чтобы ограничить импульсный ток через разрядник и тем самым обеспечить его надежную работу, необходимо исключить прямые удары молнии в провода и перекрытия изоляции опор линии вблизи подстанции или снизить их вероятность до возможного минимума. Для этого участки линий длиной 1—3 км, примыкающие к подстанциям (подходы), должны быть надежно защищены от прямых ударов тросами с $\alpha \leq 25^\circ$; чтобы избежать обратных перекрытий с опор на провод сопротивление заземления опор $R_{\text{и}}$ должно быть не более 10 Ом. Для ограничения амплитуды проходящей со стороны линии волны при отсутствии троса по всей длине ВЛ в начале подхода (по ходу волны) устанавливают трубчатые разрядники.

Если линия имеет тросовую защиту по всей своей длине, то на подходе к подстанции она выполняется особо тщательно ($\alpha = 20-25^\circ$, $R_{\text{и}} \leq 10$ Ом, вместо двухцепных опор применяют одноцепные). Такие подходы линий к подстанциям называют защищенными.

14.4. ВЛИЯНИЕ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ РАЗРЯДНИКАМИ И ЗАЩИЩАЕМОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ НА ЗАЩИТНОЕ ДЕЙСТВИЕ РВ

На реальных подстанциях часть защищаемого вентиляльным разрядником оборудования обычно расположена до разрядника (например, выключатели B), часть — после (трансформаторы T , рис. 14.5, а). Рассмотрим изменение напряжения в точках 1, 2 и 3, где включены соответственно выключатель, разрядник и трансформатор. Будем считать, что емкости изоляции незначительны и ими при ориентировочном рассмотрении вопроса можно пренебречь.

На рис. 14.5, б показано изменение напряжений в указанных точках при падении косоугольной волны $u_{\text{п}} = at$, за начало отсчета во всех случаях взят момент прихода падающей волны. На этом же рисунке показаны вольт-секундные характеристики трансформатора, выключателя и разрядника (в. с. х. т., в. с. х. в. и в. с. х. р.).

Напряжение на изоляции трансформатора изменяется по выражению $u_{\text{т}} = 2at$, так как волна отражается от разомкнутого конца участка l_{23} и $\beta = 1$; напряжение на разряднике изменяется вначале как at , а затем, после прихода через время $2t_{23} = 2l_{23}/v$ от-

раженной от точки 3 волны, — как $u_p = at + a(t - 2t_{23}) = 2a(t - t_{23})$. Аналогично для выключателя получим $u_B = 2a(t - t_{13})$. Таким образом, после прихода отраженных волн напряжения во всех точках нарастают с одинаковой крутизной $2a$, но со сдвигом во времени относительно u_T соответственно на t_{23} и t_{13} .

Разрядник срабатывает в момент времени t_p при пересечении его в. с. х. с напряжением $u_p = 2a(t_p - t_{23}) = U_{p. гар}$ (точка А); здесь $U_{p. гар}$ — гарантированное напряжение срабатывания разрядника.

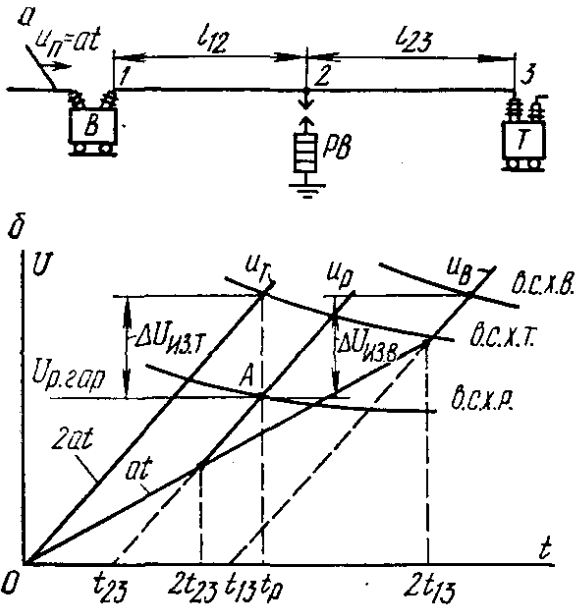


Рис. 14.5. Влияние расстояния на защитное действие разрядника: а — схема; б — напряжения в отдельных точках схемы.

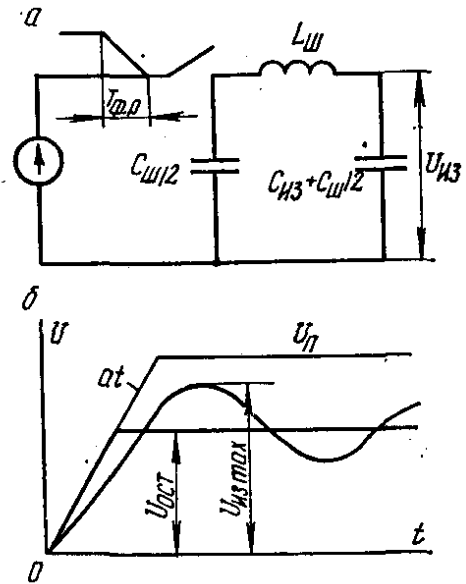


Рис. 14.6. Определение напряжения на изоляции после срабатывания РВ: а — расчетная схема; б — кривые напряжений.

При принятых началах отсчета одновременно снизится и напряжение на трансформаторе, снижение напряжения на выключателе произойдет с запаздыванием на время $2t_{12}$, необходимое для движения волны от выключателя до разрядника и назад. Максимальные значения напряжений в точках 3 и 1 при этом будут: $U_{T \max} = U_{ост} = 2at_p$ и $U_{B \max} = 2a(t_p + t_{12} - t_{13})$.

Для того чтобы изоляция была надежно защищена разрядником, разность напряжений между в. с. х. разрядника и изоляции трансформатора и выключателя (интервал координации) должна быть не менее

$$\Delta U_{из.т} = U_{т. доп} - U_{p. гар} \geq U_{T \max} - U_{p \max} = 2at_{23}$$

и

$$\Delta U_{из.в} = U_{в. доп} - U_{p. гар} \geq U_{B \max} - U_{p \max} = 2at_{12}.$$

Учитывая, что $t = l_{ш}/v$, в общем случае получим

$$\Delta U_{из-р} = 2al_{ш}/v, \quad (14.2)$$

где $l_{ш}$ — расстояние между изоляцией и разрядником (по ошиновке), м; $\Delta U_{из-р}$ — разность напряжения между изоляцией и разрядником.

После срабатывания разрядника между ним и защищаемой изоляцией происходят многократные отражения волн, причем от разрядника они отражаются с переменной знака (R_p мало), а от изоляции — с тем же знаком. Но вследствие пологой вольт-амперной характеристики разрядника напряжение на нем меняется при этом незначительно, и для упрощенных расчетов оно может быть представлено волной с косоугольным фронтом, крутизна которого равна крутизне a набегающей волны, и амплитудой, равной $U_{ост}$ разрядника при токе координации (например, 5 кА при $U_{ном} = 110$ кВ). В этом случае длительность фронта расчетной волны $T_{ф.р} = U_{ост}/a$. Участок ошиновки $l_{ш}$ между разрядником и изоляцией представим в виде индуктивности $L_{ш} = z l_{ш}/v = z\tau$ и емкостей $C_{ш}/2 = l_{ш}/2zv = \tau/2z$.

Емкость $C_{ш}/2$ в начале участка шунтирована малым сопротивлением разрядника, и ее влиянием можно пренебречь. В этом случае индуктивность $L_{ш}$ вместе с емкостью $C_2 = C_{из} + C_{ш}/2$ можно рассматривать как колебательный контур с периодом колебаний

$$T = 2\pi \sqrt{L_{ш}(C_{из} + C_{ш}/2)},$$

на который падает косоугольная волна (рис. 14.6, а). Подобная задача была рассмотрена в § 8.4. Из рис. 8.5 следует, что максимальное напряжение на емкости контура (на изоляции) $U_{из \max}$ (рис. 14.6, б) возрастает при уменьшении отношения $T_{ф}/T$, т. е. при увеличении крутизны падающей волны a и увеличении расстояния $l_{ш}$ (в последнем случае возрастают индуктивность $L_{ш}$ и емкость $C_{ш}/2$ и, следовательно, период T).

В заключение следует отметить, что вследствие пологой вольт-амперной характеристики разрядника напряжение на изоляции мало зависит от амплитуды падающей волны. При любом расположении изоляции относительно разрядника напряжение на изоляции возрастает при увеличении крутизны падающей волны и расстояния между разрядником и изоляцией.

Если к шинам подстанции будет подключена не одна линия (как предполагалось до сих пор), а несколько, то уменьшатся амплитуда воздействующей на изоляцию волны $U_{п}a$ ($a \leq 1$) и в соответствии с выражением (14.1) остающееся напряжение на разряднике U_p . Одновременно уменьшится крутизна падающей волны и, следовательно, амплитуда свободных колебаний в схеме рис. 14.6. Все это приведет к уменьшению максимальных напряжений на изоляции оборудования, т. е. увеличение числа линий является благоприятным фактором, снижающим перенапряжения на подстанциях.

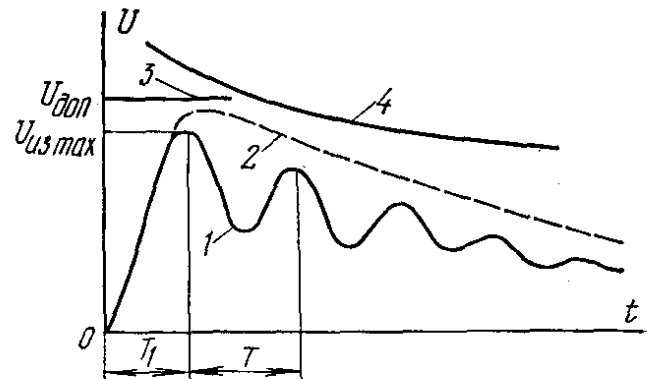
14.5. ДОПУСТИМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ИЗОЛЯЦИИ

Для оценки надежности защиты изоляции оборудования подстанций от набегающих волн необходимо сопоставить воздействующее на изоляцию напряжение с допустимым.

Выше указывалось, что напряжение на изоляции, в частности трансформаторов, представляет униполярный колебательный импульс. Исследования показали, что время до первого максимума T_1 и период колебаний T (рис. 14.7) определяются в основном длиной $l_{ш}$ и практически не зависят от параметров проходящей волны, схемы подстанции, а также числа и типа разрядников. В частности, оказалось, что значения T_1 лежат в пределах от 1 до 4 мкс, а T — от 1,8 до 6,4 мкс, увеличиваясь с ростом номинального напряжения (при этом обычно увеличивается $l_{ш}$). Огибающая униполярного импульса спадает, как правило, быстрее, чем стандартный импульс 1,2/50.

Рис. 14.7. Координация изоляции трансформаторов:

1 — воздействующий импульс грозового перенапряжения; 2 — спад стандартного импульса; 3 — допустимое напряжение для внутренней изоляции; 4 — в.с.х. внешней изоляции.



Воздействие униполярного колебательного импульса является, очевидно, менее тяжелым, чем воздействие полного импульса с той же амплитудой, но более опасным, чем воздействие срезанного импульса.

В качестве временных норм величина допустимого напряжения на внутренней изоляции трансформаторов при униполярном колебательном импульсе принята на 10 % выше испытательного напряжения при полном импульсе $U_{п.и}$ с учетом поправки на возбуждение трансформатора, т. е. $U_{доп} = 1,1 (U_{п.и} - 0,5 U_{ном})$, где $U_{ном}$ — действующее значение линейного номинального напряжения. Таким образом, $U_{доп}$ имеют следующие значения:

$U_{ном}$, кВ	35	110	220	330	500
$U_{доп}$, кВ	210	470	700	975	1430

Допустимые напряжения на внешней изоляции оборудования подстанций определяются путем сопоставления воздействующего на изоляцию напряжения (в частности, униполярного колебательного импульса) с в.с.х. внешней изоляции — импульсным уровнем внешней изоляции. Эта характеристика проходит через две точки: $t_1 = 2$ мкс, $U = k U_{с.и}$ и $t_2 = 8$ мкс, $U = k U_{п.и}$, где $U_{с.и}$, $U_{п.и}$ — испытательные напряжения внешней изоляции при срезанном и полном импульсах; k — коэффициент, учитывающий поправку на атмосферные условия.

На рис. 14.7 показаны соотношения между рассмотренными величинами, при которых не будет происходить ни повреждений внутренней изоляции ($U_{из\ max} < U_{доп}$), ни перекрытий внешней (кривая 1 полностью лежит ниже уровня внешней изоляции 4).

14.6. ВЫБОР ДЛИНЫ ЗАЩИЩЕННОГО ПОДХОДА

В § 14.4 было отмечено, что напряжение на изоляции подстанции $U_{\text{из max}}$ определяется, в частности, крутизной падающей волны a . На рис. 14.8 приведены полученные на моделях зависимости $U_{\text{из max}}$ от крутизны a для подстанции 110 кВ. Напряжение U_T на трансформаторах увеличивается с ростом крутизны, провал в кривых напряжений U_B на выключателях объясняется воздействием отраженных от трансформаторов волн. Из рис. 14.8 следует, что $U_{\text{доп}} = 470$ кВ дает значение допустимой крутизны

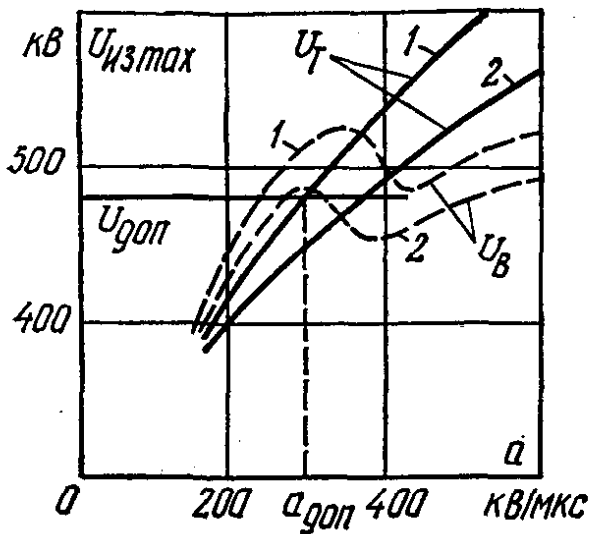


Рис. 14.8. Максимальные напряжения на трансформаторе U_T и выключателе U_B подстанции:

1 — включена одна линия; 2 — включены две линии.

приходящей волны $a_{\text{доп}} \leq 300$ кВ/мкс (при одной линии), что соответствует длине фронта волны $T_{\text{ф.доп}} \geq U_{\text{доп}}/a_{\text{доп}}$. В нашем случае $T_{\text{ф.доп}} = 470/300 = 1,6$ мкс.

При ударах молнии в провода линии крутизна волны перенапряжения $a_U = 100a_I$, т. е. может достигать 5000—6000 кВ/мкс. При напряжении среза волны 700—1700 кВ (для линий на металлических и деревянных опорах соответственно) длина фронта падающей волны $T_{\text{ф0}} = U_{\text{ср}}/a_U = \frac{700 \dots 1700}{6000} \approx 0,1 \dots 0,3$ мкс.

Удлинение фронта волны перенапряжения происходит при ее движении по проводам линии за счет импульсной короны (см. в § 8.6). Это удлинение на 1 км длины линии может быть подсчитано по формуле (8.13) или по более простой полуэмпирической формуле

$$\Delta t = \left(0,5 + \frac{0,008 U_{\text{п max}}}{h_{\text{оп}}} \right) \frac{1}{k},$$

где k равно 1; 1,1; 1,45 и 1,55 при числе проводов в фазе соответственно 1, 2, 3, 4 и более.

Опасными для изоляции подстанции будут волны, возникшие на расстоянии меньше $l_{\text{доп}} = (T_{\text{ф.доп}} - T_{\text{ф0}})/\Delta t$.

В нашем случае, приняв $U_{\text{п max}} = 700$ кВ (случай менее интенсивной короны) и $h_{\text{оп}} = 10$ м при $k = 1$, получим $\Delta t = \left(0,5 + \frac{0,008 \cdot 700}{10} \right) \approx 1$ мкс/км, следовательно, при $T_{\text{ф0}} = 0$ $l_{\text{доп}} = 1,6/1 = 1,6$ км. Таким образом, длина защищенного подхода в нашем случае должна быть не менее 1,6 км. Все удары в линию за подходом (далее 1,6 км от подстанции) уже не будут опасными для изоляции подстанции.

Число опасных случаев в год, возникающих в результате прихода на подстанцию волн с линий, можно считать равным (с некоторым преувеличением) сумме перекрытий изоляции на опорах и прорывов молнии на длине защищенного подхода. Удары в трос не учитываются, так как при выполнении условия $S_{т.л} \geq 0,02l_{пр}$ разряды между тросом и проводом исключены. Тогда при 30 грозовых часах в год

$$\beta_3 = 1,2h_{ср} \frac{l_{доп}}{100} n_{л} \left(\frac{4h_{оп}}{l_{пр}} P_I + P_{\alpha} \right), \quad (14.3)$$

где P_I — вероятность тока молнии, превышающего уровень грозоупорности линии при ударе в опору; $n_{л}$ — число отходящих от подстанции линий. Пользуясь данными § 13.3, получим при $n_{л} = 1$

$$\beta_3 = 1,2 \cdot 25 \frac{1,6}{100} 1 (0,4 \cdot 0,2 + 0,002) = 0,04.$$

Так как величина β_3 значительно превосходит β_2 и особенно β_1 и определяет в основном показатель грозоупорности подстанции, то принимают $M = 1/(\beta_1 + \beta_2 + \beta_3) \approx 1/\beta_3$. В нашем примере $M = 1/0,04 = 25$ лет.

Для повышения уровня грозоупорности, как следует из выражения (14.3), нужно в основном уменьшать P_I (например, снижая $R_{и}$ опор), вместо двухцепных опор на участке защищенного подхода применять одноцепные с меньшими $h_{оп}$ и $h_{ср}$.

14.7. ЗАЩИТА ИЗОЛЯЦИИ ПОДСТАНЦИЙ ОТ НАБЕГАЮЩИХ ВОЛН

Типовые схемы защиты подстанций 35 кВ и выше от набегающих волн приведены на рис. 14.9. Во всех случаях на шины включаются вентильные разрядники РВ, по комплекту на каждую систему или секцию шин. Расстояние от РВ до выводов трансформаторов не должно превышать допустимого, ориентировочное значение которого может быть определено из выражения (14.2): $l_{доп} = (U_{из} - U_p) v/2a$, где $U_{из}$, U_p — 50 %-ные импульсные разрядные напряжения изоляции и разрядника; a — допу-

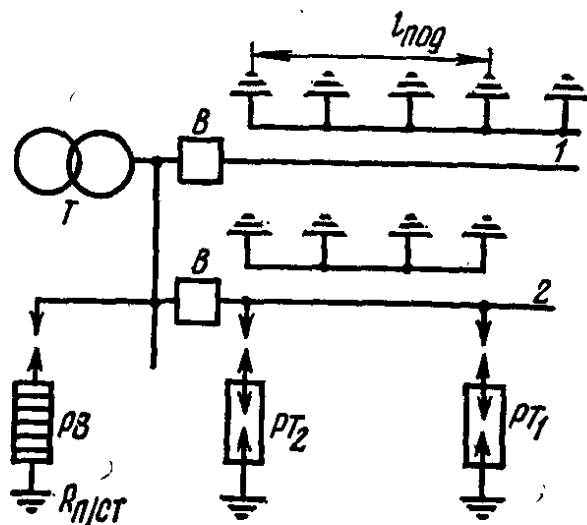


Рис. 14.9. Схемы защиты от набегающих волн подстанций 35 кВ и выше:

1 — линия с тросом по всей длине; 2 — линия без троса на деревянных опорах.

стимая крутизна приходящей волны. Для тупиковой подстанции 110 кВ с разрядниками РВС $U_{из} = 425$ кВ, $U_p = 285$ кВ, $a_{доп} = 300$ кВ/м, следовательно, $l_{доп} = (425 - 285) 300 / 2 \cdot 300 = 70$ м.

Более точные значения $l_{доп}$ определяют с учетом типа опор и длины подхода, группы разрядников и количества подключенных

к подстанции линий по таблицам, имеющимся, например, в ПУЭ. Эти расстояния лежат в пределах от 25—30 м при напряжениях 35 кВ до 200—250 м при 330—500 кВ. Если расстояние от РВ до выводов трансформаторов превышает $l_{\text{доп}}$, у трансформатора устанавливается дополнительный комплект РВ. Вентильные разрядники подключаются к контуру заземления подстанции по кратчайшему пути.

Линии напряжением 35 кВ и выше, защищенные тросами по всей длине (вариант 1), никакой специальной защиты подхода не требуют, кроме мероприятий по повышению уровня грозоупорности подхода (см. § 14.6).

Если линии не имеют грозозащитного троса по всей длине (вариант 2), они защищаются тросами на подходе к подстанции; длина подхода устанавливается такой, чтобы крутизна приходящей на шины волны не превышала допустимой величины (обычно достаточно взять $l_{\text{доп}} = 1—2$ км при напряжении 35 кВ и $l_{\text{доп}} = 1—3$ км при напряжениях 110—220 кВ, защитный угол $\alpha \leq 25^\circ$. Трос на каждой опоре подхода заземляется, сопротивление заземления опор в зависимости от ρ грунта должно быть не более 10—20 Ом.

Трубчатый разрядник PT_1 ограничивает амплитуду волны, движущейся к подстанции, до безопасной для вентильного разрядника величины. Разрядник PT_2 является резервным, он также защищает изоляцию линейного выключателя B в случае падения волны при его отключенном состоянии, когда волна отражается с удвоением амплитуды. Если линия выполнена на металлических (железобетонных) опорах, разрядники PT_1 и PT_2 не устанавливаются, ограничение перенапряжений происходит за счет сравнительно низкой импульсной прочности изоляции на таких опорах.

Кабельные вставки при напряжениях 35—220 кВ и их длине менее 1,5 км должны быть защищены с обеих сторон трубчатыми или вентильными разрядниками. При длине такой вставки более 1,5 км установки разрядников по концам кабеля не требуется.

Особенность применения автотрансформаторов заключается в том, что на свободной, т. е. отключенной выключателем, стороне автотрансформатора могут появиться опасные для его изоляции перенапряжения, связанные с переходом волн между обмотками. Поэтому вентильные разрядники должны устанавливаться на всех автотрансформаторно связанных обмотках; разрядники подключаются со стороны автотрансформатора перед выключателем и разъединителем.

Нейтрали трансформаторов 110—220 кВ, имеющих изоляцию, пониженную относительно изоляции линейного конца обмотки и допускающую работу с разземленной нейтралью, защищают вентильными разрядниками.

Упрощенные схемы грозозащиты с укороченной длиной защищенного подхода (150—500 м) применяются для подстанций 35 и 110 кВ с трансформаторами мощностью до 40 МВ·А, подключаемых короткими ответвлениями к действующим ВЛ на деревянных опорах. В этом случае вентильный разрядник размещают на рас-

стоянии не более 10 м от трансформатора; для уменьшения тока через РВ на линии с обеих сторон от защищенного подхода устанавливаются по 2 комплекта трубчатых разрядников на расстоянии 150—200 м друг от друга.

Схемы защиты от набегающих волн распределительных устройств 3—20 кВ представлены на рис. 14.10. Для воздушных линий таких напряжений характерна низкая поражаемость ударами молнии, так как эти линии имеют небольшую высоту и на подходе к подстанциям обычно экранируются расположенными вблизи сооружениями. Поэтому защиты подходов линий 3—20 кВ тросовыми молниеотводами не требуется. На подходе к подстанции линий с деревянными опорами устанавливается на расстоянии 200—300 м от подстанции трубчатый разрядник PT_1 ; второй разрядник PT_2 ставится для защиты разомкнутого выключателя B . Установки трубчатых разрядников PT_1 и PT_2 на подходах линии с металлическими или железобетонными опорами не требуется. Необходимо только заземлить эти опоры на участке подхода в 200—300 м.

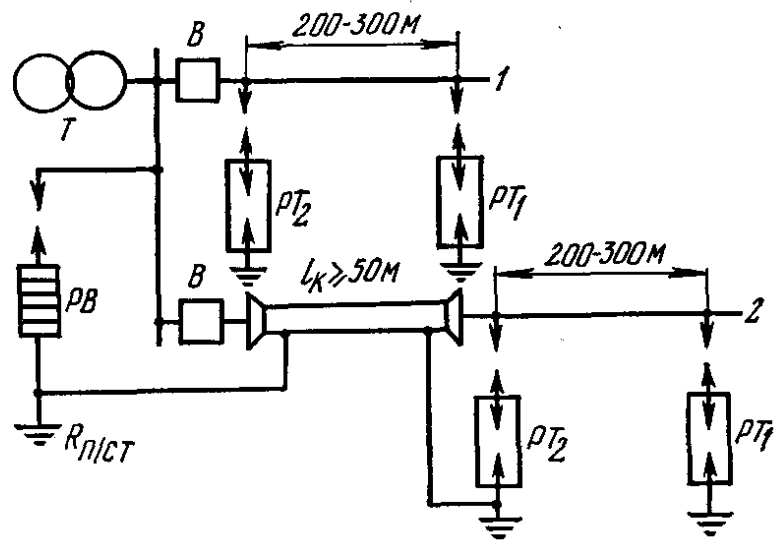


Рис. 14.10. Схемы защиты подстанций 3—20 кВ:

1 — линия на деревянных опорах; 2 — линия с кабельной вставкой.

В случае присоединения воздушной линии к подстанции с помощью кабельной вставки длиной до 50 м в месте присоединения кабеля к линии устанавливают комплект трубчатых разрядников PT_2 . Если линия выполнена на деревянных опорах, то на расстоянии 200—300 м от конца кабеля устанавливают комплект PT_1 . Заземление разрядника PT_2 соединяется с оболочкой кабеля, и при его срабатывании происходит вытеснение импульсного тока на оболочку кабеля, жила кабеля приобретает при этом потенциал оболочки. По мере продвижения волны происходит ее затухание в оболочке кабеля и стекание импульсного тока i в землю, в результате чего соответственно снижается потенциал оболочки и жилы. Сопротивление заземления подстанции $R_{п/ст}$, включенное на конце кабельного участка, обычно невелико, поэтому и падение напряжения $iR_{п/ст}$, воздействующее на изоляцию, будет очень малым.

При длине кабельных вставок свыше 50 м вместо PT_2 рекомендуется ставить вентильные разрядники, которые имеют более низкие пробивные напряжения.

Защита небольших подстанций напряжением 3—10 кВ (киосков или столбовых) осуществляется одним комплектом РВ, устанавливаемых на сборке у трансформатора или на вводе; вентильные разрядники допускается заменять трубчатыми.

14.8. ЗАЩИТА ВРАЩАЮЩИХСЯ МАШИН ОТ НАБЕГАЮЩИХ ВОЛН

Нормированные испытательные напряжения электрических машин высокого напряжения в эксплуатационных условиях равны $1,7 U_{\text{ном}}$, т. е. значительно ниже испытательных напряжений трансформаторов и других аппаратов. Импульсная прочность изоляции вращающихся машин незначительно превышает ее прочность при длительном воздействии напряжения, т. е. коэффициент импульса изоляции близок к единице.

Табл. 14.1. Импульсная прочность изоляции и остающиеся напряжения вентильных разрядников

Показатель	$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$		
	3	6	10
$U_{\text{и. доп}}, \text{кВ}$:			
трансформаторов	44	60	80
вращающихся машин	7,6	15,2	25,2
$U_{\text{ост}}$ разрядников при токе 3 кА, кВ:			
РВМ	9	17	28
РВТ	7	14	23,5

В табл. 14.1 приведены для сравнения допустимые импульсные напряжения на главной изоляции трансформаторов и вращающихся машин, а также остающиеся напряжения вентильных разрядников для классов напряжения 3, 6 и 10 кВ.

Как видно из таблицы, только у разрядников РВТ (I группа) остающееся напряжение при токе до 3 кА несколько ниже допустимого импульсного напряжения на изоляции машин, но интервал между этими напряжениями незначителен. Поэтому к грозозащите электрических машин, связанных непосредственно с воздушными линиями, предъявляются повышенные требования.

Следует отметить, что ввиду трудности координации импульсной прочности изоляции вращающихся машин с характеристиками вентильных разрядников непосредственное присоединение воздушных линий на металлических или железобетонных опорах допускается только для вращающихся машин мощностью до 50 МВ·А (для линий с деревянными опорами — до 25 МВ·А). При большей мощности вращающихся машин воздушные линии допускается присоединять только с помощью разделяющих трансформаторов, что делает излишней всю схему грозозащиты машин (при соответствующей, конечно, грозозащите трансформаторов).

В случае присоединения воздушных линий к вращающимся машинам через трансформаторы (например, блок генератор — трансформатор) на изоляцию вращающихся машин будут воздействовать перенапряжения, возникающие за счет емкостной и электромагнитной передачи напряжения через обмотки. При наличии на стороне низшего напряжения кабелей или закрытых шинопроводов, соединяющих трансформатор с вращающейся машиной, напряже-

ние u_2 , возникающее за счет емкостной передачи, снижается обычно до величины, безопасной для изоляции машины. При применении воздушных перемычек, надежно защищенных от прямых ударов молнии, остается опасность появления индуктированных перенапряжений. Для их снижения бывает достаточно включить параллельно изоляции вращающейся машины вентильные разрядники I группы и конденсаторы емкостью 0,1—0,5 мкФ.

При электромагнитной передаче на обмотки вращающихся машин передается в соответствии с коэффициентом трансформации остающееся напряжение разрядника стороны ВН трансформатора. Если защита трансформатора выполнена разрядниками РВМ, то напряжение на изоляции машины при этом не превышает допустимого, и защиты ее не требуется.

Таким образом, вращающиеся машины, соединенные с воздушными линиями через трансформаторы, обычно не требуют никакой дополнительной грозозащиты, и на стороне низшего напряжения вентильные разрядники могут не устанавливаться.

Грозозащита вращающихся машин, присоединенных к воздушным линиям, может быть надежно осуществлена только с помощью вентильных разрядников I группы типа РВТ. Для увеличения координационного интервала ток через РВ желателно ограничить до 1,5 кА, для чего на подходе обязательно устанавливают трубчатые разрядники с сопротивлением R_3 не более 5 Ом. Для облегчения условий работы главной и межвитковой изоляции машин в схемах грозозащиты широко применяют защиту подхода от прямых ударов молнии (защитный уровень подхода должен быть не менее 50 кА), кабельные вставки, используют реакторы L и конденсаторы C — все это вызывает значительное снижение крутизны a падающей волны и в ряде случаев уменьшает также ее амплитуду.

На рис. 14.11 приведены варианты рекомендуемых схем грозозащиты вращающихся машин. Подход линий на металлических или железобетонных опорах (рис. 14.11, а) должен быть защищен от прямых ударов молнии тросом на протяжении не менее 300 м; в на-

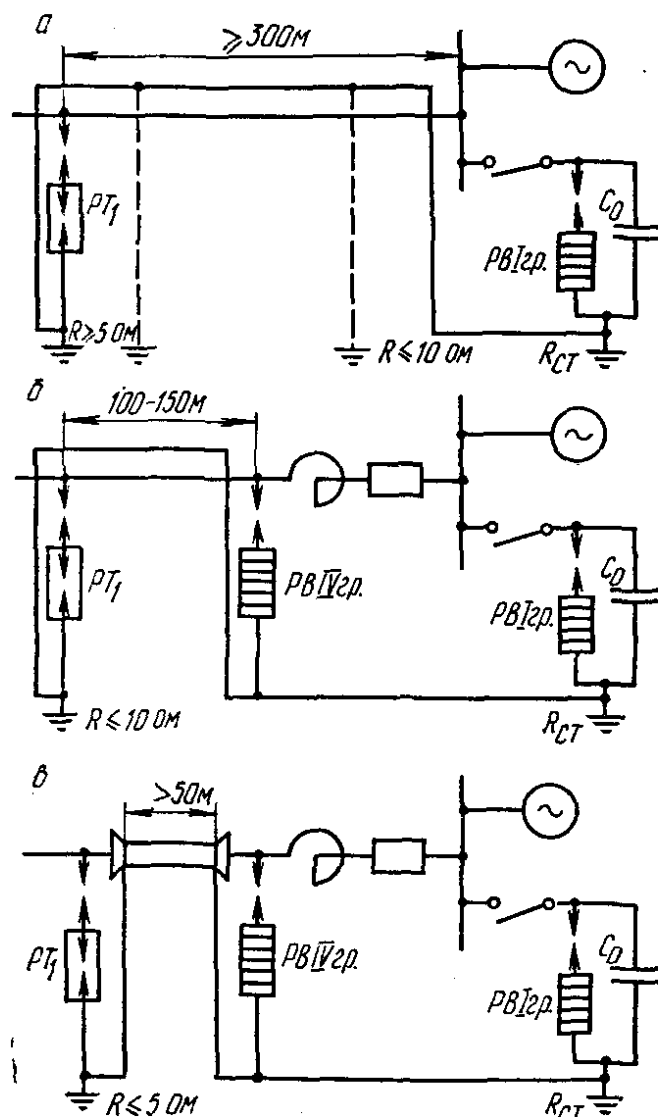


Рис. 14.11. Схемы защиты вращающихся машин от грозовых перенапряжений.

чале подхода устанавливаются трубчатые разрядники PT_1 . Опоры защищенного тросом подхода должны иметь деревянные траверсы с изоляционным расстоянием не менее 1 м по дереву; провода следует подвешивать на изоляторах класса 35 кВ. На подходе ВЛ с деревянными опорами дополнительно на расстоянии 150 м от его начала в сторону линии устанавливают трубчатые разрядники PT_2 .

На воздушной линии, соединенной с шинами кабельной вставкой длиной до 0,5 км, защиту подхода осуществляют таким же образом, в месте присоединения воздушной линии к кабелю устанавливают вентильный разрядник IV группы с R_3 не более 5 Ом.

При наличии реактора подход воздушной линии защищается от прямых ударов молнии на расстоянии 100—150 м, в начале подхода устанавливается трубчатый разрядник PT_1 , а в месте присоединения реактора — вентильные разрядники IV группы (рис. 14.11, б).

В случае присоединения воздушной линии через реактор и кабельную вставку длиной более 50 м защита подхода от прямых ударов молнии не требуется (рис. 14.11, в).

Во всех случаях нейтраль вращающихся машин, если она выведена, защищается вентильным разрядником, который шунтируется конденсатором $C=0,25—0,5$ мкФ для ограничения среза волны. Для одновитковых машин с разрядником в нейтрали конденсаторы на вводе машин не требуются. Эти конденсаторы также не устанавливаются в любых случаях, если суммарная емкость кабельных участков длиной до 100 м составляет 0,5 мкФ и более на фазу.

15. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

15.1. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И ИХ КРАТНОСТИ

Внутренними называют перенапряжения, которые возникают в электрических системах при различного рода переходных процессах (включения, отключения, к. з., неполнофазные и неустановившиеся режимы и т. п.). Термином «внутренние» как бы подчеркивается независимость этих перенапряжений от внешних, например атмосферных, воздействий. Внутренние перенапряжения весьма разнообразны по причинам, их вызывающим, и по характеру их протекания. Можно выделить четыре основные группы внутренних перенапряжений: перенапряжения, обусловленные емкостным эффектом; перенапряжения, связанные с феррорезонансными явлениями в электрических установках; коммутационные перенапряжения при включении и отключении различных цепей в нормальном и аварийном режимах и перенапряжения при дуговых замыканиях на землю в системах с изолированной нейтралью.

Перенапряжения, вызываемые емкостным эффектом, относятся к квазистационарным процессам и наблюдаются в длинных ненагруженных линиях 330 кВ и выше. Перенапряжения эти представ-

ляют повышение напряжения промышленной частоты, и длительность их действия определяется характером режима — от нескольких секунд в режиме послеаварийного отключения линии до 1 ч в условиях включения линии с последующей синхронизацией систем.

Феррорезонансные перенапряжения обусловлены наличием нелинейных цепей со сталью (трансформаторов, реакторов). При рабочей частоте эти перенапряжения наблюдаются чаще всего в системах с заземленной и изолированной нейтралью при неполнофазных режимах. Феррорезонанс может наблюдаться также при высших и низших гармониках. Длительность действия феррорезонансных перенапряжений может быть достаточно большой, т. е. они также относятся к перенапряжениям установившегося режима.

Коммутационные перенапряжения носят, как правило, характер колебательного затухающего импульса (рис. 15.1) с частотой, превышающей промышленную. Заканчиваются эти перенапряжения

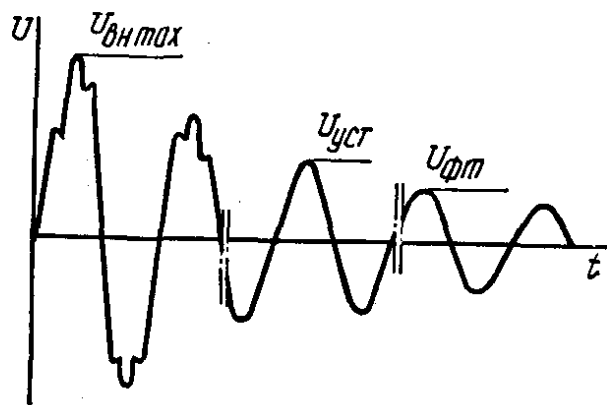


Рис. 15.1. Измерение напряжения в системе при коммутационном перенапряжении.

установившимся или квазистационарным режимом, при этом вынужденная составляющая установившегося режима $U_{уст}$ может быть повышенной по отношению к рабочему напряжению. Длительность действия коммутационных перенапряжений чаще всего не превышает долей секунды, но тем не менее значительно превышает длительность действия грозowych импульсов.

Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю в системах с изолированной нейтралью носят также характер затухающих колебательных импульсов, но воздействовать на изоляцию эти импульсы могут многократно, пока однофазное замыкание не будет найдено и ликвидировано.

Внутренние перенапряжения по длительности условно можно разделить на две группы: длительные, или квазистационарные, и собственно коммутационные. Хотя опасность воздействия перенапряжений на изоляцию зависит не только от их величины, но также от формы, длительности и повторяемости, основной характеристикой внутреннего перенапряжения $U_{вн max}$ является его кратность $k_{вн}$ по отношению к амплитудному значению номинального фазового напряжения $U_{ф m}$:

$$k_{вн} = \frac{U_{вн max}}{U_{ф m}} = \frac{U_{вн max}}{U_{уст}} \frac{U_{уст}}{U_{ф m}} = k_{уд} k_{уст},$$

где $k_{уст}$ — кратность установившегося (квазистационарного) перенапряжения; $k_{уд}$ — ударный коэффициент.

Кратности внутренних перенапряжений не должны превышать определенных величин, зависящих от номинального напряжения

системы, вида и длительности перенапряжений. Допустимые кратности определяются на основании технико-экономических расчетов с учетом уровня изоляции оборудования и мер по ограничению перенапряжений. В табл. 15.1 приведены допустимые кратности для коммутационных перенапряжений и допустимое повышение рабочего напряжения $U_{\text{раб max}}$ по отношению к номинальному $U_{\text{н}}$.

При увеличении длительности воздействия перенапряжения допустимые кратности уменьшаются.

До напряжения 220 кВ кратности реальных коммутационных перенапряжений в электроустановках не превышают указанных в табл. 15.1 величин, и специальных мер по ограничению коммутационных перенапряжений в этих установках практически не требуется.

Табл. 15.1. Допустимые кратности коммутационных перенапряжений

Параметры	Режим нейтрали								
	изолированная				заземленная				
$U_{\text{н}}, \text{кВ}$	3—10	15; 20	35	110—220	330	500	750	1150	
$U_{\text{раб max}}/U_{\text{н}}$	1,2	1,2	1,15	1,15	1,1	1,05	1,05	1,05	
$k_{\text{доп}}$	4,5	4,0	3,5	3,0	2,7	2,5	2,1	1,8	

При напряжении 330 кВ и выше кратность коммутационных перенапряжений ограничивается до приведенных в табл. 15.1 величин с помощью специальных разрядников и устройств. Устранение или ограничение длительных перенапряжений возможно только с помощью схемных и режимных мероприятий.

15.2. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И ИХ ПАРАМЕТРЫ

Внутренние перенапряжения могут быть проанализированы с помощью расчета схем замещения, исследований на моделях и ЦВМ. Особую ценность представляют материалы непосредственных измерений внутренних перенапряжений в действующих сетях.

Схема для расчета должна включать все основные элементы, оказывающие влияние на процесс возникновения и развития пере-

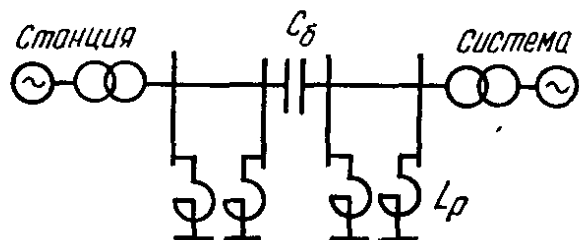


Рис. 15.2. Упрощенная схема электропередачи сверхвысокого напряжения (СВН).

напряжения: генераторы, системы, трансформаторы, линии, реакторы, емкости продольной компенсации (рис. 15.2). При этом в расчетах должны быть учтены каналы прямой и нулевой последовательности.

Расчеты чаще всего ведутся в относительных единицах. За базисные величины принимаются обычно угловая частота источника

ω , номинальное фазовое напряжение U_ϕ и волновое сопротивление линии z . При этих условиях базовая мощность равна натуральной:

$$P_{\text{баз}} = 3I_{\text{баз}}U_\phi = \frac{3U_\phi^2}{z} = \frac{U_{\text{н}}^2}{z} = P_{\text{нат.}}$$

Все остальные расчетные величины выражаются по отношению к базисным. Например, относительные сопротивления сосредоточенных емкостей и индуктивностей

$$\dot{x}_L = \frac{\omega L}{z}; \quad \dot{x}_C = \frac{1}{\omega C z}.$$

Относительная мощность реактора

$$q_p = \frac{Q_p}{P_{\text{нат}}} = \frac{U^2}{x_p} \frac{z}{U^2} = \frac{z}{x_p} = \frac{z}{\omega L_p}.$$

Относительная мощность батареи конденсаторов C_δ продольной компенсации

$$q_c = \frac{Q_c}{P_{\text{нат}}} = \frac{I_{\text{нат}}^2 x_c}{P_{\text{нат}}} = \frac{U^2}{z^2} \frac{z}{U^2} x_c = \frac{x_c}{z} = \frac{1}{\omega C_\delta z}.$$

Трансформаторы и автотрансформаторы вводятся в расчетные схемы в виде звеньев (рис. 15.3), в которых в ветвях прямой и нулевой последовательностей учитываются магнитные шунты. Генераторы и системы учитываются как симметричные источники ЭДС с относительными сопротивлениями:

$$\dot{x}_r = \frac{x_r}{z}; \quad \dot{x}_c = \frac{x_c}{z}.$$

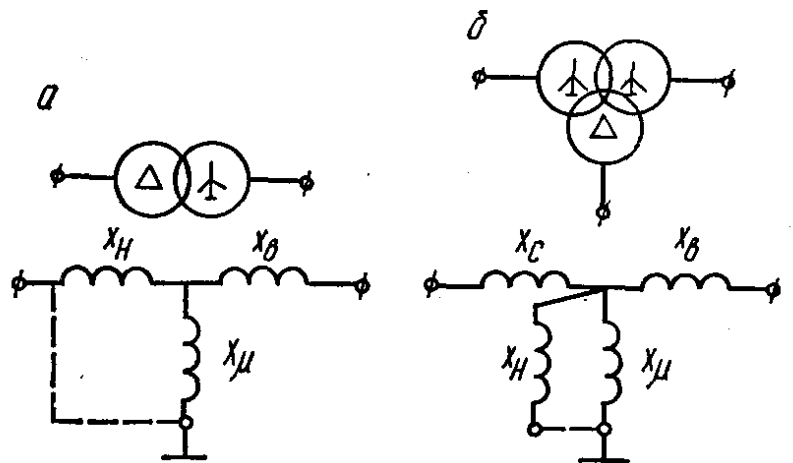


Рис. 15.3. Схема замещения двухобмоточного (а) и трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора (б). Пунктир — для схем нулевой последовательности.

При расчетах этих величин принимаются во внимание мощность генератора S и мощность трехфазного к. з. в системе $S_{\text{к.з.}}^{(3)}$:

$$\dot{x}_r = \frac{x_r}{z} = \frac{x_r \%}{100} \frac{P_{\text{нат}}}{S}; \quad \dot{x}_c = \frac{x_c}{z} = \frac{P_{\text{нат}}}{S_{\text{к.з.}}^{(3)}}.$$

Сопротивление генератора x_r берется как сверхпереходное x_d'' или переходное x_d' в зависимости от длительности процесса.

Для учета линий необходимо вычислить их распределенные параметры. Удельные параметры линии по каналам прямой и нулевой последовательностей зависят от геометрических размеров линии, числа проводов в фазе, сопротивления грунта, короны и т. д. Расчеты этих величин (особенно для нулевой последовательности) до-

Табл. 15.2. Расчетные формулы для параметров одноцепной ВЛ (без учета тросов и короны)

Схема	Удельные параметры			
	продольная индуктивность, Гн/км	продольное сопротивление, Ом/км	поперечная емкость, Ф/км	поперечная проводимость, см
Прямая последовательность	$L'_0 = 0,46 \lg \frac{d}{r_s} 10^3$	$r'_0 = r_{\text{пр}} \approx r_0$	$C'_0 = \frac{24 \cdot 10^{-9}}{\lg \frac{2h}{r_s} \frac{d}{D}}$	$q_0 = 0$
Нулевая последовательность	$L_0^0 \geq 3L'_0$	$r'_s = r_{\text{пр}} + 3\pi^2 f \times 10^{-4} \approx 15 \cdot 10^{-2}$	$C_0^0 = \frac{24 \cdot 10^{-9}}{\lg \frac{2h}{r_s} + 2 \lg \frac{D}{d}}$	$q_0 = 0$

Примечание: r_s — эквивалентный радиус провода — равен радиусу провода для линий с одиночными проводами и определяется по формулам, приведенным в табл. 1.6 для линий с расщепленными проводами; d — среднегеометрическое расстояние между фазами; D — среднегеометрическое расстояние между проводом и зеркальным отображением других проводов; h — среднегеометрическая высота подвеса провода; $r_{\text{пр}}$ — сопротивление провода; f — частота.

Табл. 15.3. Типичные параметры для ВЛ 500 кВ

Схема	Параметры				
	индуктивность, Гн/км	активное сопротивление, Ом/км	емкость, Ф/км	z , Ом	v , км/с
Прямая последовательность	$(0,9 - 0,085) 10^{-3}$	$0,022 - 0,024$	$(0,125 - 0,135) \times 10^{-7}$	270	$2,95 \cdot 10^5$
Нулевая последовательность	$(3 - 3,5) 10^{-3}$	$0,17 - 0,26$	$0,08 \cdot 10^{-7}$	590	$1,97 \cdot 10^5$

статочны приближенные. Расчетные формулы и усредненные параметры приведены в табл. 15.2 и 15.3.

При оценке индуктивного сопротивления и емкостной проводимости линии в относительных единицах используют соотношения:

$$x_{L_{\text{л}}}^* = \omega \dot{L}_{\text{л}}^* = \frac{\omega L'_0 l}{z} = \frac{\omega L_0 l}{\sqrt{L_0 C_0^{-1}}} = \frac{\omega l}{v} = \beta l;$$

$$y_{C_{\text{л}}}^* = \omega \dot{C}_{\text{л}}^* = \frac{\omega C'_0 l}{z^{-1}} = \omega C_0 l \sqrt{L_0 C_0^{-1}} = \frac{\omega l}{v} = \beta l.$$

Параметр $\frac{\omega l}{v} = \beta l$ называется волновой длиной линии (измеряется в угловых градусах или км); $v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$ — скорость распростране-

ния волны. Заметим еще, что отношение $\frac{q_c}{\beta l} = k_c$ определяет степень компенсации индуктивного сопротивления линии с помощью батареи конденсаторов продольной компенсации. Отношение $\frac{q_p}{\beta l}$ имеет тот же смысл, но в этом случае индуктивное потребление реактора компенсирует емкостную проводимость линии.

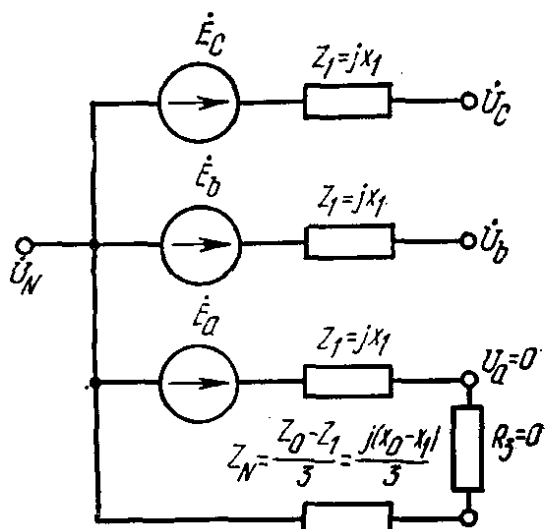
15.3. ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ НА ВЕЛИЧИНУ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

На величину внутренних перенапряжений оказывает влияние способ заземления нейтрали.

В сетях с изолированной нейтралью замыкание одной фазы на землю не нарушает в большинстве случаев работы системы, но на-

Рис. 15.4. Расчетная схема замещения для однофазного к.з. в сетях с заземленной нейтралью:

$$\begin{aligned} \dot{E}_b &= \dot{U}_b + \dot{U}_N; \quad \dot{E}_c = \dot{U}_c = \dot{U}_N; \quad |E| = U_\Phi: \\ \dot{E}_b &= E_a e^{j\frac{2\pi}{3}}; \quad \dot{E}_c = E_a e^{-j\frac{2\pi}{3}}. \end{aligned}$$



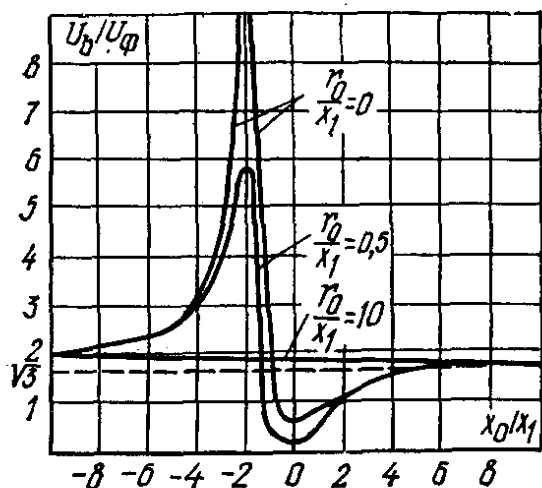
пряжение на двух здоровых фазах повышается до линейного. Внутренние перенапряжения при этом получаются выше, чем в сетях с глухо заземленной нейтралью, так как напряжения свободных колебаний накладываются на напряжение установившегося режима, равное линейному, а не фазовому, как это имеет место в сетях с глухо заземленной нейтралью. Следовательно, уровень изоляции таких сетей, имеющих преимущество в отношении надежности электроснабжения, должен быть выше, чем сетей с глухо заземленной нейтралью.

В сети с глухо заземленной нейтралью ($R_3 < 0,5$ Ом) при учете только реактивных элементов (рис. 15.4) зависимость величины установившихся перенапряжений на здоровых фазах от отношения x_0/x_1 сопротивлений нулевой и прямой последовательностей выражается соотношением

$$k_{\text{пер}} = \frac{U_{b,c}}{U_\Phi} = \left| 1 + e^{\pm j\frac{\pi}{3}} \left(1 - \frac{3}{2 + \frac{x_0}{x_1}} \right) \right| = f\left(\frac{x_0}{x_1}\right). \quad (15.1)$$

Из выражения (15.1) следует, что в системах с эффективно заземленной нейтралью при $\frac{x_0}{x_1} \leq 3$ перенапряжения на здоровых фа-

зах с учетом допустимого повышения номинального напряжения на 10—15 % (сети 110—220 кВ) не превышают $1,25 U_{ф \max} \approx 1,4 U_{\phi} \approx \approx 0,8 U_{н}$. При $\frac{x_0}{x_1} > 3$ напряжения на здоровых фазах повышаются, стремясь при $\frac{x_0}{x_1} \rightarrow \infty$ к теоретическому пределу $\sqrt{3} U_{ф \max} \approx \approx 1,1 U_{н}$ для сети с изолированной нейтралью.



В рассмотренной схеме возможны также резонансные явления, например в области изолированной нейтрали при $\frac{x_0}{x_1} = -2$ (рис.

Рис. 15.5. Зависимость напряжения на фазе b (рис. 15.4) от отношения $\frac{x_0}{x_1}$ для разных $\frac{r_0}{x_1}$ при однофазном к. з. на фазе a .

15.5). Однако условия наступления такого резонанса в реальных сетях с изолированной нейтралью практически невыполнимы. В длинных линиях сверхвысокого напряжения (СВН) такой резонанс может наступить при отключении несимметричных к. з. Учет активных сопротивлений прямой и в особенности нулевой последовательности приводит к снижению расчетных величин перенапряжений на здоровых фазах.

15.4. ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ХАРАКТЕР ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Внутренние перенапряжения являются случайными процессами, их параметры носят вероятностный характер и могут быть оценены вполне лишь с применением статистических методов. Вероятность совпадения факторов или процессов, которые могут привести к той или другой величине $k_{вн}$, уменьшается при росте $k_{вн}$. Следовательно, чем выше перенапряжение, тем оно реже наблюдается. На основе расчетов на моделях и ЦВМ, а также регистрации внутренних перенапряжений в энергосистемах накоплены данные, позволяющие произвести оценку возникновения перенапряжений той или иной кратности. При этом наметились четыре типичные группы подстанций: к I группе относятся подстанции 110—220 кВ с числом отходящих линий от 2 до 4 и оснащенные выключателями, дающими повторные зажигания дуги; ко II группе — те же подстанции, но с выключателями, не дающими повторных зажиганий; к III — подстанции 500 кВ с числом линий не более 4 и к IV — узловые подстанции с числом отходящих линий более 4.

На рис. 15.6 представлены графики вероятности возникновения внутренних перенапряжений на подстанции кратностью k_τ и более, отнесенные к одному году. Из графиков следует, что вероятность появления перенапряжений с кратностью 2,9 составляет менее 0,01 для наиболее неблагоприятных условий I группы. Для II группы такая вероятность соответствует кратности 2,1, а для остальных групп — не более 1,9. Подобные графики получены и для линий.

Статистические данные о перенапряжениях являются ценным материалом для выбора уровней изоляции оборудования линий и подстанций. Чтобы такой выбор был обоснованным, данные должны быть достаточно полными. Аналитические расчеты внутренних перенапряжений, а также расчеты с при-

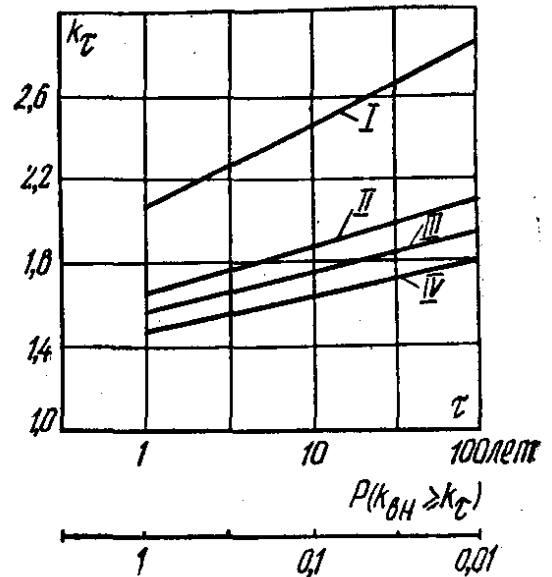


Рис. 15.6. Кратности внутренних перенапряжений k_τ , которые наблюдаются один раз в τ лет, и соответствующие им вероятности $P(k_{вн} \geq k_\tau)$, отнесенные к одному году для I, II, III и IV групп подстанций.

влечением ЦВМ и моделей служат прежде всего для оценки максимальных величин и характера перенапряжений в тех или иных условиях. Это позволяет не только предугадать возможность возникновения перенапряжения того или другого вида и величины, но также наметить и реализовать меры по предотвращению и ограничению внутренних перенапряжений.

16. ПОВЫШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ЕМКОСТНЫМ ЭФФЕКТОМ

16.1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ДЛИННЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

Решая основные исходные уравнения (8.1) для линий с распределенными параметрами при установившемся синусоидальном режиме, получим известные уравнения, связывающие напряжение и ток в начале линии (U_1 и I_1) с напряжением и током в ее конце (U_2 и I_2):

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \dot{\gamma} l + \dot{I}_2 Z \operatorname{sh} \dot{\gamma} l; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_2 \operatorname{ch} \dot{\gamma} l + \frac{\dot{U}_2}{Z} \operatorname{sh} \dot{\gamma} l, \end{aligned} \right\} \quad (16.1)$$

где $\dot{\gamma} = \alpha + j\beta = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0)(g_0 + j\omega C_0)}$ — коэффициент распространения; α — коэффициент затухания; β — коэффициент сдвига фаз; $Z = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0)(g_0 + j\omega C_0)^{-1}}$ — волновое сопротивление линии.

Для линии с малыми потерями (при отсутствии короны) $\frac{r_0}{L_0} \ll \ll 1$ и $g_0 = 0$. Воспользовавшись приближенным извлечением корня $(\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{x}{2})$, получим

$$\dot{\gamma} \approx \frac{r_0}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} + j\omega \sqrt{L_0 C_0}, \quad (16.2)$$

т. е. $\alpha = \frac{r_0}{2z}$; $z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$; $\beta = \omega \sqrt{L_0 C_0} = \frac{\omega}{v} \approx 1,05 \cdot 10^{-3}$ рад/км $\approx \approx 0,06^\circ/\text{км}$ ($v = c = 3 \cdot 10^5$ км/с; $\omega = 1,8 \cdot 10^4$ °/с).

С учётом условий (16.2) и считая $\alpha l \ll 1$, $\text{ch} \alpha l \approx 1$, $\text{sh} \alpha l \approx \alpha l$, что справедливо для линий с $l < 1500$ км, вместо выражения (16.1) получим уравнения с круговыми функциями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 (\cos \beta l + j \alpha l \sin \beta l) + \dot{I}_2 z (\alpha l \cos \beta l + j \sin \beta l); \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_2 (\cos \beta l + j \alpha l \sin \beta l) + \frac{\dot{U}_2}{z} (\alpha l \cos \beta l + j \sin \beta l). \end{aligned} \right\} \quad (16.3)$$

Для линий без потерь $r_0 = 0$, $\alpha = 0$, $\dot{\gamma} = j\omega \sqrt{L_0 C_0} = j\beta$ и уравнения (16.1) еще более упрощаются:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \cos \beta l + j \dot{I}_2 z \sin \beta l; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_2 \cos \beta l + j \frac{\dot{U}_2}{z} \sin \beta l. \end{aligned} \right\} \quad (16.4)$$

Формулы (16.3) и (16.4) удобны для анализа практически важных случаев квазистационарных перенапряжений в длинных линиях электропередачи.

16.2. НАПРЯЖЕНИЯ НА КОНЦЕ ДЛИННОЙ НЕНАГРУЖЕННОЙ ЛИНИИ

Если длинная линия внезапно отключится со стороны нагрузки (рис. 16.1), то может наступить режим холостого хода (х. х.) линии с возможным значительным повышением напряжения, особен-

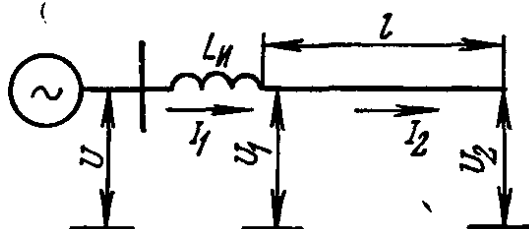


Рис. 16.1. Схема замещения линии, разомкнутой на конце.

но на ее конце. К такому же режиму приводит включение электропередачи со стороны источника мощности с последующей синхронизацией систем. Перенапряжения эти обусловлены емкостным эффектом, т. е. протеканием емкостного тока через индуктивности источника и линии. Время действия таких перенапряжений может быть достаточно большим.

Если напряжение в начале линии U неизменно (источник бесконечной мощности с $L_{\text{н}}=0$), то при х. х. $U_1=U$; $I_2=0$ и для линии без потерь

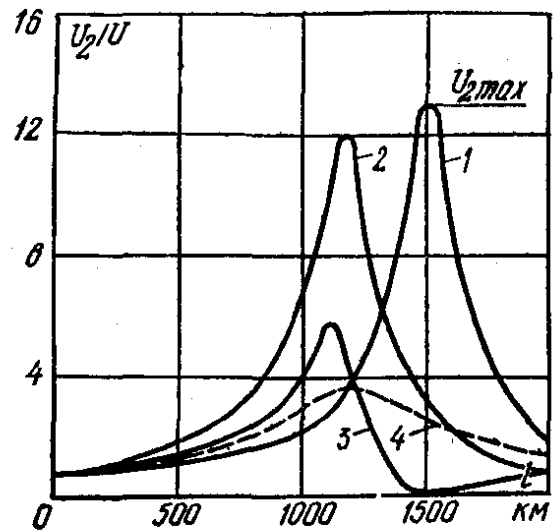
$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 \frac{1}{\cos \beta l} = \frac{\dot{U}}{\cos \frac{\omega}{v} l}; \quad K = \frac{U_2}{U} = \frac{1}{\cos \beta l}; \quad (16.5)$$

$$Z_{\text{вх}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = -jz \operatorname{ctg} \beta l. \quad (16.6)$$

Здесь K — коэффициент передачи по напряжению; $Z_{\text{вх}}$ — входное сопротивление линии.

Рис. 16.2. Резонансные кривые для длинной линии, разомкнутой на конце:

1 — $L_{\text{н}}=0$; 2 — $\omega L_{\text{н}}=0,5z$; 3 — $\frac{U_1}{U}$ при $\omega L_{\text{н}}=0,5z$; 4 — $L_{\text{н}}=0$, но с учетом короны. Для кривых 1, 2, 3 $\omega L/r \approx 10$.



Как следует из формулы (16.5), напряжение в конце линии зависит от ее длины и при резонансной длине $l_{\text{рез}} = \frac{\pi v}{2\omega}$; $\beta l_{\text{рез}} = \frac{\pi}{2}$ достигает максимума (кривая 1 на рис. 16.2). При промышленной частоте $f = 50$ Гц резонанс наступает при $l = 1500$ км. Собственная частота колебаний такой четвертьволновой линии ω_1 равна частоте источника ω . Максимум ограничивается наличием активных потерь в продольном сопротивлении линии r_0 ($k_{\text{max}} = \frac{U_{2 \text{ max}}}{U} = \frac{4}{\pi} \frac{\omega L_0}{r_0}$) и потерь на корону. Последние быстро возрастают при повышении напряжения по отношению к начальному напряжению возникновения короны, что ограничивает рост перенапряжений.

Заметное влияние на распределение и величину перенапряжений в ненагруженной линии могут оказать индуктивности источника мощности (генераторы, трансформаторы). С учетом эквивалентной индуктивности $L_{\text{н}}$, включенной последовательно между источником и линией (см. рис. 16.1), для линии без потерь:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos \beta l; \quad \dot{U}_1 = \dot{U} - j\dot{I}_1 \omega L_{\text{н}}; \quad \dot{I}_1 = j \frac{\dot{U}_2}{z} \sin \beta l. \quad (16.7)$$

Решая уравнения (16.7) совместно, получим

$$K = \frac{U_2}{U} = \frac{1}{\cos \beta l + \sin \beta l \frac{\omega L_{\text{н}}}{z}} = \frac{\cos \varphi}{\cos (\beta l + \varphi)},$$

где

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L_{\text{н}}}{z}.$$

Поэтому при наличии индуктивности перед линией длина линии, при которой наступает резонанс, уменьшается:

$$l_{\text{рез}} = \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) v}{\omega} < \frac{\pi v}{2\omega}.$$

На рис. 16.2 приведена резонансная кривая 2 для реальной линии при $\omega L_{\text{н}} = 0,5 z$.

Изменение $L_{\text{н}}$ меняет $l_{\text{рез}}$ линии, поэтому перенапряжения, обусловленные емкостным эффектом при х. х., в реальных линиях могут достичь особенно опасных величин, если х. х. предшествовал режим минимальных нагрузок, когда на станции включены не все блоки и $L_{\text{н}}$ повышено, а $l_{\text{рез}}$ снижено.

Отметим еще, что при небольших длинах линии ($l = 100 - 150$ км) разомкнутая на конце и включенная последовательно с $L_{\text{н}}$ линия может быть в схемах замещения заменена сосредоточенной емкостью $C_{\text{л}} = C_0 l$, а при $l = 200 - 300$ км вполне правомерна схема замещения с последовательным включением емкости $C_{\text{л}} = C_0 l$ и индуктивности $L_{\text{л}} = L_0 l / 2$. В этих случаях явления могут быть рассчитаны по известным формулам для колебательного контура. Максимум напряжения в резонансной области ограничивается r_0 и сопротивлением источника. Однако наибольшее влияние на снижение перенапряжений х. х. оказывают корона и устройства поперечной и продольной компенсации.

16.3. ВЛИЯНИЕ КОРОНЫ НА ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

Появление короны на проводах меняет условия развития перенапряжений. Как было показано в § 1.5, возникновение короны связано с возрастанием в несколько раз активных потерь и увеличением емкости провода, которые нелинейно и резко зависят от напряжения. Поэтому точный расчет явлений при наличии короны практически невозможен. Качественную оценку влияния короны можно сделать, введя в схему замещения линии поперечную проводимость $g_{\text{ок}}(U)$ и дополнительную емкость $\Delta C_{\text{ок}}(U)$. Тогда в уравнениях (16.1)

$$\dot{Y}_{\text{к}} = \alpha_{\text{к}} + j\beta_{\text{к}} = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0) \{g_{\text{ок}}(U) + j\omega [C_0 + \Delta C_{\text{ок}}(U)]\}}.$$

Теоретический анализ с использованием экспериментальных зависимостей $P_{\text{к}} = f(U)$ и $\Delta C_{\text{ок}} = f(U)$ и последующая проверка на моделях показывают, что влияние дополнительной емкости $\Delta C_{\text{ок}}$ может привести к некоторому сдвигу области резонанса в сторону меньших расстояний и небольшому повышению напряжения в до-резонансной зоне. В области резонанса потери на корону сильно ограничивают перенапряжения, хотя величина их может достигать $3 U_{\text{ф}}$, т. е. кратностей, все еще опасных и недопустимых для изоляции (кривая 4 на рис. 16.2).

16.4. ВЛИЯНИЕ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

16.4.1. Влияние шунтирующих реакторов

Реакторы устанавливаются для регулирования потоков реактивной мощности в режиме пониженной нагрузки, а также для ограничения до допустимых величин перенапряжений, обусловленных емкостным эффектом. Рассмотрим влияние реактора на перенапряжения х.х.

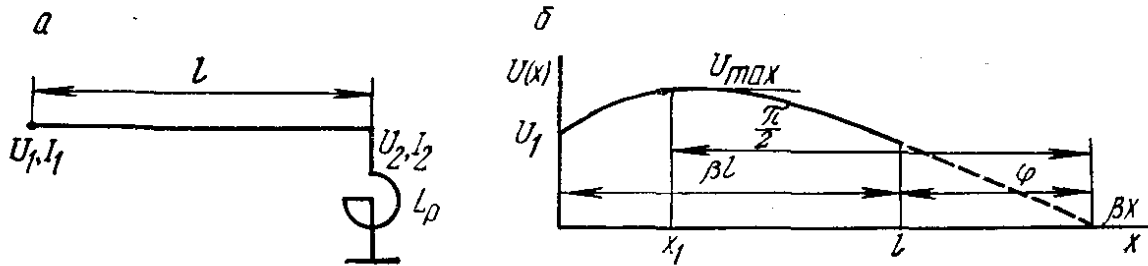


Рис. 16.3. Схема (а) и распределение напряжения (б) для одно-сторонне включенной линии с реактором на конце.

При установке реактора L_p в конце линии без потерь (рис. 16.3, а), используя уравнения (16.4), можем записать:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{j\omega L_p}; \quad \dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos \beta l + j\dot{I}_2 z \sin \beta l,$$

откуда

$$K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\sin \varphi}{\cos \beta l \sin \varphi + \sin \beta l \cos \varphi} = \frac{\sin \varphi}{\sin (\beta l + \varphi)}, \quad (16.8)$$

где

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L_p}{z}.$$

Как следует из выражения (16.8), в данном случае (при $l < 1500$ км) напряжение в конце линии ограничено по величине и зависит от индуктивности (мощности) реактора. Резонансная длина линии с реактором в конце сдвигается в область больших длин, так как

$$l_{\text{рез}} = \frac{\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) v}{\omega} > \frac{\pi v}{2\omega}.$$

Распределение напряжения вдоль такой линии (рис. 16.3, б) определяется соотношением

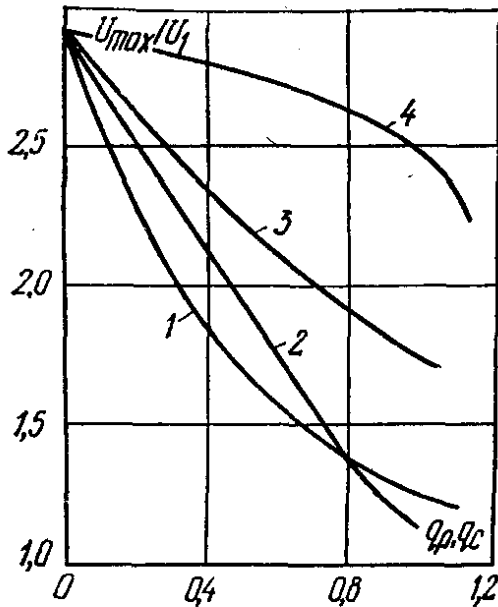
$$U(x) = U_1 \frac{\sin [\beta(l-x) + \varphi]}{\sin (\beta l + \varphi)},$$

т. е. реактор можно представить как участок короткозамкнутой на конце линии с волновой длиной φ и входным сопротивлением $Z_{\text{вх}} = j\omega L_p$. При этом максимум напряжения

$$U_{\text{max}} = \frac{U_1}{\sin (\beta l + \varphi)} = U_2 \sqrt{1 + q_p^2}$$

$(q_p = \frac{z}{\omega L_p} — \text{относительная мощность реактора})$ наблюдается в точке $x_1 = l - (\frac{\pi}{2} - \varphi) \beta$.

Можно рассчитать напряжение $U(x)$ для общего случая с произвольным местом установки одного или нескольких реакторов.



Максимальные напряжения будут зависеть от размещения, мощности и числа реакторов. Как видно из рис. 16.4, наименьшее влияние оказывает реактор, размещенный в начале линии. Влияние реактора, установленного в конце или середине линии, практически равнозначно и приводит к заметно-

Рис. 16.4. Зависимость U_{\max}/U_1 от мощности компенсирующего устройства при установке реактора в начале (4), конце (1) и середине (2) и батареи конденсаторов в середине (3) одно-сторонне включенной линии 500 кВ, $l=900$ км.

му снижению перенапряжений. Наиболее эффективная компенсация получается при равномерном распределении большого числа реакторов вдоль линии. Для полной компенсации необходимо, чтобы $\sum q_p = \beta l$ или $\sum \frac{1}{\omega L_p} = \omega C_0 l$, т. е. суммарная проводимость всех реакторов равнялась емкостной проводимости линии. Однако установка большого числа реакторов с суммарной мощностью, равной βl , экономически не всегда оправдана и практически не всегда осуществима. Промышленностью страны выпускаются реакторы с $Q_p = 165 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ($\beta l_p \approx 10^\circ$) на напряжение 500 кВ и с $Q_p = 300 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ($\beta l_p = 7,5^\circ$) на напряжение 750 кВ. Например, для линий 500 кВ обычно устанавливаются две группы реакторов общей мощностью $\frac{3}{4} \beta l$. При этом около $\frac{2}{3}$ мощности сосредоточено в пределах половины линии (в середине) и $\frac{1}{3}$ — на ее конце. Такое размещение реакторов обеспечивает снижение напряжения до допустимых величин в режиме минимальных нагрузок ($1,05 U_\phi$) и перенапряжений х.х. в условиях синхронизации ($1,15 U_\phi$). Для линий других классов напряжений оптимальные размещения и мощность установленных реакторов будут другие.

Аварийное отключение линии и последующий режим х.х. могут быть связаны с неблагоприятными предшествующими обстоятельствами (не все реакторы выключены, повышенные напряжения в системе). В этом случае для ограничения перенапряжений до допустимых величин ($1,8 U_\phi$ для установок 500 кВ) может потребоваться форсированное подключение дополнительных реакторов. Для этой цели используются реакторы, которые в нормальном режиме отключены, но безынерционно включаются через искровой промежуток при повышении напряжения в послеаварийном режи-

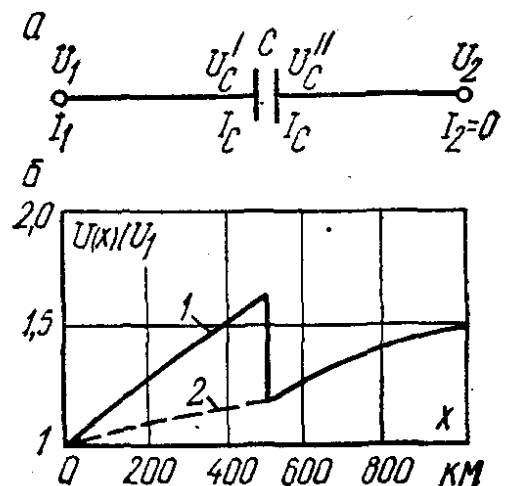
ме. Заметное ограничение перенапряжений емкостного эффекта может быть также обусловлено насыщением стали магнитопроводов силовых трансформаторов, при котором индуктивные токи намагничивания сильно возрастают. Подробнее это явление будет рассмотрено ниже, в § 17.3.

16.4.2. Влияние устройств продольной емкостной компенсации

Устройства продольной емкостной компенсации (УПК) устанавливаются чаще всего в середине линии для повышения пропускной способности и динамической устойчивости электропередачи. При этом обычно степень компенсации $k_c = q_c / \beta l = 0,5$.

Включение сосредоточенной емкости последовательно с продольными распределенными параметрами линии приводит к изменению распределения напряжения вдоль линии и в нормальном режиме, и в режимах одностороннего питания или к. з. Если не учитывать влияния шунтирующих реакторов, которые обычно включаются до и после батареи конденсаторов продольной компенсации (см. рис. 15.2), то на ней наблюдается падение напряжения, обусловленное протеканием тока через $x_c = 1/\omega C$. Скачок напряжения ΔU_c на батарее нежелателен, поэтому УПК устанавливаются в местах потокоразделов реактивных мощностей и в сочетании с шунтирующими реакторами, которые компенсируют генерируемую УПК мощность.

Рис. 16.5. Схема односторонне включенной линии с продольной компенсацией (а) и распределение напряжения вдоль такой линии (б): 1 — линия с батареей q_c в середине; 2 — линия с реактором в середине при $q_p = q_c$.



Рассмотрим влияние УПК на величину и распределение напряжений для линии без потерь в режиме одностороннего питания. Если реакторы не подключены и УПК (C) установлено в середине линии (рис. 16.5, а), то, используя уравнение (16.4), получим:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_c'' &= \dot{U}_2 \cos \frac{\beta l}{2}; \quad \dot{I}_c = j \frac{\dot{U}_2 \sin \frac{\beta l}{2}}{z}; \\ \dot{U}_c' &= \dot{U}_2 \left(\cos \frac{\beta l}{2} + q_c \sin \frac{\beta l}{2} \right); \\ \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \left(\cos \beta l + \frac{1}{2} q_c \sin \beta l \right) = \dot{U}_2 (\cos \beta l + \operatorname{tg} \varphi \sin \beta l); \\ \dot{I}_1 &= \frac{j \dot{U}_2}{z} \left(\sin \beta l + q_c \sin^2 \frac{\beta l}{2} \right), \end{aligned} \right\} (16.9)$$

где

$$q_c = \frac{1}{\omega C_z}; \quad \varphi = \arctg \frac{1}{2\omega C_z}.$$

С учетом уравнений (16.9) коэффициент передачи

$$K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\cos \varphi}{\cos (\beta l + \varphi)}; \quad (16.10)$$

входное сопротивление линии

$$Z_{вх} = -jz \operatorname{ctg} \beta l \frac{1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \frac{\beta l}{2}}{1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \frac{\beta l}{2}}. \quad (16.11)$$

Сравнивая соотношения (16.5) и (16.10), (16.11), можно заметить, что продольная компенсация уменьшает коэффициент передачи в дорезонансной области; длина линии, при которой наступает резонанс $l_{рез}$, сокращается, а входное сопротивление линии незначительно возрастает. Поэтому установленное в середине линии УПК практически не оказывает влияния на напряжение в начале линии, напряжение в конце линии уменьшается (кривая 3 на рис. 16.4), а на батарее конденсаторов наблюдается скачок напряжения:

$$\Delta \dot{U}_c = \dot{U}_1 \frac{\cos \varphi \sin \frac{\beta l}{2} q_c}{\cos (\beta l + \varphi)} = \frac{2 \dot{U}_1 \sin \frac{\beta l}{2} \sin \varphi}{\cos (\beta l + \varphi)}.$$

Напряжение на УПК при этом может оказаться значительно выше, чем напряжение в конце линии (кривая 1 на рис. 16.5, б).

Подключение реакторов компенсирует действие УПК, и при полной компенсации УПК не оказывает влияния на распределение напряжения вдоль линии. УПК, установленное в конце линии, также не оказывает влияния на распределение напряжения в режиме х.х.

При к.з. за УПК может в несколько раз возрасти ΔU_c вследствие протекания через x_c тока к.з. при переходном процессе. Так как номинальное напряжение батареи $U_{с.н} = (0,3-0,4) U_\phi$ выбирается по номинальному току передачи, то перенапряжения при к.з. могут быть опасны для изоляции конденсаторов. Поэтому батареи шунтируются специальными разрядниками с уставкой в пределах $(2,5-4) U_{с.н}$. Такие большие уставки определяются тем, что пробой разрядника в переходном режиме нежелателен, например при качании роторов генераторов после к.з., когда УПК особенно необходимо для поддержания динамической устойчивости системы.

При разрывах электропередачи с УПК и шунтирующими реакторами могут возникнуть резонансные явления в контурах, включающих x_c и x_p на очень низкой частоте $\omega/3$. Возбуждение субгармоник может приводить к перенапряжениям на батарее конденса-

торов и протеканию недопустимо больших токов через реактор. Для их устранения применяются выключатели или разрядники, кратковременно шунтирующие УПК.

16.5. ОСОБЕННОСТИ ЕМКОСТНОГО ЭФФЕКТА В ЛИНИИ С ДВУСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ. ПОЛУВОЛНОВОЙ РЕЗОНАНС

При двустороннем питании распределение напряжения вдоль линии без потерь в установившемся режиме

$$\dot{U}(x) = \dot{U}_1 \frac{\sin \beta(l-x)}{\sin \beta l} + \dot{U}_2 \frac{\sin \beta x}{\sin \beta l}.$$

Если напряжения по концам одинаковы, а угол δ сдвига между \dot{U}_1 и \dot{U}_2 равен βl , то линия работает в режиме передачи натуральной мощности и напряжение вдоль линии остается постоянным: $U(x) = U_1 = U_2$. При $\beta l = \pi$ ($l = 3000$ км), т. е. для полуволновой длины линии, появляется возможность полуволнового резонанса в условиях малых нагрузок ($\delta < \beta l$). При этом напряжение в середине линии может превысить допустимые величины. Возникающие по той же причине повышения напряжения емкостного эффекта возможны при к. з. в конце длинных ($l > 1500$ км) линий сверхвысокого напряжения, так как входное сопротивление короткозамкнутой линии при $\beta l > \frac{\pi}{2}$ носит емкостный характер.

При выборе мощности и места установки реакторов в данном случае, как и во всех предыдущих рассмотренных, учитывают условия: $U_p \approx U_1 \approx U_2 \approx U$; $U_{\max}(x) \leq U_{\text{доп}}$.

16.6. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ДЛИННЫХ ЛИНИЯХ ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ ПИТАНИИ И НЕСИММЕТРИЧНЫХ К. З.

При отключении несимметричных коротких замыканий на линиях СВН из-за неодновременного срабатывания выключателей по концам линии возможны кратковременные режимы одностороннего питания, при которых, например, одна фаза замкнута на землю, а две другие разомкнуты или одна фаза разомкнута, а две другие замкнуты на землю. При таких режимах происходит наложение повышения напряжения, вызванного несимметрией системы, на повышение напряжения, обусловленное емкостным эффектом.

При однофазном коротком замыкании перенапряжения на здоровых фазах определяются соотношением (15.1) и кривыми, показанными на рис. 15.5. Входные сопротивления относительно точки к. з. в конце разомкнутой линии без учета потерь могут быть определены по формулам:

$$Z_1 = jz \operatorname{tg} \beta l; \quad Z_0 = jz \operatorname{tg} \beta_0 l; \quad \frac{Z_0}{Z_1} = \frac{x_0}{x_1} = \frac{z_0}{z} \frac{\operatorname{tg} \beta_0 l}{\operatorname{tg} \beta l}.$$

Так как в соответствии с табл. 15.2 $z_0 = (2-2,5)z$, $\beta_0 = (1,5-1,7)\beta$, то при изменении длины линии отношение x_0/x_1 может меняться от

$-\infty$ до $+\infty$. При $x_0/x_1 = -2$ ($l \approx 1200$ км при параметрах линии, приведенных в табл. 15.3) возникает резонанс за счет несимметрии.

На рис. 16.6 представлены зависимости $U_2/U_1 = f(l)$ для неповрежденных фаз В и С при замыкании фазы А на землю. Кроме обычного максимума при $l = 1500$ км, обусловленного емкостным эффектом (см. также рис. 16.2), явно выражены максимумы при $l \approx 1200$ км, вызванные несимметрией. Реальные перенапряжения ограничиваются потерями в активных сопротивлениях и на корону.

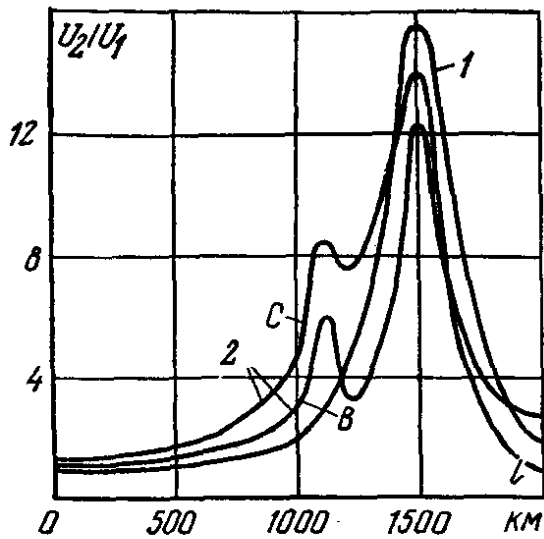


Рис. 16.6. Резонансные кривые для длинной односторонне включенной линии:

1 — симметричный режим; 2 — для неповрежденных фаз В и С при замыкании фазы А на землю.

Шунтирующие реакторы, установленные в середине и в особенности в конце линии, снижают перенапряжения несимметричного режима. Поэтому при выборе их количества и мощности учитывается также необходимость ограничения перенапряжений при одностороннем отключении несимметричных к. з.

17. ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

17.1. РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЦЕПЯХ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ИНДУКТИВНОСТЯМИ

В электрических установках имеются элементы, обладающие нелинейными характеристиками: цепи намагничивания силовых трансформаторов, шунтирующие и заземляющие реакторы и т. п. Динамическая индуктивность этих элементов $L_\mu = d\psi/di$ может изменяться в течение каждого периода промышленной частоты в широких пределах, а форма тока сильно искажается. При этом возрастает удельный вес высших гармоник и появляется возможность возникновения резонансных перенапряжений на основной, высших и низших гармониках.

Феррорезонансные перенапряжения на основной гармонике возникают, например, при неполнофазных режимах в сетях с изолированной и заземленной нейтралью. В этих условиях образуются контуры, включающие последовательно соединенные емкости и нелинейные индуктивности.

В первом приближении при изучении феррорезонансных явлений на основной гармонике можно допустить, что напряжения и токи в цепях с нелинейными индуктивностями выражаются гармоническими функциями, но вольт-амперная характеристика элемента нелинейна и задана графически (рис. 17.1). В этом случае

схема с нелинейной индуктивностью может быть приведена к простой цепочке, включающей эквивалентное сопротивление z_3 , источник напряжения E и нелинейный элемент x_μ . Если z_3 носит активно-емкостный характер, то образуется колебательный контур.

Рассмотрим процесс в таком контуре (рис. 17.2, а) при синусоидальном E . Графоаналитическое решение с использованием графической зависимости $U_\mu = f(I)$ приведено на рис. 17.2, б.

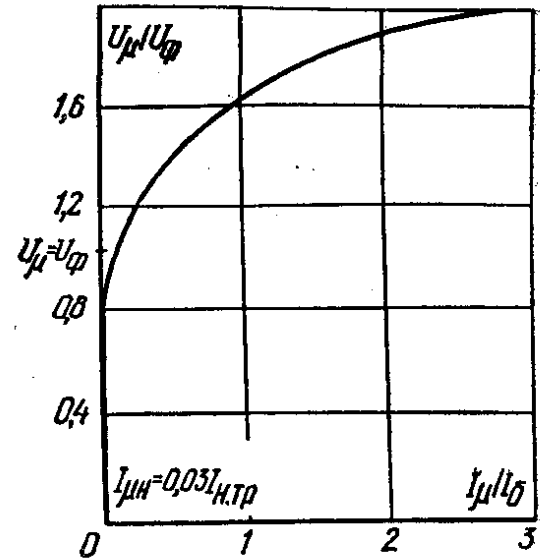


Рис. 17.1. Вольт-амперная характеристика намагничивания для трансформатора $I_\phi = \frac{U_\phi}{z}$:

$I_{н.тр}$ — номинальный ток трансформатора.

Исходное расчетное уравнение

$$E = Ir + j(U_\mu - Ix_c)$$

приводит к выражению для U_μ :

$$U_\mu = Ix_c \pm \sqrt{E^2 - (Ir)^2}. \quad (17.1)$$

Точки пересечения a', b', c' кривой 1, построенной по уравнению (17.1), и вольт-амперной характеристики 2 ($U_\mu = f(I)$) определяют возможные состояния равновесия схемы. При малых x_c или очень больших x_c (или больших r) пересечение возможно только в одной устойчивой точке и резонансных явлений не наблюдается. При $r=0$ кривая 1 вырождается в две параллельные прямые 3 с орди-

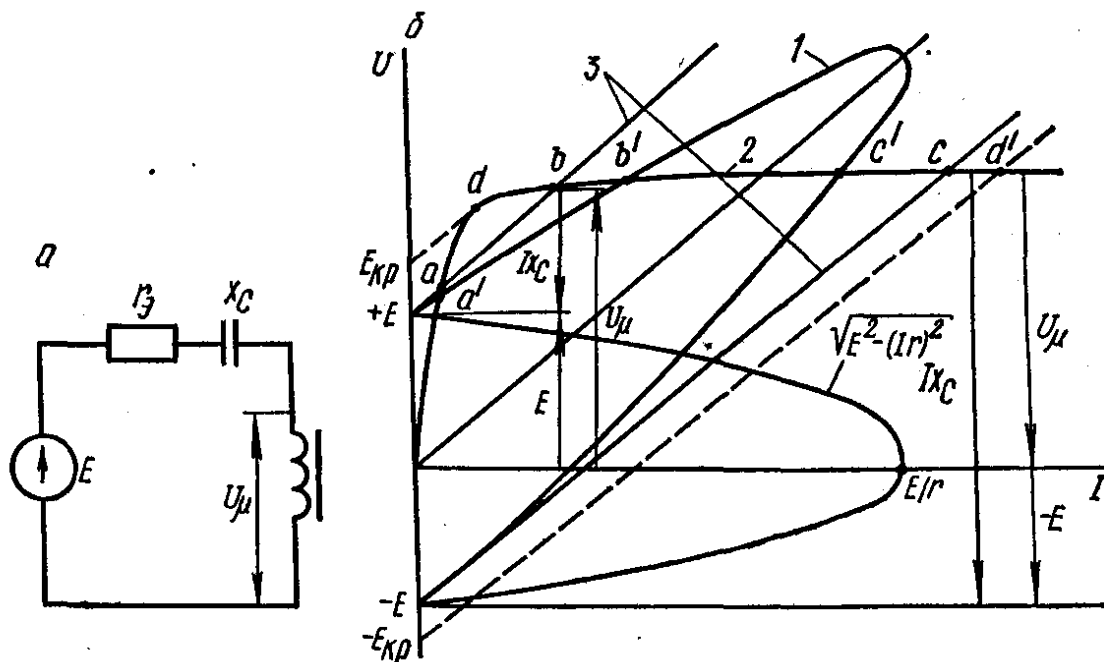


Рис. 17.2. Колебательный контур с нелинейной индуктивностью (а) и графическое решение (б) для U_μ и $U_c = Ix_c$ при заданных r , x_c и E .

натами $\pm E + Ix_c$ и в цепи возможно существование всех трех режимов (точки a , b и c). При этом режимы в точках a и c являются устойчивыми, режим в точке b — неустойчивым. Действительно, в точках a и c для увеличения тока требуется напряжение $|Ix_c - U_\mu| > E$, и при заданном E режим вернется в исходные точки. При работе в точке b небольшое увеличение тока приведет к небалансу $|Ix_c - U_\mu| < E$, и режим будет неуклонно скачком стремиться в устойчивую точку c . Изменение x_c приводит к

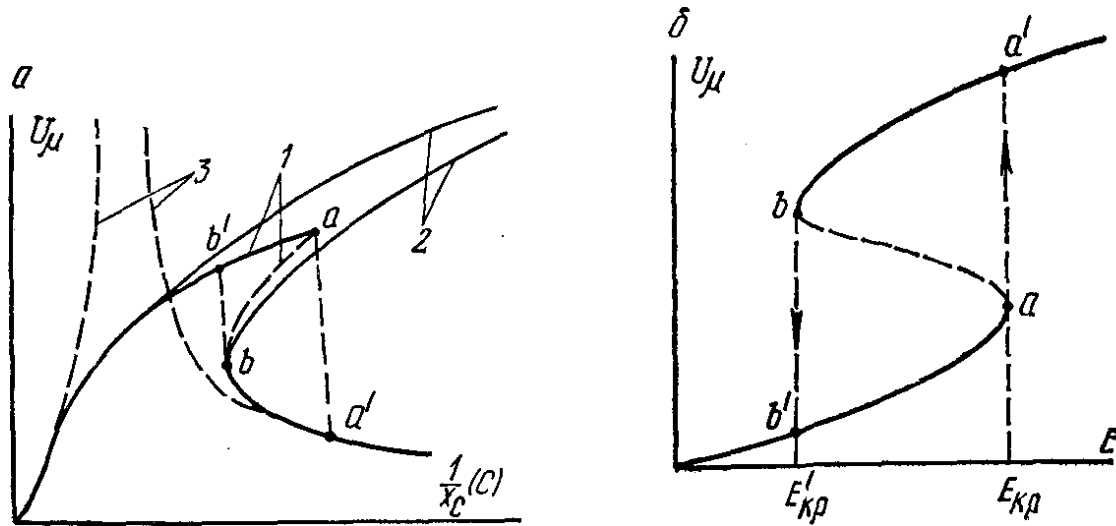


Рис. 17.3. Зависимость U_μ от емкостной проводимости (емкости) контура (см. рис. 17.2, а) (а) и от приложенного к контуру напряжения (б):

1 — при $r \neq 0$; 2 — при $r = 0$; 3 — резонансная кривая для контура с линейными элементами.

изменению наклона прямых 3, а изменение напряжения E меняет их начальные ординаты. И то, и другое изменяет режимы в схеме и условия устойчивых состояний. Скачкообразный переход из одного устойчивого состояния в другое происходит с опрокидыванием, т. е. изменением на 180° фазы напряжения U_μ . На рис. 17.3, а приведена резонансная кривая $U_\mu = f\left(\frac{1}{x_c}\right)$, а на рис. 17.3, б — зависимость

$U_\mu = f(E)$ при заданных остальных параметрах схемы (см. рис. 17.2, а). Как видно из рис. 17.3, а, при изменении x_c в точках a и b происходят феррорезонансные скачки напряжения. При этом с ростом r возможные перенапряжения ограничиваются по величине. Завал в резонансной кривой (при $r = 0$) объясняется изменением x_μ при росте тока, что сопровождается расстройством контура и также ограничивает возможное нарастание напряжений. Увеличение E до величины, большей, чем $E_{кр}$, приводит к феррорезонансному скачку (из точки a в точку a' на рис. 17.3, б и соответственно из точки d в d' на рис. 17.2, б). При уменьшении E обратный переход от емкостного режима к индуктивному наступает при напряжении $E'_{кр} < E_{кр}$.

Таким образом, резонансные явления в цепях с нелинейными индуктивностями осложняются еще феррорезонансными скачками, т. е. переходными процессами, которые могут привести к увеличе-

нию амплитуд перенапряжений. Разного рода коммутации способствуют в таких цепях возникновению феррорезонансных перенапряжений.

17.2. ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВНОЙ ГАРМОНИКЕ ПРИ ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛИ ПРИЕМНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Неполнофазные режимы в сети с изолированной нейтралью могут сопровождаться возникновением опасных феррорезонансных перенапряжений и эффектом опрокидывания фаз. Трехфазную схему сети (рис.17.4, а) при такого рода режимах можно привести к однофазной эквивалентной схеме замещения (рис. 17.4, б), пара-

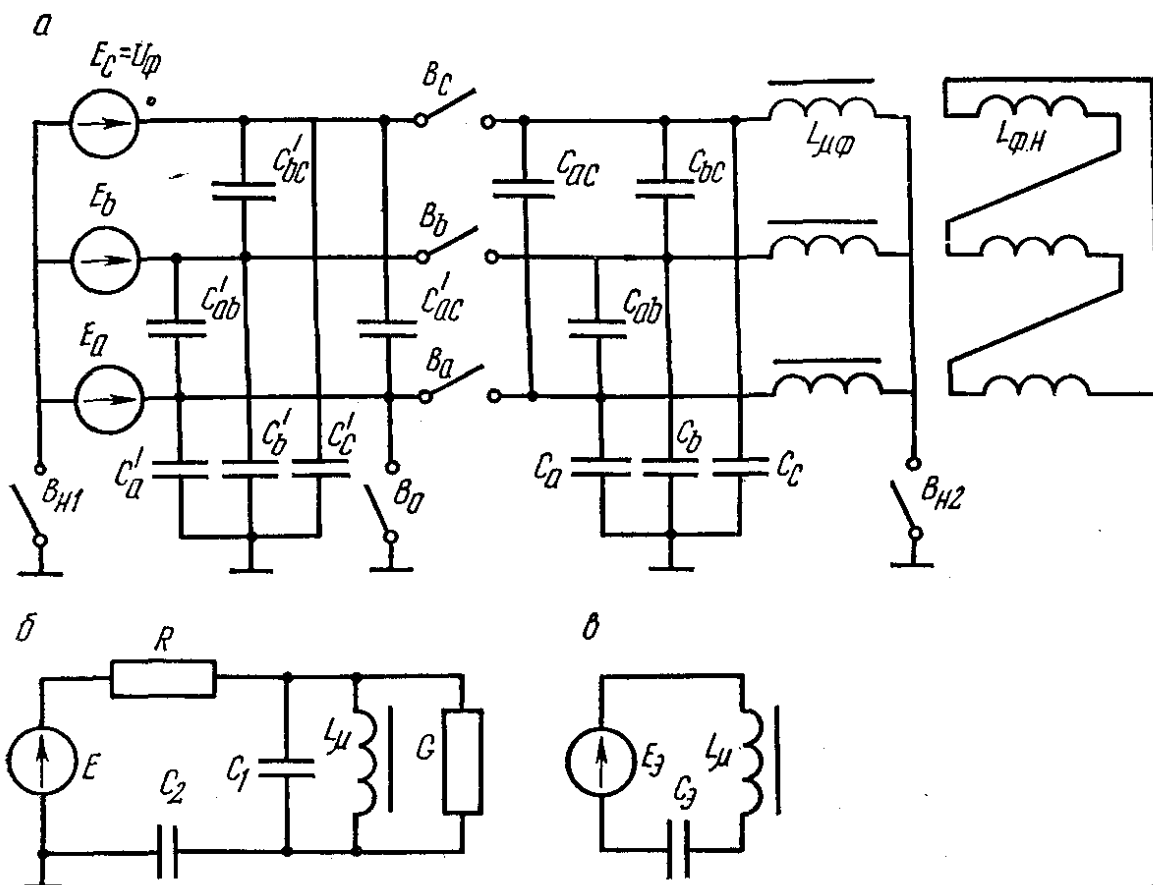


Рис. 17.4. Упрощенная схема системы для изучения перенапряжений при неполнофазном и несимметричном режимах (а) и ее расчетная (б) и эквивалентная (в) схемы замещения:

$$E_a = E_b = E_c = U_\phi; \quad C_{ac} = C_{ab} = C_{bc} = C_{м.ф}; \quad C_a = C_b = C_c = C_3; \\ C'_a = C'_b = C'_c = C_3; \quad C_3 \gg C_3.$$

метры которой E, C_2, C_1, L_μ, R и G будут иметь различные величины в зависимости от характера несимметрии. В табл. 17.1 приведены параметры эквивалентной схемы для некоторых характерных случаев несимметрии. В первом приближении будем считать, что потери в проводах и обмотках трансформаторов не влияют на характер протекания процесса, а нагрузка на вторичной стороне трансформатора отсутствует. Тогда $R=0$ и $G=0$, и схема, представлен-

Табл. 17.1. Параметры схем замещения

Режим	Включены выключатели (рис. 17.4, а)	E	L_{μ}	C_1
Обрыв и заземление фазы	B_c, B_b, B_0	$1,5U_{\phi}$	$1,5L_{\mu\phi}$	$C_{ab} + C_{ac} \approx 2C_{м.ф}$
Однофазное включение (фаза а)	B_a	U_{ϕ}	$1,5L_{\mu\phi}$	$2C_{м.ф}$
Двухфазное включение (фазы b и c)	B_b, B_c	$0,5U_{\phi}$	$1,5L_{\mu\phi}$	$2C_{м.ф}$

ная на рис. 17.4, б, методом эквивалентного генератора приводится к простой эквивалентной схеме, показанной на рис. 17.4, в (параметры этой схемы также приведены в табл. 17.1), которая является нелинейным колебательным контуром.

Таким образом, для всех рассматриваемых случаев справедливы резонансные явления, рассмотренные в § 17.1, включая скачкообразные переходы с одного устойчивого режима в другой с опрокидыванием фазы. Оценим максимально возможные перенапряжения U_{\max} на эквивалентной емкости C_{ϕ} , т. е. на изоляции линии. Если не учитывать влияние $C_{м.ф}$, то $E_{\phi} = E$ и $U_{с\max} = U_{\mu} + E$. Принимая, что напряжение на индуктивности U_{μ} ограничено насыщением стали магнитопровода трансформатора (см. рис. 17.1) и не превышает $1,5 E$, получим в наиболее неблагоприятном случае однофазного включения (см. табл. 17.1) $U_{с\max} = 1,5 E + E = 3,75U_{\phi м}$. Это перенапряжение при $U_{н} \geq 35$ кВ превышает уровень изоляции.

В случае, когда нейтраль питающего трансформатора заземлена (включен $B_{н1}$), расчеты выполняются так же. Перенапряжения получаются несколько меньше, так как при этом уменьшается E_{ϕ} .

Подключение активной нагрузки ($G \neq 0$) затрудняет возникновение емкостного режима и заметно ограничивает перенапряжения.

Опрокидывание фазы тока при феррорезонансном скачке может привести к резкой асимметрии векторов напряжения с преобладанием составляющих обратной последовательности, что часто вызывает аварийный останов или даже обратное вращение двигателей.

Для предотвращения возникновения резонанса на основной гармонике следует избегать работы или коммутации ненагруженных трансформаторов с изолированной нейтралью, а также снижать вероятность возникновения неполнофазных режимов, отказываясь от применения плавких предохранителей и тщательно регулируя одновременность включения и отключения фаз выключателей.

(см. рис. 17.4, б и в)

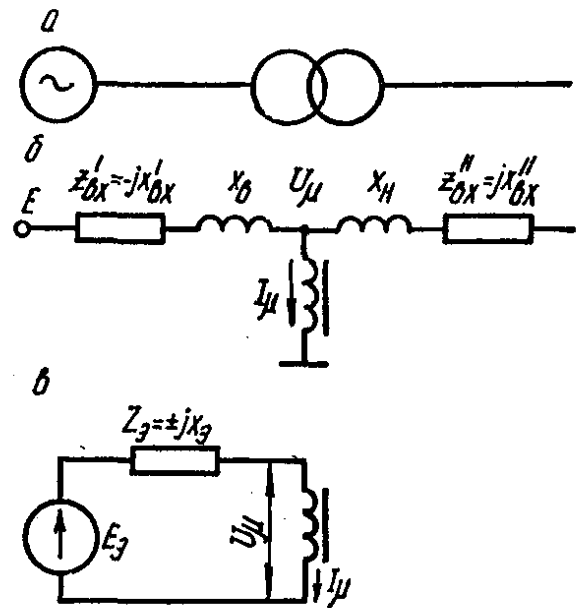
C_2	E_3	C_3	U_{\max}
$C_a \approx C_3$	$E \frac{C_3}{C_3 + 2C_{\text{м.ф}}}$	$C_3 + 2C_{\text{м.ф}}$	$3,75U_{\text{фт}}$
$C_b + C_c \approx 2C_3$	$E \frac{C_3}{C_3 + C_{\text{м.ф}}}$	$2(C_3 + C_{\text{м.ф}})$	$2,5U_{\text{фт}}$
$C_a \approx C_3$	$E \frac{C_3}{C_3 + 2C_{\text{м.ф}}}$	$C_3 + 2C_{\text{м.ф}}$	$1,25U_{\text{фт}}$

17.3. ВЛИЯНИЕ НАСЫЩЕНИЯ СТАЛИ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В УСТАНОВИВШЕМСЯ СИММЕТРИЧНОМ РЕЖИМЕ СИСТЕМЫ С ЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Для учета влияния магнитного шунта трансформатора на перенапряжения в симметричном режиме представим схему линии (рис. 17.5, а, б) с трансформатором в конце в виде эквивалентной

Рис. 17.5. Линия с трансформатором (а) и ее расчетная (б) и эквивалентная (в) схемы замещения:

$Z'_{\text{ВХ}} = -jx'_{\text{ВХ}}$ — входное сопротивление со стороны источника (с учетом компенсирующих устройств на линии носит емкостный характер); $Z_{\text{ВХ}} = jx_{\text{ВХ}}$ — входное сопротивление со стороны нагрузки; $x_{\text{В}}, x_{\text{Н}}$ — индуктивные сопротивления рассеяния обмоток трансформатора.



схемы замещения (рис. 17.5, в). В этой схеме на основании теоремы об эквивалентном генераторе

$$Z_3 = -j(x'_{\text{ВХ}} - x_{\text{В}}) \parallel j(x''_{\text{ВХ}} + x_{\text{Н}}) = \pm jx_3 \quad (17.2)$$

есть эквивалентное входное сопротивление схемы относительно точки подключения магнитного шунта при ЭДС источника, равной нулю;

$$E_3 = \frac{E(x''_{\text{ВХ}} + x_{\text{Н}})}{(x''_{\text{ВХ}} + x_{\text{Н}}) - (x'_{\text{ВХ}} - x_{\text{В}})}$$

представляет эквивалентное напряжение в точке подключения магнитного шунта при $I_\mu = 0$. Допустим, что зависимость $U_\mu = f(I_\mu)$ задана графически для первой гармоники, например в виде, представленном на рис. 17.1.

Связь между напряжениями и током для схемы рис. 17.5, в определяется простым уравнением

$$E_\partial = U_\mu \pm x_\partial I_\mu,$$

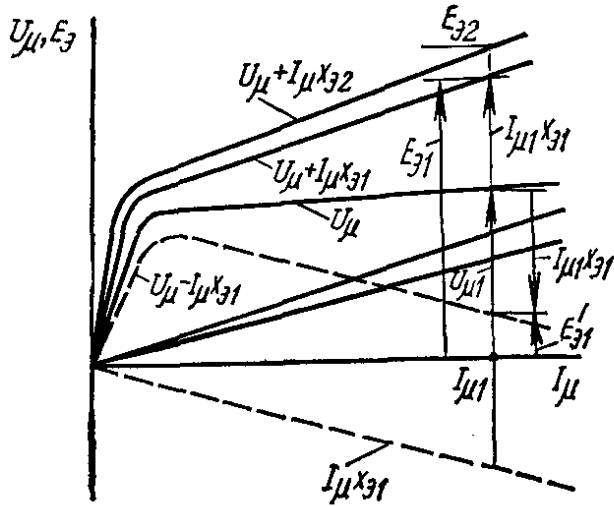


Рис. 17.6. Графическое решение для эквивалентной схемы рис. 17.5, в при разных значениях E_∂ и x_∂ .

графическое решение которого для различных значений E_∂ и x_∂ показано на рис. 17.6.

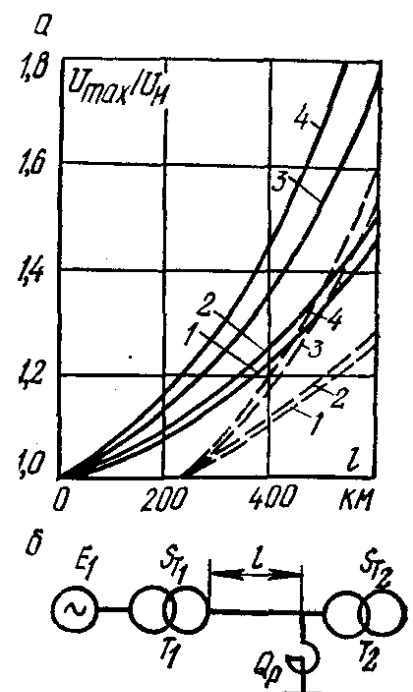
В реальных схемах электропередач с подключенными шунтирующими реакторами сопротивление x_∂ носит индуктивный характер, и магнитный шунт ограничивает перенапряжения ($U_\mu < E_\partial$). Ограничивающее действие магнитного шунта тем больше, чем больше E_∂ и x_∂ , т. е. чем ближе система к резонансу. Поэтому трансформаторы, установленные в конце или середине линии, где повышение напряже-

ния емкостного эффекта выше, чем в начале линии, и x_∂ больше, сильнее снижают перенапряжения, чем трансформаторы, установленные в начале линии. На рис. 17.7 показаны зависимости $U_{\max} = f(l)$ для линий с учетом действия магнитных шунтов повышающего и понижающего трансформаторов и шунтирующего реактора.

При емкостном характере x_∂ напряжение U_μ повышено по отношению к E_∂ ($U_{\mu 1} > E'_{\partial 1}$, см. рис. 17.6), так как в данном случае реализуется режим резонансного контура с нелинейной индуктивностью (см. § 17.1). Однако подобный послерезонансный режим в реальных системах практически не наблюдается.

Рис. 17.7. Перенапряжения емкостного эффекта на линии 500 кВ в зависимости от длины линии l (а) для схемы (б) с параметрами:

$E_1 = U_H$; $x_1 = 0,57z$; $S_{T_1} = S_{T_2} = 0,65P_{\text{нат}}$; $I_{\mu H} = I_{x, x} = 0,03I_H$; $Q_p = 0,16P_{\text{нат}}$ с учетом насыщения T_2 и T_1 (1), T_2 (2), T_1 (3) и без учета насыщения (4). Пунктиром показаны соответствующие зависимости при включенном реакторе.



17.4. ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВНОЙ ГАРМОНИКЕ ПРИ НЕПОЛНОФАЗНЫХ РЕЖИМАХ В СИСТЕМАХ С ЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

При неполнофазных режимах в системах с заземленной нейтралью, например в блочных системах линия — трансформатор, возможно появление опасных феррорезонансных перенапряжений. Для упрощенного их анализа воспользуемся схемой, приведенной на рис. 17.4, а. Допустим, в рассматриваемом случае имеет место

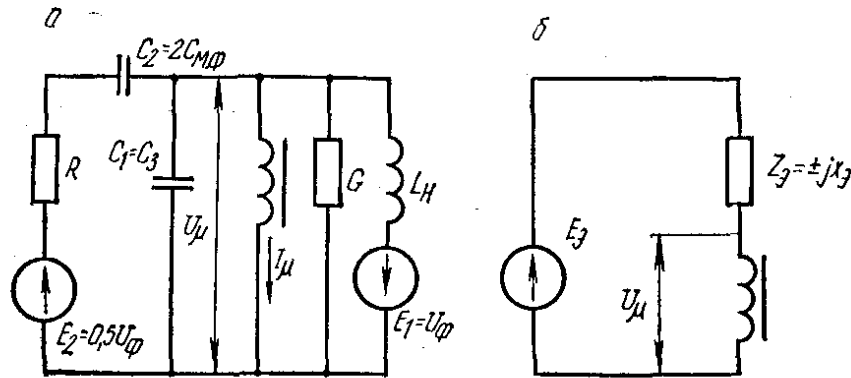


Рис. 17.8. Расчетная (а) и эквивалентная (б) схемы замещения для трехфазной схемы, представленной на рис. 17.4, а.

режим с разрывом в фазе *a*, т. е. в схеме включены выключатели B_b , B_c , $B_{н1}$ и $B_{н2}$. Вторичная обмотка приемного трансформатора, соединенная в треугольник, в данном случае должна быть учтена в расчете, так как она представляет короткозамкнутую цепь для токов нулевой последовательности и в эквивалентной схеме замещения включается параллельно магнитному шунту трансформатора. Поэтому в схеме (рис. 17.8) наряду с элементами, учитывающими активно-емкостные связи и магнитный шунт (см. рис. 17.4, б), появляется дополнительная цепь с $E_1 = U_\phi$ и $L_n = 3L_{\phi.n}$. Это объясняется тем, что суммарная ЭДС фаз *b* и *c* в замкнутой цепи обмотки низкого напряжения, имеющей внутреннее сопротивление $3\omega L_{\phi.n}$, благодаря обратной трансформации создает в фазе *a* дополнительное напряжение $E_1 = U_\phi$.

Учитывая только реактивные элементы ($R=0$, $G=0$), преобразуем схему рис. 17.8, а к расчетной эквивалентной схеме, удобной для анализа (рис. 17.8, б). Для этого, как и в § 17.3, используем теорему об эквивалентном генераторе (активном двухполюснике) и метод наложения. Учитывая, что $C_1 = C_3$, $C_2 = 2C_{m.\phi}$, $E_2 = 0,5U_\phi$ и $E_1 = U_\phi$, получим:

$$Z_3 = \pm jx_3 = \frac{\omega L_n}{1 - \omega^2 L_n (C_1 + C_2)} = \frac{3\omega L_{\phi.n}}{1 - 3\omega^2 L_{\phi.n} (C_3 + 2C_{m.\phi})};$$

$$E_3 = U_\phi \frac{\omega^2 L_n \frac{C_2}{2} + 1}{1 - \omega^2 L_n (C_1 + C_2)} = U_\phi \frac{1 + 3\omega^2 L_{\phi.n} C_{m.\phi}}{1 - 3\omega^2 L_{\phi.n} (C_3 + 2C_{m.\phi})}.$$

В реальных схемах линий значения C_3 и $C_{м.ф}$ меняются в зависимости от длины линии, и при $l \approx 250—300$ км выполняются условия резонанса для линейной части схемы (без учета магнитного шунта):

$$3\omega L_{ф.н} = \frac{1}{\omega(C_3 + 2C_{м.ф})}$$

При этом E_3 и x_3 резко возрастают, стремясь к бесконечности. Резонансные условия в линейной части схемы, возникающие именно при несимметричных режимах, приводят к возникновению значительных феррорезонансных перенапряжений. Расчет их по схеме рис. 17.8, б ведется так же, как и в ранее рассмотренных случаях для нелинейного контура с $E_3, \pm jx_3$ и $U_\mu = f(I_\mu)$.

Возрастающие токи намагничивания и возможные R и G (появление короны, потери в проводах и в стали трансформатора и т. д.) ограничивают феррорезонансные перенапряжения в области резонанса линейной части схемы, однако величина их может достигнуть при этом $2U_\phi$, т. е. недопустимо больших значений, принимая во внимание длительное их действие. Опасность возникновения подобных перенапряжений затрудняет применение блочных и полублочных схем.

Резонансные перенапряжения на основной гармонике могут возникнуть также при неполнофазных режимах линии с шунтирующими реакторами. Перенапряжения в этом случае сильно ограничиваются короной и, как правило, не достигают опасных значений.

17.5. РЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ НА ВЫСШИХ И НИЗШИХ ГАРМОНИКАХ. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС

При нормальных режимах работы амплитуды высших гармоник обычно не превышают 1—2 % амплитуды основной гармоники, поэтому даже при условиях, близких к резонансным, повышения амплитуд гармоник, ограниченные процессами демпфирования, не приводят к значительным перенапряжениям. В аварийных режимах работы амплитуды высших сопутствующих (3, 5, 7-й) гармоник могут стать соизмеримыми с амплитудой рабочего напряжения и в условиях резонанса вызвать опасные для изоляции перенапряжения.

Четные гармоники (2-я, 4-я) в нерезонансных условиях отсутствуют, но могут появиться при резонансе. Кривая напряжения при этом искажается и становится несимметричной относительно нулевой оси, что соответствует появлению постоянного потока в магнитопроводах и смещает рабочую точку на кривой намагничивания, поддерживая (самовозбуждая) четные гармоники.

Перенапряжения на высших гармониках наблюдаются, например, в ненагруженных линиях, когда их длина приближается к условиям четверть- или полуволнового режима, при неполнофазных режимах. В этих условиях на моделях получены перенапряжения порядка $(4—5)U_\phi$. Однако потери на корону, а также активные потери в генераторах и сети ограничивают величины таких перенапряжений до $(2—2,5)U_\phi$.

Феррорезонансные перенапряжения на высших гармониках могут наблюдаться в ненагруженных передачах с присоединенными трансформаторами, когда вследствие емкостного эффекта напряжение на трансформаторах повышается, вызывая насыщение магнитопровода трансформатора. В неблагоприятных условиях в этом случае возможно увеличение амплитуды 2-й гармоники до величины $U_{2m} = U_{\phi m}$, которая накладывается на основную частоту.

О возможности субгармонического резонанса при частоте $\omega/3$ в электропередачах с продольной компенсацией указывалось в § 16.4.

Перенапряжения при параметрическом резонансе связаны с изменением за счет внешних сил одного из параметров колебательного контура — индуктивности или емкости. В электрических системах параметрический резонанс может иметь место в результате изменения индуктивности вращающейся, например явнополюсной, машины в условиях емкостной нагрузки. Энергия для возбуждения колебательного процесса получается за счет работы первичного двигателя, а начальной причиной возбуждения резонанса может явиться остаточное намагничивание машины. При параметрическом резонансе наибольшие напряжения возникают при симметричных режимах работы. Как показывают оценочные расчеты и исследования на моделях, перенапряжения параметрического резонанса ограничиваются насыщением магнитопроводов машин и трансформаторов и не превышают $(1,7—1,9)U_{\phi}$.

Основными мерами борьбы с перенапряжениями на высших гармониках, так же как и на основной гармонике, являются мероприятия схемного характера, исключающие работу в резонансных условиях, например следует избегать холостых и неполнофазных режимов. Использование разрядников для ограничения сравнительно длительно действующих перенапряжений резонансного и феррорезонансного типов практически невозможно. Наоборот, перенапряжения резонансного типа опасны для разрядников, предназначенных для ограничения коммутационных перенапряжений, так как последние могут не погасить дугу при перенапряжении квазистационарного режима ($U_{уст} > U_{гаш}$) и разрушиться.

Для линий электропередачи 500—1150 кВ наряду с усовершенствованием принятой схемы защиты от перенапряжений разрабатываются и другие мероприятия, направленные, например, на уменьшение разброса моментов отключения выключателей по концам линии, улучшение характеристик устройств и аппаратов синхронного включения и др.

18. КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ВКЛЮЧЕНИЯХ

18.1. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА

Коммутационные перенапряжения развиваются в схемах, которые обычно удается привести к простому (одночастотному) колебательному контуру. Рассмотрим переходный процесс в таком контуре (рис. 18.1), возникающий при включении его к источнику синусоидального напряжения $u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$. В рассматриваемом контуре r представляет активное сопротивление катушки индуктивности L и соединительных проводов.

Интересующее нас напряжение на емкости u_c складывается из составляющей установившегося режима $u_{уст}$, частота которой равна частоте источника питания ω , и составляющей переходного режима (свободной составляющей) $u_{пер}$. Частота колебаний $u_{пер}$ определяется собственной частотой контура ω_0 , в частности при

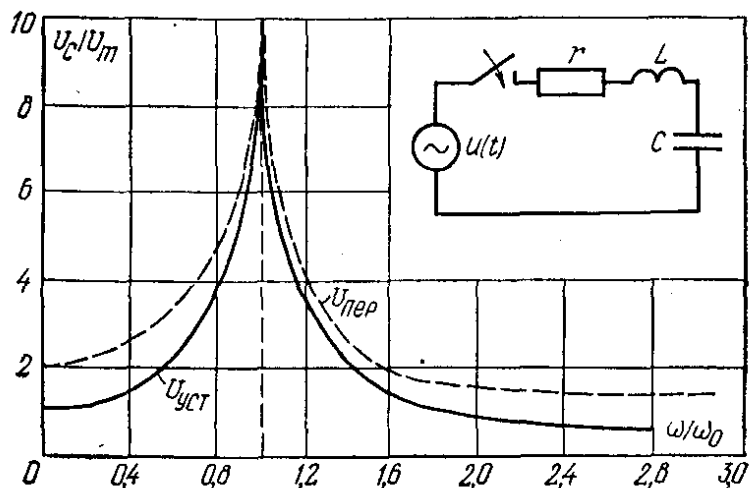


Рис. 18.1. Зависимость напряжения u_c от отношения частот ω/ω_0 .

сопротивлении r , значительно меньшем характеристического сопротивления ($r \ll \sqrt{L/C}$), получим $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$.

В этом случае напряжение

$$u_C = -U_{уст} \left[\cos(\omega t + \varphi_i) - \sqrt{\frac{\omega^2}{\omega_0^2} \sin^2 \varphi_i + \cos^2 \varphi_i} \times \right. \\ \left. \times e^{-\delta t} \cos(\omega_0 t + \theta) \right], \quad (18.1)$$

где

$$U_{уст} = \frac{U_m}{\sqrt{(4\delta^2 \omega^2 / \omega_0^4) + (\omega^2 / \omega_0^2 - 1)^2}};$$

$$\varphi_i = \varphi - \operatorname{arctg}(\omega / \omega_0^2 - 1) / (2\delta \omega / \omega_0^2); \quad \operatorname{tg} \theta = (\omega / \omega_0) \operatorname{tg} \varphi_i; \quad \delta = r / 2L.$$

Наибольшее значение $U_{уст}$ имеет при резонансе системы, когда $\omega / \omega_0 = 1$ (см. рис. 18.1). В этом случае $U_{уст} = U_m \omega_0 / 2\delta$, где $2\delta / \omega_0$ — затухание контура. При $\omega / \omega_0 < 1$ (частота контура выше частоты источника питания, что в практических случаях встречается чаще) отношение $U_{уст} / U_m = k_{уст}$ стремится к единице, а при $\omega / \omega_0 > 1$ отношение $U_{уст} / U_m$ может стать даже меньше единицы.

На рис. 18.1 пунктиром показаны также максимальные значения $U_{пер} = k_{уд} U_{уст}$. Из рисунка видно, что $k_{уд}$ меньше двух при $\omega / \omega_0 < 1$, равен единице при $\omega / \omega_0 = 1$ и может быть больше двух при $\omega / \omega_0 > 1$. Однако в последнем случае перенапряжения $U_{п} = k_{уд} k_{уст} U_m$ будут невелики вследствие того, что $k_{уст} < 1$.

Из выражения (18.1) следует, что наибольшее напряжение на емкости в сильной степени зависит от момента включения (угла φ). При каждом отношении ω / ω_0 существует наиболее неблагоприятная величина φ , при которой это напряжение оказывается наибольшим. Например, при $\omega / \omega_0 \ll 1$ наибольшие перенапряжения получаются при включении в момент максимума напряжения, т. е. при $\varphi = \pi / 2$. Выражение (18.1) для включения в наиболее неблагоприятный момент можно упростить, и для $\omega / \omega_0 < 1$ оно примет вид

$$u_C = -U_{уст} (\cos \omega t - e^{-\delta t} \cos \omega_0 t).$$

При совпадении частот ($\omega / \omega_0 = 1$) момент включения не играет роли и

$$u_C = -U_m \frac{\omega_0}{2\delta} (1 - e^{-\delta t}) \cos(\omega t + \varphi),$$

т. е. колебания происходят с постепенно возрастающей амплитудой, достигающей в пределе величины $U_{уст}$.

Кривые, приведенные на рис. 18.1, построены для контура с затуханием $\delta / \omega_0 = 0,05$. Из выражения (18.1) следует, что при увеличении затухания максимальные значения перенапряжений соответственно уменьшаются.

Анализ переходного процесса включения линий (рис. 18.2, а) показывает, что он протекает аналогично рассмотренному. Разница заключается в том, что свободная составляющая имеет ряд

гармоник, амплитуды которых убывают с увеличением номера гармоники k и образуют знакпеременный ряд:

$$U_{\text{уст}} = U_1 + U_2 - U_3 + \dots = 0.$$

Амплитуды свободных составляющих зависят от отношения T/τ , где T — постоянная времени линии; $\tau = l/v$. Для линии с емкостью в конце $T_C = zC$, следовательно, $T_C/\tau = \frac{C \sqrt{L_0/C_0}}{l \sqrt{L_0/C_0}} = C/C_{\text{л}}$, для линий с индуктивностью в начале $T_L/\tau = L/L_{\text{л}}$. Таким образом, T/τ показывает отношение сосредоточенных параметров сети к распределенным.

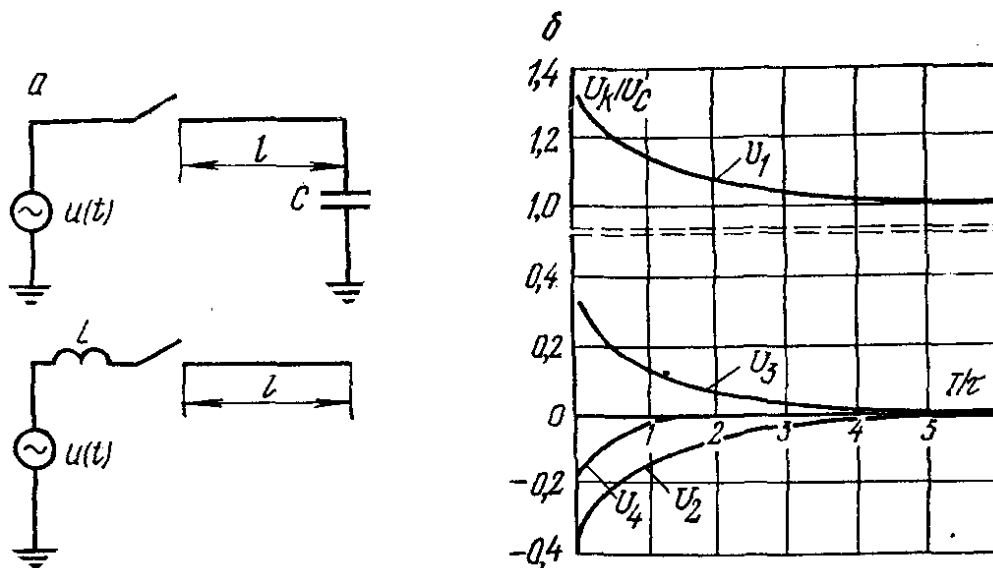


Рис. 18.2. Переходный процесс при включении линий:
а — схемы линий; б — амплитуды гармоник.

Из зависимости амплитуд свободных составляющих от T/τ (рис. 18.2, б) следует, что с увеличением отношения T/τ амплитуды высших гармоник падают до нуля, а амплитуда первой гармоники приближается к величине, характерной для простого колебательного контура. Поэтому при расчетах линии по рис. 18.2, а их обычно заменяют колебательным контуром, собственная частота которого ω_1 определяется как частота контура, составленного из индуктивности линии $L_{\text{л}}$ и емкости C или из индуктивности L и емкости линии $C_{\text{л}}$:

$$\omega_1 \tau = \tau / \sqrt{L_{\text{л}} C} = \tau \sqrt{z \tau C} = 1 / \sqrt{T_C / \tau}$$

или

$$\omega_1 \tau = \tau / \sqrt{L C_{\text{л}}} = \tau \sqrt{L \tau / z} = 1 / \sqrt{T_L / \tau}.$$

Погрешность расчетов при такой замене для $T/\tau = 2$ не превышает 8—10 %, по мере увеличения T/τ она уменьшается и при $T/\tau \geq 5-6$ становится пренебрежимо малой.

Максимальные значения установившегося напряжения и свободных составляющих переходного режима могут совпадать через некоторое время после начала процесса, в результате чего

$$k_{уд} = \frac{U_{\max \text{ пер}}}{U_{уст}} = \frac{U_{уст} + U_1 + U_2 + \dots}{U_{уст}} = 1 + \frac{U_1 + U_2 + \dots}{U_{уст}} > 2. \quad (18.2)$$

Таким образом, в отличие от простого контура ударный коэффициент при включении длинной линии может быть больше двух за счет увеличения амплитуды первой составляющей переходного режима и наличия высших гармоник. Это свойство длинных линий наиболее отчетливо проявляется при малых значениях T/τ , т. е. когда сосредоточенные параметры линии малы.

В реальных линиях коэффициент затухания δ_h , вызывающий уменьшение амплитуд гармоник и соответственно ударного коэф-

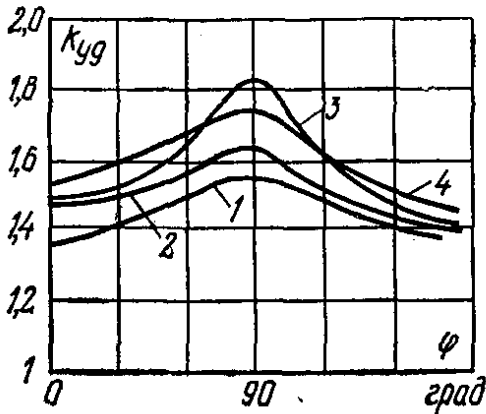


Рис. 18.3. Зависимость $k_{уд}$ от угла включения φ :

1 — короткая линия (колебательный контур); 2 — линия большой длины без компенсации; 3 — линия 1000 км с поперечной компенсацией; 4 — то же при обоих видах компенсации; $T/\tau=0,24$.

фициента $k_{уд}$ (18.2), обусловлен не только потерями в проводах линии, но и потерями в земле, а также, если $U_{пер} > U_h$, — потерями на корону. Поэтому его определение представляет сложную задачу. По данным измерений на действующих линиях электропередачи 500 кВ, среднее значение δ_h может быть принято равным 30 1/с, или 0,6 за период, что соответствует уменьшению амплитуд свободных колебаний в течение периода на 45 %.

Исследования показали, что $k_{уд}$ при включении линий имеет наибольшее значение при углах включения φ , близких к 90° , увеличиваясь по мере роста отношения ω_1/ω_0 (при $\omega_1/\omega_0=1,5$ он равен 1,35, а при $\omega_1/\omega_0=4-7$ возрастает до 1,8—1,85). Как видно из рис. 18.3, ударный коэффициент возрастает также при увеличении длины линий и при наличии устройств продольной или поперечной компенсации. Во всех случаях при самых неблагоприятных условиях включения значения $k_{уд}$ не превышают 1,7—1,8.

18.2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УДАРНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Как было отмечено, значения $k_{уд}$ зависят, в частности, от момента включения (угла φ). Поэтому для построения статистических характеристик (кривых вероятности) ударных коэффициентов $\overline{F}(k_{уд})$ нужно также знать функции распределения углов включения $\overline{F}(\varphi)$ (пробоя промежутка между контактами от угла). Ход кривых $\overline{F}(\varphi)$, построенных на основании некоторых идеализированных представлений о работе выключателей, зависит от скорости

изменения пробивного напряжения промежутка $du_{пр}/dt$. При $du_{пр}/dt=0$ кривая распределения углов включения превращается в прямую (рис. 18.4), т. е. любые углы включения при этом равновероятны. С уменьшением $du_{пр}/dt$ уменьшается вероятность включения на нисходящей части синусоиды, т. е. при $\varphi > 90^\circ$.

Зная зависимости $k_{уд} = f(\varphi)$ и кривые вероятности $\bar{F}(\varphi)$, можно построить зависимость вероятности появления $k_{уд}$, большего заданной величины, — $\bar{F}(k_{уд})$, которая будет равна вероятности попадания угла включения в интервал $\varphi_2 - \varphi_1$. На рис. 18.5 приведены кривые $\bar{F}(k_{уд})$, построенные таким образом на основании рис. 18.3 и

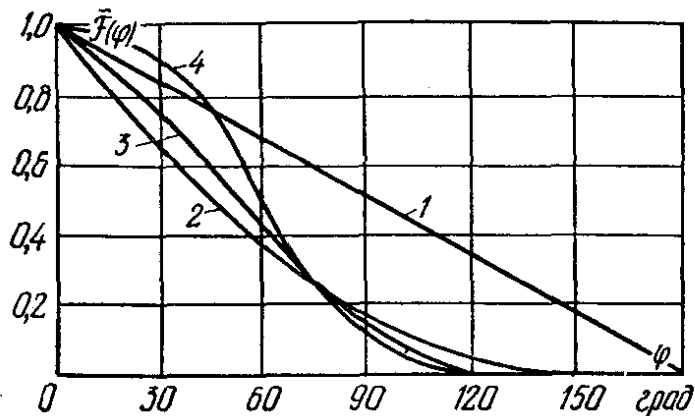


Рис. 18.4. Функции распределения углов включения:

1 — $du_{пр}/dt$; 2 — $du_{пр}/dt = \omega u_{ф}$; 3 — воздушный выключатель; 4 — баковый масляный выключатель.

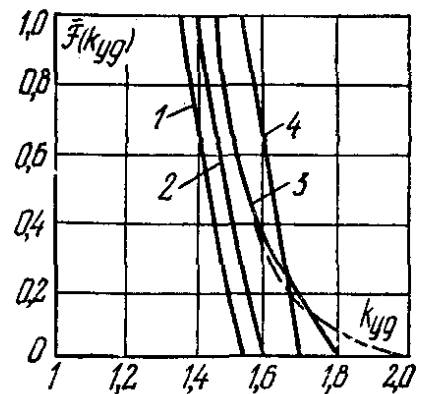


Рис. 18.5. Функции распределения $\bar{F}(k_{уд})$ для различной структуры электропередачи (обозначения такие же, как на рис. 18.3).

равномерной плотности вероятности углов включения (кривая 1 на рис. 18.4), показывающие влияние структуры электропередачи на $\bar{F}(k_{уд})$.

Неодновременное включение фаз (что до сих пор не учитывалось) приводит к тому, что функции распределения получаются несколько растянутыми в области максимальных значений $k_{уд}$ (пунктирная кривая на рис. 18.5).

На основании большого числа измерений в действующих сетях 110—330 кВ получены следующие значения вероятности $k_{уд}$ в области максимальных значений:

$k_{уд}$	1,8	1,98	2,16
$\bar{F}(k_{уд})$	0,16	0,023	0,0013

Следует отметить, что переносить эти значения на линии СВН большой протяженности, особенно с компенсирующими устройствами 750 и 1150 кВ, не представляется возможным.

В линиях напряжением не выше 220 кВ $k_{уст}$ в конце разомкнутой линии не превышает 1,1—1,2. Поэтому даже в самых неблагоприятных условиях ($k_{уд} = 2—2,2$) кратность перенапряжений $k_{п} = k_{уст} k_{уд}$ не превышает 1,6, что ниже уровня изоляции $3U_{ф}$.

В линиях СВН плановые переключения проводятся с выполнением мер, обеспечивающих минимально возможные перенапряже-

ния (включаются реакторы, снижаются ЭДС генераторов, устанавливаются минимальные коэффициенты трансформации). В результате $k_{уст}$ оказывается равным в среднем 1,1, что приводит в линиях 330 и 500 кВ к перенапряжениям, допускаемым по их уровням изоляции (2,7 и 2,5 $U_{ф}$ соответственно).

На линиях 750 кВ возможны превышения уровня изоляции (2,1 $U_{ф}$), для линии 1150 кВ с уровнем изоляции (1,8—1,9) $U_{ф}$ эта вероятность повышается. Поэтому включение разомкнутых линий 750 и 1150 кВ является расчетной коммутацией, требующей ограничения перенапряжений.

18.3. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ ПОВТОРНОМ ВКЛЮЧЕНИИ

Большинство замыканий в электрических сетях носит дуговой характер, и для их ликвидации широко применяют автоматические повторные включения (АПВ). При этом после отключения поврежденного участка линии дуга за время бестоковой паузы ликвидируется, и после повторного включения система остается в работе.

В отличие от рассмотренного выше включения незаряженной линии включение в цикле АПВ происходит при некотором начальном потенциале фаз U_0 . Действительно, отключение поврежденного участка линии при АПВ происходит при переходе тока дуги (емкостный ток линии) через нулевое значение, что соответствует максимуму напряжения на линии. Заряд, оставшийся после обрыва тока дуги и затухания переходного процесса, равномерно распределяется по проводам линий, и на них устанавливается некоторое напряжение $U_{он}$, зависящее от момента обрыва тока дуги выключателем, длины линии, мощности источника питания, коэффициента несимметрии и др. За время паузы АПВ часть оставшегося заряда стекает в землю через активные проводимости линии, и к моменту повторного включения напряжение на линии становится равным $U_0 = U_{он} k_y$ (k_y — коэффициент, характеризующий уменьшение напряжения за время бестоковой паузы АПВ, при паузе $t_{АПВ} = 0,4$ с и сухой погоде $k_y = 0,6—0,7$).

Таким образом, при включении линии в цикле АПВ результирующее напряжение в переходном режиме будет содержать две составляющие — напряжение при включении незаряженной линии, которое было определено ранее, и напряжение U_0 , оставшееся на линии после ее саморазряда. Это приводит к тому, что ударный коэффициент при АПВ может возрасти по сравнению со случаем включения незаряженной линии. В самых неблагоприятных условиях включения — при максимуме ЭДС источника e и противоположных знаках U_0 и e — он достигает значений 2,2—2,3.

Ограничение $k_{уд}$ при АПВ может быть достигнуто, кроме общих мер, путем уменьшения к моменту включения величины U_0 за счет ускорения разряда линии за время паузы АПВ, например примене-

нием электромагнитных трансформаторов напряжения (ТН), подключенных непосредственно к линии.

Во время паузы АПВ, когда оставшееся напряжение U_0 меняется незначительно, обмотки ТН выступают как активное сопротивление (порядка 25 Ом на 1 кВ номинального напряжения) и способствуют быстрому разряду линии. Однако при наличии реакторов на линии эта мера оказывается неэффективной, так как в этом случае имеет место медленно затухающий колебательный процесс разряда линии через реактор, и индуктивное сопротивление обмоток ТН, величина которого значительно больше индуктивного сопротивления реактора, уже не влияет на характер процесса. Ударный коэффициент в этом случае может даже возрасти до 2,5—2,7.

Таким образом, в отличие от плановых включений линий, которые производятся обычно в заранее подготовленных условиях, большинство случаев АПВ приводит к перенапряжениям, превышающим уровень изоляции электроустановок 330 кВ и выше.

19. КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИЯХ

19.1. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ НЕНАГРУЖЕННЫХ ЛИНИЙ

Перенапряжения при отключении ненагруженных линий возникают вследствие повторных зажигания дуги между контактами выключателя. Рассмотрим этот процесс на примере линии, отключаемой выключателем B , сопротивление изоляции линии будем считать равным бесконечности.

Дуга между контактами выключателя погаснет в момент t_1 (рис. 19.1, a) прохождения емкостного тока линии через нуль, при этом на линии останется заряд, определяемый потенциалом провода $-U_m$ в момент гашения дуги. Если $R_{\text{из}} = \infty$, то этот потенциал

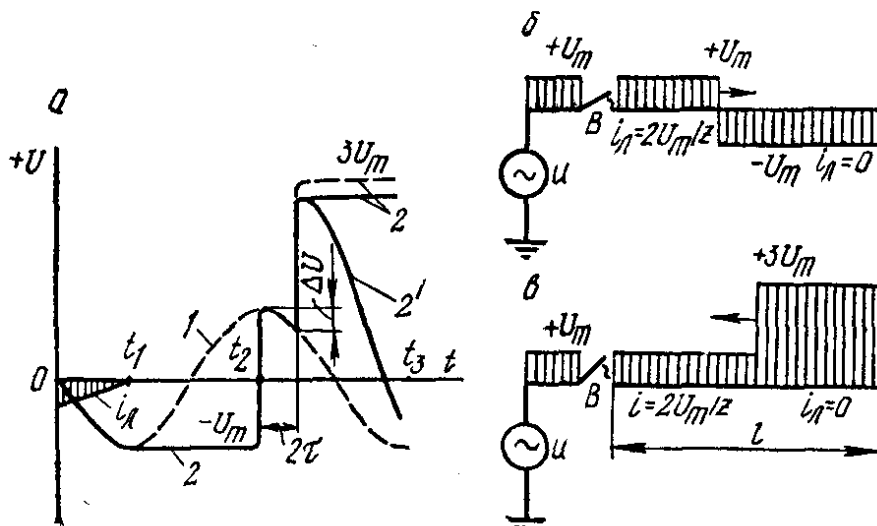


Рис. 19.1. Перенапряжения при отключении ненагруженной линии.

провода (кривая 2) сохранится до момента $t_2 = t_1 + T/2$ (T — период источника питания). В момент t_2 амплитуда напряжения источника питания станет равной $+U_m$, т. е. между контактами выключателя будет разность потенциалов $2U_m$, под действием которой в выключателе, если восстанавливающаяся прочность промежутка за этот полупериод окажется ниже $2U_m$, может произойти пробой промежутка и повторное зажигание дуги.

В результате повторного зажигания линия будет перезарядаться от потенциала $-U_m$ до $+U_m$, т. е. по линии будет распространяться волна напряжения $+2U_m$ и проходить ток $+2U_m/z$. Распределение напряжения по линии при этом процессе в момент до прихода волны $+2U_m$ к концу линии ($t < t_2 + \tau$) и после ее отражения ($t > t_2 + \tau$) с удвоением амплитуды, в результате чего на линии устанавливается напряжение $+4U_m - U_m = +3U_m$, показано на рис. 19.1, б и в соответственно. Так как ток $i_{\text{л}}$ отражается от разомкнутого конца линии с обратным знаком, то в линии устанавливается ток, равный нулю. После прихода через время $2\tau = 2l/v$ отраженных волн к началу линии на ней устанавливается напряжение $+3U_m$ и происходит второе гашение дуги (момент $t_2 + 2\tau$, рис. 19.1, а).

Рассуждая подобным образом, можно прийти к выводу, что в результате последующих повторных зажиганий дуги напряжение на линии будет повышаться до $5U_m$, $7U_m$ и т. д. В действительности этого не происходит по ряду причин. Во-первых, к моменту прихода отражений от конца линии волны напряжение источника не остается равным U_m , а уменьшается до величины $U_m - \Delta U = U_m \cos(\omega \cdot 2\tau)$. При длине линии 300 км 2τ составляет 0,002 с, и напряжение источника уменьшается за это время до $0,81 U_m$, поэтому первый максимум напряжения будет не $3 U_m$, а $2,81 U_m$. Во-вторых, при наличии шунтирующих реакторов происходит разряд линии на реактор и возникают затухающие колебания с частотой, обычно меньшей частоты источника (кривая 2' на рис. 19.1, а). В результате восстанавливающееся напряжение на выключателе будет значительно меньше $3 U_m$ (разность между кривыми 1 и 2') и вероятность повторного зажигания (даже в масляных выключателях) будет очень мала.

Опыт эксплуатации показал, что отключение ненагруженных линий СВН не сопровождается повторными зажиганиями при применении воздушных выключателей даже при отсутствии реакторов или масляных выключателей при включенных шунтирующих реакторах. Поэтому отключение ненагруженных линий 500 кВ и выше не представляет опасности и обычно не учитывается при проектировании защиты от внутренних перенапряжений. Для предупреждения возникновения таких перенапряжений надо применять надежные устройства автоматического управления выключателями.

Аналогичные перенапряжения, связанные с остаточными зарядами на емкости и процессами ее перезарядки при повторных зажиганиях дуги в выключателях, имеют место также при отключении и неправильном (замедленном) включении батарей конденсаторов.

19.2. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ РЕАКТОРОВ И НЕНАГРУЖЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Перенапряжения при отключении индуктивностей в очень сильной степени зависят от процесса обрыва тока в выключателе. При больших токах (отключение коротких замыканий или значительных индуктивных нагрузок) обрыв тока бывает в момент его естественного прохождения через нуль, снижение тока до нуля при этом происходит плавно, и магнитная энергия в отключаемой индуктивности практически отсутствует.

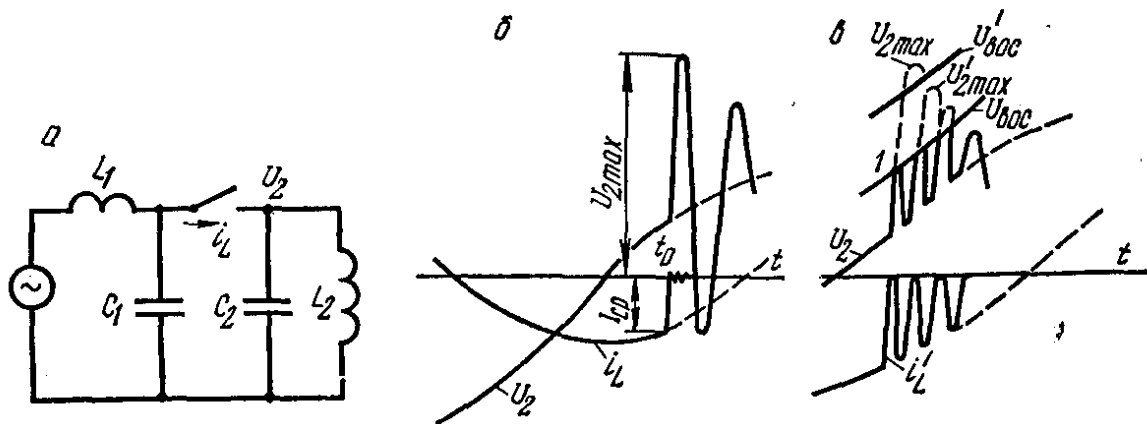


Рис. 19.2. Перенапряжения при отключении индуктивностей:
 L_1, C_1 — индуктивность и емкость сети.

При малых токах, например при отключении ненагруженных трансформаторов, вследствие слабой степени ионизации дуги обрыв («срез») тока может произойти до того, как ток пройдет свое нормальное нулевое значение (в современных выключателях токи среза $I_{ср}$ могут достигать порядка 10 А).

Рассмотрим процесс отключения индуктивности L_2 (рис. 19.2, а). Пусть срез тока произошел в момент t_0 (рис. 19.2, б), при этом в индуктивности L_2 была запасена магнитная энергия $I_{ср}^2 L_2 / 2$; индуктивность источника $L_1 \ll L_2$, и энергия $I_{ср}^2 L_1 / 2$ вследствие своей малой величины на протекание процесса влияния не оказывает. После обрыва тока в контуре $L_2 C_2$ возникают колебания с частотой $\omega_2 = 1/\sqrt{L_2 C_2}$, максимальное напряжение U_2 на емкости C_2 (входная емкость трансформатора) легко определить из выражения баланса энергии:

$$C_2 U_0^2 / 2 + L_2 I_{ср}^2 / 2 = C_2 U_{2max}^2 / 2$$

или

$$U_{2max} = \sqrt{U_0^2 + L_2 I_{ср}^2 / C_2}, \quad (19.1)$$

где U_0 — значение напряжения на емкости C_2 в момент среза.

Например, трансформатор с $U_{ном} = 110$ кВ и $S_{ном} = 31\,500$ кВ·А имеет ток холостого хода порядка 3 %, или 6,5 А, $L_2 = 50$ Гн и $C_2 = 10\,000$ пФ, или 10^{-8} Ф. В этом случае при отключении холостого хода такого трансформатора ток может быть оборван на максимуме, т. е. $I_{ср} = 6,5$ А, $U_0 = 0$ и

$$U_{2\max} = \sqrt{L_2 I_{\text{ср}}^2 / C_2} = \sqrt{50 \cdot 6,5^2 / 10^{-8}} \approx 450 \text{ кВ},$$

что в 4,5 раза превышает амплитуду фазного напряжения.

Перенапряжения обычно не достигают $U_{2\max}$, так как в точке 1 (рис. 19.2, в), когда напряжение U_2 делается равным восстанавливающейся электрической прочности $U_{\text{вос}}$ между контактами выключателя, происходит повторное зажигание дуги в выключателе. При этом между контактами выключателя снова начинает протекать ток i'_L и происходит новый срез его, но при меньших значениях, поэтому ожидаемая амплитуда перенапряжений $U'_{2\max}$ снижается в соответствии с выражением (19.1). Повторные зажигания дуги происходят несколько раз, пока уменьшающийся постепенно максимум перенапряжения $U_{2\max}$ не станет меньше $U_{\text{вос}}$.

Таким образом, повторные зажигания дуги в выключателе в данном случае уменьшают амплитуду возможных перенапряжений, поэтому перенапряжения будут больше при применении воздушных выключателей, для которых нарастание прочности $U_{\text{вос}}$ происходит быстрее, чем для масляных.

Так как перенапряжения при отключении индуктивностей достигают своей предельной величины (4—5) $U_{\text{ф}}$ лишь в очень редких случаях и имеют малую длительность, не превышающую 0,1 с, то они не представляют опасности для трансформаторов с нормальным уровнем изоляции. Но так как в эксплуатации всегда имеются трансформаторы с ослабленной изоляцией и в настоящее время наблюдается тенденция к снижению уровней изоляции, особенно для оборудования сверхвысокого напряжения, определенный интерес представляют способы ограничения таких перенапряжений.

К таким способам относятся прежде всего: увеличение емкости C_2 , включенной параллельно отключаемому трансформатору, например постоянно включенные участки кабелей; применение выключателей с шунтирующими высокоомными (несколько килоом) резисторами, которые рассеивают энергию магнитного поля и демпфируют колебания; отключение трансформаторов со стороны низкого напряжения, где ток холостого хода больше и вероятность его преждевременного «среза» меньше. Наиболее реальным способом ограничения перенапряжений является применение разрядников, постоянно включенных на выводы трансформатора, причем возможно применение стандартных грозовых разрядников, так как энергия, запасаемая в индуктивности, невелика и значительно меньше их пропускной способности.

Аналогичные перенапряжения имеют место при отключении реакторов, устанавливаемых на длинных линиях электропередачи.

19.3. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ И АСИНХРОННОГО ХОДА

Отключение линий при к. з., когда на поврежденной фазе напряжение может меняться от нуля при к. з. до максимального значения после его отключения, может сопровождаться перенапряже-

ниями, достигающими $2U_{\phi}$. Наиболее высокие перенапряжения (до $4,5U_{\phi}$) могут возникнуть в длинных компенсированных линиях с высоким коэффициентом компенсации ($k=0,4$) при к. з. за УПК, так как в этом случае напряжение на УПК находится в противофазе с ЭДС генератора и становится особенно большим. Напряжение будет тем больше, чем выше допустимое напряжение на УПК в условиях короткого замыкания, т. е. чем выше пробивное напряжение защитного разрядника, шунтирующего конденсаторную батарею при сквозных к. з.

Отключение токов к. з. плавкими предохранителями, устанавливаемыми, например, в цепи трансформаторов небольшой мощности, происходит с очень большой скоростью и поэтому часто сопровождается значительными перенапряжениями. Эти перенапряжения при прочих равных условиях растут с увеличением длины плавкой вставки, поэтому для уменьшения уровня перенапряжений можно применять плавкую вставку, состоящую из двух половинок проволоки одинаковой длины, но разного диаметра. Сначала перегорает проволока меньшего диаметра, при этом перенапряжение снижается в соответствии с меньшей длиной этой части вставки, затем перегорает вторая часть вставки, что сопровождается новым всплеском перенапряжения. Таким образом, перенапряжение как бы перераспределяется поровну на два пика. Большое значение для снижения перенапряжений имеют также свойства и природа заполнителей плавкого предохранителя (кварцевый песок, соединения бора и др.). Правильным подбором всех параметров плавкого предохранителя можно свести опасность перенапряжений к минимуму.

При нарушении устойчивости параллельной работы электропередача может перейти в асинхронный режим, и отключение произойдет в момент, когда угол между ЭДС по концам линии будет близок к 180° , а величина ЭДС за счет действия регуляторов напряжения повысится на 20—30 %. Такой режим близок к режиму к. з., так как по линии проходит большой индуктивный ток. В случае неодновременного срабатывания выключателей по концам линии она попадет на короткое время в режим одностороннего питания, при котором напряжение на отключенном конце значительно повышается. Учитывая различные знаки начального и установившегося напряжений и повышенные значения ЭДС источника питания, можно ожидать повышения напряжений до $(3—3,5) U_{\phi}$. Однако указанные значения перенапряжений возникают крайне редко.

20. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

20.1. ПОВЫШЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ НА ФАЗАХ ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

Если замыкание на землю в сети с изолированной нейтралью будет глухим (металлическим), то потенциал поврежденной фазы упадет до нуля, потенциал нейтрали повысится до фазового напря-

жения, а здоровых фаз — до линейного. При дуговом замыкании дуга периодически гаснет и зажигается вновь, т. е. имеет перемежающийся характер. В этом случае в сети могут возникнуть перенапряжения, достигающие значительных величин. Опасность таких перенапряжений усугубляется тем, что они могут существовать длительное время (по нормам, до двух часов, в течение этого времени должны быть приняты меры по устранению замыкания) и воздействуют на изоляцию всех электрически связанных элементов сети;

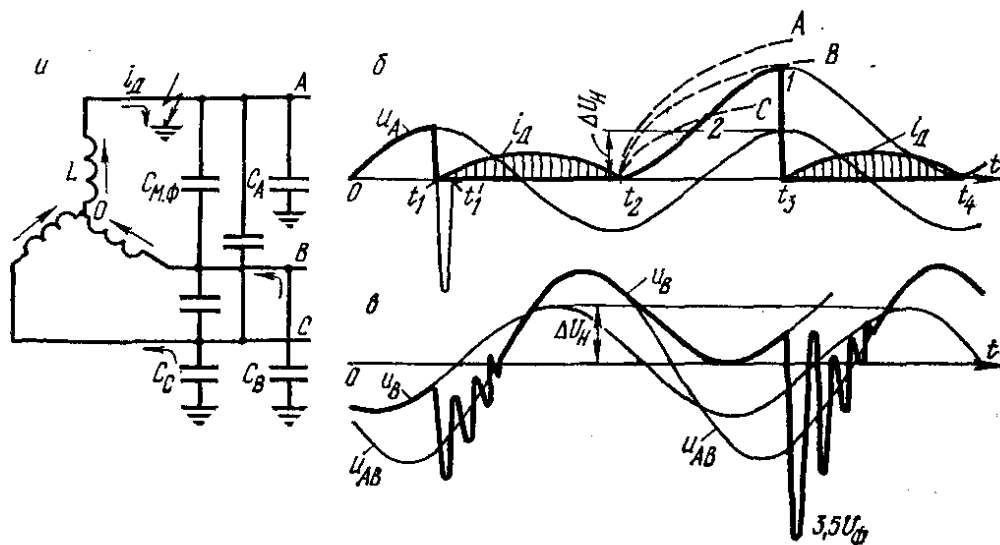


Рис. 20.1. Перенапряжения при дуговых замыканиях в трехфазной сети.

кроме того, дуга может перекинуться на соседние фазы и вызвать междуфазовое замыкание.

Рассмотрим механизм возникновения дуговых перенапряжений в трехфазной системе (рис. 20.1, а). Вторичная обмотка трансформатора питает линию, имеющую симметричные емкости относительно земли $C_A = C_B = C_C = C$. Для упрощения рассмотрения процесса будем считать, что емкости между фазами $C_{м.ф}$ невелики и их влиянием можно пренебречь. Будем также считать, что сопротивление изоляции сети равно бесконечности и что повторные зажигания дуги в сети происходят в моменты максимума напряжения на поврежденной фазе, а гашение — при переходе через нуль тока промышленной частоты ω .

Изменения потенциалов фаз A и B , а также линейного напряжения $U_{AB} = U_B - U_A$ представлены на рис. 20.1, б, в. Пусть в некоторый момент t_1 происходит замыкание фазы A на землю и в точке замыкания возникает дуга. Потенциал «больной» фазы A при этом падает практически мгновенно до нуля, а потенциал «здоровой» фазы B повышается до линейного.

Это изменение потенциала здоровой фазы сопровождается свободными колебаниями, вызванными перезарядом ее емкости через индуктивность трансформатора. Частота свободных колебаний $\omega_1 = 1/\sqrt{3L(C + C_{м.ф})} > \omega$, а амплитуда $U_{св}(t_1) = U_{нач}(t_1) - U_{уст}(t_1)$. Накладываясь на установившееся значение напряжения здоровой фазы, свободные колебания определяют ее наибольший потенциал,

который наступает через полпериода свободных колебаний. Например, для фазы B без учета затухания амплитуды свободных колебаний имеем: $U_{св}(t_1) = 0,5U_{\phi} - (1,5U_{\phi}) = U_{\phi}$ и $U_{\max}(t_1) = 1,5U_{\phi} + U_{\phi} = 2,5U_{\phi}$.

Свободные колебания быстро затухают вследствие значительного сопротивления контура $L(C + C_{м.ф})$, и в дальнейшем напряжение на здоровой фазе B изменяется по кривой u_{AB} , а на поврежденной фазе при горении дуги напряжение остается равным нулю. Дуга гаснет в точке t_2 , когда ток i_d дуги, являющийся емкостным током фаз B и C , проходит через нуль. При этом в сети остается заряд на двух здоровых фазах $Q_2 = 2C \cdot 1,5U_{\phi}$ (напряжение фазы C , отстающее от напряжения U_{AB} на 60° , также равно $1,5U_{\phi}$). После погасания дуги этот заряд распределяется поровну между всеми фазами (так как $C_1 = C_2 = C_3$) и они приобретают потенциал $+U_{\phi}$. Таким образом, потенциал нейтрали системы смещается на величину $\Delta U_H = +U_{\phi}$, и изменение потенциалов всех фаз в дальнейшем происходит относительно этого значения потенциала нейтрали (участок $t_2 - t_3$).

В точке t_3 (максимум напряжения фазы A) происходит новое зажигание дуги, потенциал поврежденной фазы падает до нуля, а здоровой фазы B меняется от $0,5 U_{\phi}$ до $-1,5U_{\phi}$, т. е. $U_{св}(t_3) = 2U_{\phi}$. Максимальный потенциал фазы B достигает при этом $3,5 U_{\phi}$.

В дальнейшем (точки t_4 и последующие) процесс повторяется при таких же условиях, что и для точек t_2 и t_3 . Таким образом, каждое новое повторное зажигание будет сопровождаться повышением потенциала здоровой фазы до $3,5U_{\phi}$. Процесс повышения напряжения на фазе C протекает аналогично.

Рассмотренная теория возникновения дуговых перенапряжений, предполагающая погасание дуги в момент прохождения через нуль тока основной частоты, была предложена американскими инженерами Петерсом и Слепяном. Аналогичная теория, но предполагающая, что дуга гаснет в момент прохождения через нуль свободного тока $i_{св}$ (точка t'_1), была предложена Петерсеном. По этой теории, напряжение на исправных фазах в трехфазной системе может повышаться до $7,5 U_{\phi}$.

Наблюдаемые в электрических сетях дуговые перенапряжения всегда значительно ниже тех, которые следуют из указанных теорий. Это объясняется тем, что в реальных условиях сети всегда обладают некоторым конечным сопротивлением изоляции, между проводами существует емкость, повторные зажигания дуги могут происходить не при максимуме напряжения (точка 1), а раньше (точка 2 на кривой u_A), и амплитуды свободных колебаний испытывают значительное затухание. Все это уменьшает остающийся после гашения дуги заряд Q и, следовательно, амплитуды перенапряжений.

Исследования, проведенные Ч. М. Джуварлы и Н. Н. Беляковым, позволили создать теорию, не привязанную к тому или иному механизму гашения дуги. По этой теории, возможность повторного

Гашению дуги способствует также уменьшение скорости восстановления напряжения на поврежденной фазе, которая определяется расстройкой катушки v от точной компенсации. Обозначим через k настройку катушки:

$$k = \frac{I_L}{I_C} = \frac{1}{\omega^2 \cdot 3LC} = \frac{\omega_0^2}{\omega^2},$$

где ω_0 — частота собственных колебаний контура LC . Получим

$$v = 1 - k = 1 - \omega_0^2/\omega^2,$$

и остаточный ток через катушку

$$I_{\text{ост}} = \sqrt{I_a^2 + (I_C v)^2},$$

где $I_a = gU_\phi$ — ток катушки, обусловленный активной проводимостью g сети. При точной настройке катушки $\omega = \omega_0$ и $v = 0$, т. е. остаточный ток будет минимален; при расстройке он возрастает.

После гашения дуги напряжение на поврежденной фазе восстанавливается до U_ϕ . Скорость этого восстановления минимальна при $v = 0$ и увеличивается при расстройке, однако в узком диапазоне расстройки $v = \pm 5\%$ эта скорость остается практически такой же, что и при резонансе.

Из сказанного следует, что необходимо стремиться к точной настройке катушки. Однако на практике обычно работают с некоторой расстройкой. Это объясняется тем, что осуществить точную настройку катушки практически невозможно вследствие ступенчатого изменения индуктивности катушки (путем переключения ее отводов) и погрешностей в определении емкости сети.

Так как работа с недокомпенсацией ($I_L < I_C$) сопровождается значительным перекосом фазовых напряжений, то правилами технической эксплуатации разрешается работа катушки только с перекомпенсацией ($I_L > I_C$), не превышающей 5 %.

При наличии в сети дугогасящей катушки напряжение (смещение) нейтрали

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_0}, \quad (20.1)$$

где $Y_A - Y_C$ — проводимости фаз сети на землю, имеющие емкостный характер; Y_0 — проводимость катушки, имеющая индуктивный характер.

Так как емкости фаз сети на землю обычно неодинаковые вследствие несимметричного расположения проводов, смещение нейтрали всегда имеет место. Например, при горизонтальном расположении проводов оно составляет примерно 3,5 % фазового напряжения. При наличии в нейтрали дугогасящей катушки смещение нейтрали возрастает, так как в знаменателе выражения (20.1) добавляется член Y_0 , имеющий обратный знак по сравнению с $Y_A - Y_C$. Поэтому смещение нейтрали в той же сети при наличии катушки может возрасти до 30—35 % U_ϕ , что нежелательно в основном из-за воз-

растающего при этом влияния линии передачи на линии связи. Смещение нейтрали будет максимальным при точной настройке катушки и уменьшается при ее расстройке, с этой точки зрения некоторая расстройка катушки желательна.

Дугогасящие катушки выполняют в виде реактора со стальным сердечником, помещенного в бак, заполненный трансформаторным маслом. Вольт-амперная характеристика катушки должна быть по возможности линейной (в противном случае небольшие изменения напряжения в сети будут приводить к значительной расстройке),

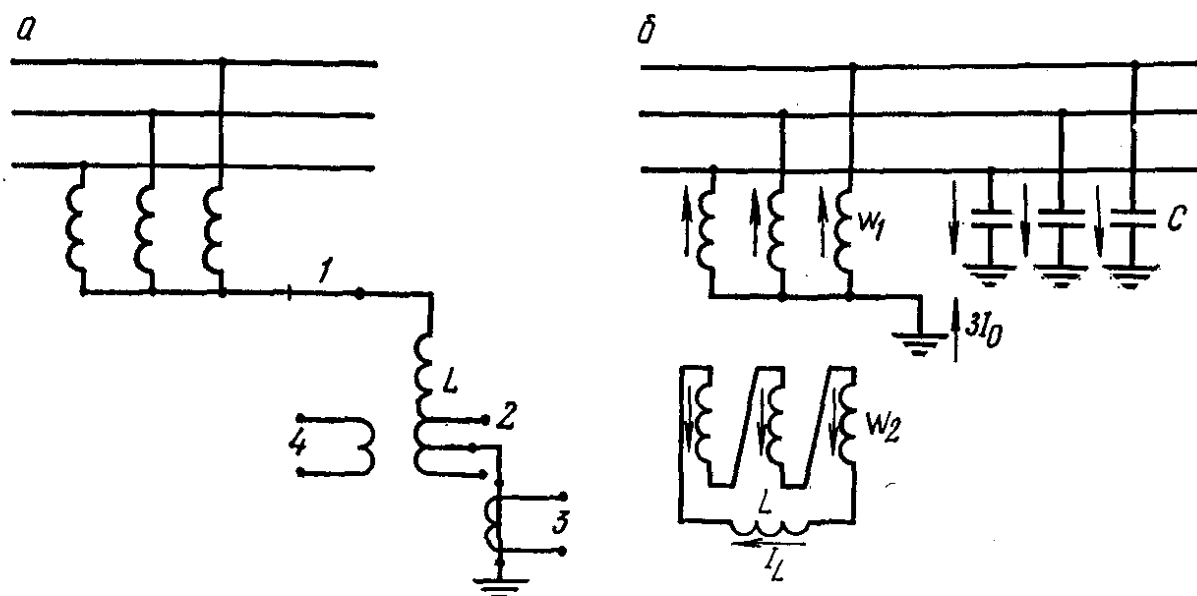


Рис. 20.3. Схемы включения дугогасящей катушки (а) и трансформатора Бауха (б).

поэтому сердечник катушки имеет обычно несколько воздушных зазоров. Для регулирования индуктивности (настройки) катушки имеют отводы 2 (рис. 20.3, а), которые позволяют изменять ток компенсации в пределах 1 : 2 или 1 : 2,5.

В СССР дугогасящие катушки выпускают на напряжения 6, 10, 35 кВ и токи 25—400 А при 6 кВ, 25—200 А при 10 кВ и 6—50 А при 35 кВ.

При токах замыкания на землю ниже 25—30 А в сетях напряжением 6—10 кВ и ниже 5 А в сетях 35 кВ дуга гаснет сама и применять дугогасящие катушки **нет необходимости**.

Мощность дугогасящей катушки $Q = I_L U_\phi$ (квар) определяется верхним пределом тока катушки и ставится в обозначении типа в числителе после букв ЗРОМ (заземляющий реактор однофазный масляный), а номинальное напряжение (в кВ) — в знаменателе.

Дугогасящие катушки включают в нейтраль одного из работающих трансформаторов сети (см. рис. 20.3, а) через разъединитель 1. Для измерения тока, протекающего через катушку, служит трансформатор тока 3. Дополнительная обмотка 4 питает цепи сигнализации.

Если в сети нет доступной нейтрали, то в качестве дугогасящего аппарата можно применять дугогасящий трансформатор (трансформатор Бауха, рис. 20.3, б). Магнитопровод такого трансформатора

тора имеет четыре стержня, на трех из них имеются первичные ω_1 и вторичные ω_2 обмотки. Первичные обмотки соединены в звезду и подключены к шинам подстанции, а вторичные — в открытый треугольник, на зажимы которого включен регулировочный дроссель L .

При замыкании на землю через первичные обмотки будут протекать токи нулевой последовательности I_0 ; магнитные потоки, создаваемые ими, будут направлены в одну сторону и замыкаться через четвертый стержень. ЭДС во вторичной обмотке возбуждает ток, который замыкается через регулировочный дроссель, т. е. является индуктивным. Трансформируемый в первичной обмотке ток, который является также индуктивным, будет компенсировать емкостный ток замыкания на землю.

21. ОГРАНИЧЕНИЕ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

21.1. СХЕМНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОГРАНИЧЕНИЮ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Выше было показано, что внутренние перенапряжения в ряде случаев могут превышать уровни изоляции установок 330 кВ и выше, поэтому необходимо их ограничивать. Мероприятия по ограничению внутренних перенапряжений можно разделить на две группы. К **первой группе** относятся схемные мероприятия и средства ограничения установившихся перенапряжений, такие, как установка пониженных коэффициентов трансформации, ограничение минимального количества работающих генераторов и их ЭДС, использование шунтирующих реакторов, вынос электромагнитных трансформаторов напряжения на линию, применение схем без выключателей на стороне высшего напряжения. **Вторую группу** составляют средства и способы защиты от перенапряжений переходного режима.

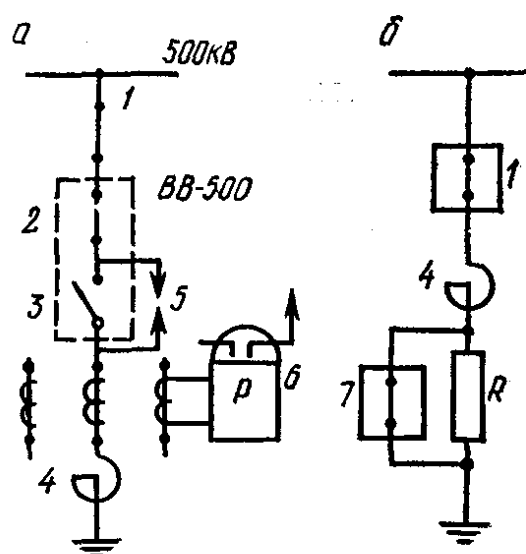


Рис. 21.1. Схемы искрового подключения (а) и включения резисторов в цепь реакторов (б).

Благоприятное влияние **реакторов**, пониженных коэффициентов трансформации и снижения ЭДС может быть использовано в основном при плановых коммутациях. При передаче максимальных мощностей включение всех реакторов обычно недопустимо, так как приводит к значительным потерям и снижает предел устойчивости. По-

этому в таких случаях применяют схему «безынерционного (искрового) подключения реакторов», по которой отключенные по условиям нормального режима реакторы практически мгновенно подключаются к линии, как только повышения напряжения выходят за допустимый предел (рис. 21.1, а). Подключаемый реактор 4 нормально отключен отделителем 3 воздушного выключателя ВВ. Параллельно контактам отделителя включен искровой промежуток 5, пробивное напряжение которого составляет $1,5 U_{\phi}$, т. е. с учетом изменения атмосферных условий и статистического разброса (всего $\pm 20\%$) составляет $(1,2—1,8) U_{\phi}$, что обеспечивает отстройку от возможных повышений напряжения при качаниях ($U_{\text{кач}} \leq 1,2 U_{\phi}$).

При опасных повышениях напряжения $U_{\text{уст}}$ искровой промежуток 5 пробивается, шунтирует контакты отделителя 3 и через замкнутые главные контакты 2 выключателя подключает реактор 4 к линии 1. Ток реактора приводит к срабатыванию релейной защиты 6, которая вызывает замыкание контактов отделителя, дуга в искровом промежутке при этом гаснет. После восстановления нормального режима работы линии реактор отключается обслуживающим персоналом или защитой.

Для ограничения перенапряжений при АПВ широко применяют **резисторы**, включаемые последовательно с фазами реактора на время паузы АПВ (рис. 21.1, б). Нормально резистор $R \geq 60$ Ом зашунтирован выключателем 7, импульсы на его отключение подаются одновременно с запуском АПВ, и затем с выдержкой 0,4—0,5 с производится его обратное включение. Линия при этом к концу паузы АПВ полностью разряжается, и ударные коэффициенты оказываются такими же, как и при включении ненагруженных линий.

Вынос электромагнитных ТН на линию обеспечивает ее быстрый саморазряд и уменьшает тем самым вероятность повторных зажиганий и, следовательно, перенапряжений при отключениях ненагруженных линий и особенно при АПВ. Выше (см. § 18.3) было отмечено, что наличие реакторов приводит к колебательному процессу разряда линии, и ТН не оказывают при этом своего благоприятного влияния. Поэтому на время бестоковой паузы АПВ реакторы рекомендуется отключать, это позволяет использовать благоприятный эффект от применения ТН и при наличии реакторов.

Применение блочных схем без выключателей на стороне высшего напряжения исключает режимы, когда линия оказывается разомкнутой на конце, т. е. способствует ограничению перенапряжений при отключении ненагруженных линий и АПВ. Однако в таких схемах возможно возникновение перенапряжений на высших гармониках и при большом разбросе или отказе выключателя одной из фаз. Значительной опасности при этом подвергается изоляция трансформаторов или автотрансформаторов, поэтому блочные схемы применяют преимущественно при напряжениях не выше 330 кВ.

21.2. СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА

К средствам и способам защиты от перенапряжений переходного режима относятся коммутационные (комбинированные) вентиляные разрядники, выключатели, предотвращающие возникновение значительных перенапряжений, и устройства, управляющие моментом коммутации.

Описание принципа действия комбинированного разрядника типа РВМК приведено в п. 12.3.4. Там было отмечено, что вследствие значительно большей длительности коммутационных перенапряжений по сравнению с грозowymi варисторы коммутационных разрядников изготавливаются из тервита, обладающего большей по сравнению с вилитом пропускной способностью. К этому следует добавить, что условия гашения дуги в коммутационных разрядниках получаются также более тяжелыми вследствие более высоких напряжений при ее гашении. Действительно, последний обрыв тока разрядника может сам по себе вызвать переходный процесс, в результате чего напряжение после обрыва, т. е. напряжение гашения $U_{\text{гаш}}$, может быть выше $U_{\text{уст}}$ (обычно вследствие нелинейной характеристики разрядников $U_{\text{гаш}} \leq 1,15U_{\text{уст}}$). Следовательно, коэффициент гашения $k_{\text{гаш}} = U_{\text{пр}}/U_{\text{гаш}}$ в коммутационных разрядниках должен быть ниже, чем в грозowych.

В разрядниках типа РВМК-500-П коэффициент гашения удалось снизить до 1,25, следовательно, при $U_{\text{пр}} = (2,4 - 2,5)U_{\text{ф}}$ напряжение гашения таких разрядников составляет $U_{\text{гаш}} = U_{\text{пр}}/k_{\text{гаш}} = (1,9 - 2)U_{\text{ф}}$. Таким образом, установившееся напряжение при обрыве тока в коммутационном разряднике с учетом его возможного повышения в 1,15 раза не должно превышать $U_{\text{уст}} = U_{\text{пр}}/1,15k_{\text{гаш}} = 2,5U_{\text{ф}}/1,15 \cdot 1,25 = 1,75U_{\text{ф}}$ (для 750 и 1150 кВ получим соответственно $1,45U_{\text{ф}}$ и $1,25U_{\text{ф}}$).

Если установившееся напряжение превысит указанные величины, то гашения дуги не произойдет и линия будет отключена защитой. Современные коммутационные разрядники рассчитаны на прохождение сопровождающего тока в течение трех-четырех полупериодов (0,015—0,02 с), и если время отключения защитой будет больше, произойдет разрушение разрядника. Так как современные релейные защиты не могут гарантировать время отключения менее 0,04—0,06 с, то приходится ограничивать $U_{\text{уст}}$ до значений, приведенных выше, путем установки шунтирующих реакторов.

Перспективным является широкое применение **нелинейных ограничителей перенапряжений** (см. п. 12.3.4), которые, как показала их опытная эксплуатация, обеспечивают ограничение внутренних перенапряжений до уровня $(1,65 - 1,8)U_{\text{ф}}$.

Ограничение перенапряжений только переходного режима может быть достигнуто также применением **выключателей с шунтирующими резисторами** (рис. 21.2). При включении вначале замыкаются вспомогательные контакты 2, при этом цепь подключается через резистор R ; после этого с небольшой выдержкой времени за-

мыкаются главные контакты 1. Отключение происходит в обратном порядке, поэтому в течение какого-то времени резисторы способствуют затуханию свободных колебаний, а также обеспечивают стекание остаточного заряда с линии при отключении ненагруженных линий и АПВ. В схеме рис. 21.2, а через вспомогательные контакты 2 полный рабочий ток не протекает, и их можно выполнять облегченными, но зато в этой схеме на главные контакты приходится полная разность потенциалов между источником и отключаемым объектом, что увеличивает в некоторой степени вероятность обратных зажигания по сравнению со схемой рис. 21.2, б.

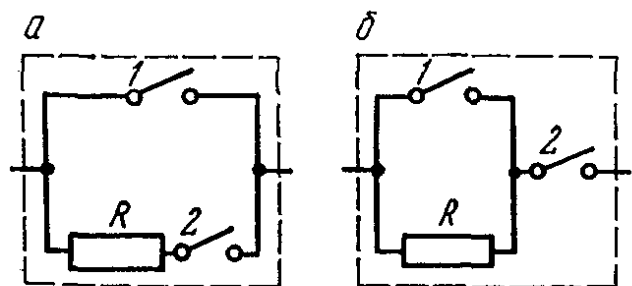


Рис. 21.2. Принципиальные схемы выключателей с шунтирующими резисторами.

Недостатком таких выключателей является то, что сопротивление резисторов R зависит от характера коммутации. Например, для демпфирования колебаний при включениях, отключениях к. з. и асинхронного хода оно должно быть порядка сотен ом, для предотвращения повторных зажигания при отключении ненагруженной линии — примерно 1000 Ом, для ограничения перенапряжений при отключениях и снятия остаточного заряда — приблизительно 10 кОм. Следовательно, выбрать сопротивление резистора, которое обеспечивало бы ограничение перенапряжений при любых коммутациях, не представляется возможным.

Значительное ограничение перенапряжений при включениях и АПВ можно получить путем управления моментом коммутации. Например, наиболее благоприятные условия коммутации при АПВ получаются, когда остающееся напряжение на линии и ЭДС источника совпадают по фазе и близки по абсолютному значению, т. е. когда разность потенциалов между контактами выключателя минимальна (**синхронное включение**).

Пусть, например, замыкание контактов выключателя должно произойти в момент t_0 , тогда контакты выключателя должны начать двигаться в момент времени $t_0 - t_{\text{вкл}}$, где $t_{\text{вкл}}$ — собственное время выключателя. Этому моменту соответствует определенное значение ЭДС источника, при котором и должна начать действовать система включения. Основные трудности при решении этой задачи состоят в обеспечении необходимых механических характеристик выключателей. В частности, для четкого управления моментом включения необходимы выключатели с достаточно высокой скоростью движения контактов и малым разбросом собственного времени включения (последнее обусловлено колебаниями давления и температуры в выключателе, колебаниями напряжения на соленоиде включения и другими причинами).

Исследование выключателей ВВБ-750 на опытно-промышлен-

ной ВЛ 750 кВ в СССР показало, что они могут обеспечить синхронное включение с удовлетворительной степенью точности.

В § 18.3 указывалось, что максимальное значение $k_{уд}$ при АПВ линий составляет 2,2—2,3 при угле включения порядка 90° , синхронное включение позволяет снизить значения $k_{уд}$ до 1,2 при углах включения $270 \pm 30^\circ$.

В заключение отметим, что ограничение коммутационных перенапряжений путем применения выключателей с шунтирующими резисторами и управления моментом включения является перспективным, но находится пока еще в стадии исследований.

Комплексная схема защиты от внутренних перенапряжений, разработанная для электропередач 500—750 кВ, содержит следующие элементы.

1. Шунтирующие реакторы, ограничивающие перенапряжения в установившемся режиме и частично в переходном. В случае необходимости, когда часть из них должна быть отключена в нормальном режиме электропередачи, они снабжаются устройством искрового подключения. Применяются шунтирующие реакторы на стороне высшего напряжения, начиная с $U_{ном} = 500$ кВ.

2. Резисторы, вводимые в фазы реактора на время паузы АПВ и обеспечивающие стекание зарядов линии и тем самым снижение $k_{уд}$.

3. Электромагнитные трансформаторы напряжения, подключенные к ВЛ; применяются только в тех случаях, когда на линии нет шунтирующих реакторов или они отключаются при АПВ.

4. Релейную защиту от повышения напряжения. При повышении напряжения более чем на 15 % релейная защита с выдержкой 15—20 с воздействует на сигнал, работу регуляторов напряжения, включает дополнительные реакторы; при повышении напряжения на 35—50 % выдержка времени защиты составляет 0,1—0,15 с, при отключениях к. з. она уменьшается до 1—2 периодов.

5. При более высоких перенапряжениях, когда их воздействие на изоляцию недопустимо даже в течение одного полупериода, основными мерами защиты являются коммутационные (комбинированные) разрядники и шунтирующие реакторы с искровым подключением. Разрядники в этом случае ограничивают кратковременные перенапряжения переходного режима, а реакторы, уменьшая $U_{уст}$, облегчают условия их работы и обеспечивают надежное гашение дуги.

Наиболее тяжелые условия работы для разрядников создаются при АПВ. Поэтому применение разрядников не исключает применения устройств по разряду линии во время паузы АПВ (например, электромагнитных ТН на линии). Так как наличие реакторов приводит к колебательному процессу во время паузы АПВ, что исключает возможность стекания зарядов через ТН, то при $U_{ном} = 500$ кВ рекомендуется на время бестоковой паузы отключать реакторы, а при 750 кВ и выше — вводить последовательно с ними резистор с сопротивлением порядка 100 Ом.

22. КООРДИНАЦИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

22.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ КООРДИНАЦИИ ИЗОЛЯЦИИ

Как уже указывалось ранее, между принятым уровнем изоляции и уровнем воздействующих на изоляцию напряжений устанавливается соотношение, обеспечивающее надежную работу оборудования в течение всего срока его эксплуатации. Это соответствие должно быть достигнуто наиболее рациональным путем, при минимуме затрат сил и средств. Такое согласование уровней изоляции с воздействующими напряжениями с учетом средств грозозащиты и мероприятий по ограничению внутренних перенапряжений называется **координацией изоляции**.

Вопросы координации изоляции решаются путем технико-экономических расчетов по минимуму приведенных затрат. Идея таких расчетов заключается в следующем: сумма капитальных вложений Z_k , амортизационных и эксплуатационных расходов Z_a , а также ущерба вследствие аварий и нарушения электроснабжения Z_y , приведенная к одному году, должна быть минимальной:

$$\sum Z = Z_k + Z_a + Z_y = \min.$$

Задача эта многофакторная и поэтому чрезвычайно сложная. Например, применительно к ВЛ для оптимального выбора изоляции и средств по ограничению перенапряжений надо учитывать влияние погоды и загрязнений, работу АПВ и разрядников, ущерб при перекрытии и отключении ВЛ, ограничения, связанные с выполнением требований техники безопасности, и т. д. Эти факторы, так же как и воздействующие перенапряжения, статистические по своей природе, т. е. носят характер случайных явлений и процессов. Поэтому в настоящее время вопросы координации внешней изоляции решаются на основе статистически-вероятностных методов. Достоверность таких расчетов и оправданность выводов и рекомендаций тем выше, чем полнее и обширнее исходные статистические данные.

Для внутренней изоляции электрооборудования координация изоляции выполняется по условию надежной ее работы при воздействии рабочих напряжений в течение всего принятого срока эксплуатации (например, 30—40 лет). Внутренние перенапряжения и грозовые импульсы должны быть ограничены при этом с помощью разрядников и других устройств и мероприятий до величин, которые изоляция выдерживает без опасных изменений и повреждений. Техничко-экономические и статистические методы расчета внутренней изоляции не разработаны вследствие трудностей накопления достаточной информации об электрической прочности и старении невосстанавливающейся изоляции реальных аппаратов и машин.

Запасы прочности и надежность работы изоляции крупных агрегатов и устройств, выход из строя которых может привести к тяжелой аварии и материальным затратам, должны быть выше, чем

у менее ответственного и более дешевого оборудования. Это положение тоже должно учитываться при решении вопросов координации изоляции.

22.2. КООРДИНАЦИЯ И УРОВНИ ИЗОЛЯЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Данные аварийной статистики и технико-экономические расчеты показывают, что полностью исключить перекрытия изоляции ВЛ практически невозможно и экономически нецелесообразно. Поэтому координация изоляции ВЛ заключается в таком ее выборе, при котором среднее число перекрытий в год не превышает некоторой величины, определяемой технико-экономическими расчетами по минимуму приведенных затрат.

В загрязняемых районах гирлянды изоляторов могут перекрываться при воздействии рабочих напряжений. Число изоляторов в гирлянде определяется в зависимости от района загрязнения по нормированным величинам удельного пути утечки λ из условий предупреждения перекрытий при рабочем напряжении или, точнее, из условий сведения количества таких перекрытий до допустимого минимума (например, один раз в 10 лет). Методика такого выбора описана в гл. 2.

В слабо загрязненных районах (районах полевого загрязнения) наряду с расчетом по λ выбор числа изоляторов в гирлянде может быть выполнен по условию допустимого числа перекрытий при воздействии коммутационных перенапряжений. Такой расчет должен носить характер технико-экономического анализа с учетом статистических характеристик перенапряжений, коммутационных разрядников (при напряжениях 330 кВ и выше) и атмосферных условий. Примерная оценка может быть сделана по соотношению (2.3).

Разрядные характеристики изоляторов определяются путем стандартных испытаний, нормированы ГОСТом и частично отражены в табл. 5.1 и 5.2.

Воздушные промежутки ВЛ (рис. 22.1) выбираются по условию их равнопрочности с гирляндами при воздействии перенапряжений. В расчетах учитываются отклонение проводов и гирлянд под действием ветра, пляска и раскачивание проводов, влияние атмосферного давления и температуры и т. д. (см. § 2.2). Ясно, что совпадение ряда отягощающих факторов учитывается с некоторой оптимальной вероятностью. Например, при определении $S_1 (S'_1)$ согласно ПУЭ, принимается, что коммутационные перенапряжения (заданной кратности) совпадают не с максимальной скоростью ветра, а с несколько меньшей расчетной $v_p = (0,3—0,4) v_{max}$. Выбор промежутков S_2, S_3 и S_4 производится также с учетом требований безопасности при подъеме человека на опору, при проезде транспорта или при производстве работ под линией. Нормируемые ПУЭ минимальные значения промежутков выбраны на основании расчетов, экспериментов и длительного опыта эксплуатации ВЛ и обе-

спечивают необходимую надежность работы ВЛ и требования техники безопасности.

Координация изоляции ВЛ при воздействии грозовых импульсов заключается в выборе таких мер грозозащиты, которые обеспечивают нормированный уровень грозоупорности и допустимое удельное число грозовых отключений линии в год (см. гл. 13) без дополнительного усиления изоляции, выбранной по рабочим напряжениям или по внутренним перенапряжениям. Исключения состав-

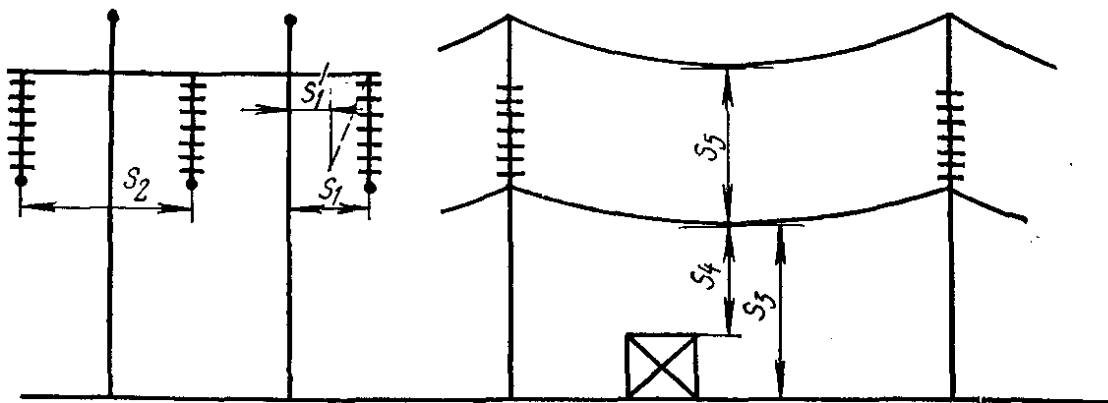


Рис. 22.1. Выбор воздушных промежутков ВЛ.

ляют специальные случаи, например при длинных переходных пролетах, при пересечении ВЛ, на подходе линии к подстанции или станции, когда линейная изоляция может быть усилена (или ослаблена) для ее координации с возможными импульсными воздействиями и мерами грозозащиты.

22.3. УРОВНИ И КООРДИНАЦИЯ ИЗОЛЯЦИИ ПОДСТАНЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Уровень внешней и внутренней изоляции подстанционного оборудования устанавливается с помощью комплекса испытаний повышенным напряжением, нормируемых ГОСТом. Объем и методы таких испытаний описаны в § 5.3.

Принципы координации внешней изоляции подстанций при рабочих напряжениях и коммутационных перенапряжениях те же, что и для ВЛ. Однако требования надежности и техники безопасности для подстанций выше (одно перекрытие в сотни лет), а возможности варьирования с изоляторами (аппараты, трансформаторы) часто меньше. Поэтому для подстанционного оборудования особенно важное значение при координации внешней и внутренней изоляции приобретает ограничение перенапряжений с помощью разрядников и других устройств.

Координация изоляции электрооборудования подстанций при воздействии грозовых импульсов заключается в том, что уровень изоляции подстанционного оборудования должен быть выше остающегося напряжения вентильных разрядников на некоторую величину, учитывающую расположение разрядников, кумулятивный эффект, статистические данные о разбросе разрядных характеристик изоляции и разрядников и т. д.

Для электрооборудования 3—220 кВ расчетная величина испытательного полного грозового импульса $U_{\text{расч}}$ определяется по формуле $U_{\text{расч}} = 1,1U_{\text{ост}} + 15$ кВ, где $U_{\text{ост}}$ — остающееся напряжение на разряднике при максимально допустимом импульсном токе $I_{\text{р max}} = 5$ кА.

При напряжении 330 кВ и выше $U_{\text{расч}} = 1,1U_{\text{ост}}$ для трансформаторов и $U_{\text{расч}} = 1,2U_{\text{ост}}$ для аппаратов ($I_{\text{р max}} = 10$ кА).

Для внешней изоляции с учетом возможного влияния атмосферных условий испытательное напряжение несколько повышается по отношению к расчетному: $U_{\text{исп}} = U_{\text{расч}}/0,84$.

Для внутренней изоляции учитывается кумулятивный эффект, т. е. накопление частичных повреждений при многократных импульсных воздействиях: $U_{\text{исп}} = 1,1U_{\text{расч}}$.

При испытании невозбужденных трансформаторов импульсные испытательные напряжения повышаются на $0,5U_{\text{н}}$.

При срезанных грозовых импульсах испытательные напряжения увеличиваются на 15—25 % по отношению к напряжению полного импульса для внешней изоляции и на 10—20 % для внутренней.

Координация внутренней изоляции оборудования подстанций при коммутационных перенапряжениях заключается в определении одноминутных испытательных напряжений промышленной частоты. В расчетные кратности коммутационных перенапряжений при определении величин одноминутных испытательных напряжений вносят поправки на несоответствие методики и условий испытаний форме и длительности перенапряжений, а также условиям в эксплуатации. Учитываются также возможность кумулятивного эффекта и статистические закономерности воздействующих перенапряжений и электрической прочности изоляции:

$$U_{\text{исп 1 мин}} = \frac{k_{\text{вн}} U_{\text{р max}}}{k_{\text{н}} k_{\text{к}}}, \quad (22.1)$$

где $k_{\text{вн}}$ — расчетная кратность коммутационных перенапряжений; $k_{\text{н}} \approx 1,3—1,35$ — коэффициент импульса для типичных конструкций внутренней изоляции; $k_{\text{к}} \approx 0,85—0,95$ — коэффициент кумулятивности.

Следует заметить, что тщательная координация изоляции по внутренним перенапряжениям особенно важна для оборудования 330 кВ и выше. Значительное несоответствие режима одноминутных испытаний форме и длительности воздействия при коммутационных перенапряжениях привело к введению специальных испытаний коммутационными импульсами для внутренней изоляции электрооборудования 330 и 500 кВ. Величина $U_{\text{исп}}$ при этом определяется по выражению (22.1), но без учета $k_{\text{н}}$.

В связи с совершенствованием средств грозозащиты и ограничением кратности атмосферных и внутренних перенапряжений при напряжениях 220 кВ и выше уровень изоляции может определяться не только перенапряжениями, но и длительно действующими максимальными рабочими напряжениями. Поэтому для такой изоляции предусматриваются испытания и при длительном действии напря-

жения с регистрацией характеристик ЧР. При этом интенсивность ЧР не должна превысить определенный уровень.

Найденные по описанным методам величины испытательных напряжений для внешней и внутренней изоляции нормированы ГОСТ 1516.1—76 и частично приведены в табл. 5.1—5.3.

Допустимые испытательные и рабочие напряженности в изоляции пропорциональны соответствующим напряжениям и определяют размеры изоляционных конструкций. Для большинства видов внутренней изоляции вопрос о конкретном исполнении и размерах изоляции решается с учетом условий и соотношений, изложенных в § 3.7.

Испытательные напряжения и методы заводских и профилактических испытаний кабелей, описанные в § 5.4, обеспечивают согласование уровня их изоляции с уровнем изоляции трансформаторов, машин и аппаратов соответствующих напряжений. Координация импульсной прочности изоляции ВЛ с импульсной прочностью концевой муфты и кабеля при переходе с кабельной линии на воздушную осуществляется обычно с помощью трубчатых или вентильных разрядников.

Координация изоляции высоковольтных электрических машин выражается в выборе таких размеров изоляции, испытательных напряжений и средств защиты от перенапряжений, которые обеспечили бы надежную работу машины в течение принятого срока эксплуатации (20—30 лет). Величины испытательных напряжений и методы испытания машин были рассмотрены в § 5.4. Отметим, что по условиям надежной работы квазистационарные перенапряжения для машин не должны превышать максимального рабочего линейного напряжения, коммутационные перенапряжения ограничиваются до амплитуды $0,9U_{исп}$, а грозовые — до $U_{исп}$ (50 Гц), принятого для профилактических испытаний. Фронт грозового импульса при этом должен быть растянут до 10—20 мкс.

Такое строгое ограничение перенапряжений определяется тем, что коэффициент импульса для изоляции машин близок к единице, а запасы прочности у главной и витковой изоляции машин невелики. Поэтому для машин экономически оправдано применение специальных разрядников с улучшенными характеристиками и сравнительно сложных схем грозозащиты (см. § 14.8).

ЛИТЕРАТУРА

Абрамов В. Д., Хомяков В. М. Эксплуатация изоляторов высокого напряжения.— М.: Энергия, 1976.

Александров Г. Н. Коронный разряд на линиях электропередачи.— М.— Л.: Энергия, 1964.

Артемьев Д. С., Тиходеев Н. Н., Шур С. С. Координация изоляции линий электропередач.— М.: Энергия, 1966.

ГОСТ 1516—76. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 3 до 500 кВ. Требования и методы испытаний электрической прочности изоляции.— М.: Изд-во стандартов, 1977.

Дмоховская Л. Ф. Инженерные расчеты внутренних перенапряжений в электропередачах.— М.: Энергия, 1972.

Кучинский Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях.— Л.: Энергия, 1979.

Левитов В. И. Корона переменного тока.— М.: Энергия, 1975.

Половой И. Ф., Михайлов Ю. А., Халилов Ф. Х. Перенапряжения на электрооборудовании высокого и сверхвысокого напряжения.— Л.: Энергия, 1975.

Полтев А. И. Конструкция и расчет элегазовых аппаратов.— М.: Энергия, 1979.

Правила устройства электроустановок (ПУЭ—76).— М.: Атомиздат, 1978.

Разевиг Д. В., Соколова М. В. Расчет начальных и разрядных напряжений газовых промежутков.— М.: Энергия, 1977.

Сиротинский Л. И. Техника высоких напряжений.— М.— Л.: ГЭИ, 1959.— Ч. 3, вып. 1.

Техника высоких напряжений /Г. Н. Александров, В. Л. Иванов, К. П. Кадомская и др.; Под ред. М. В. Костенко.— М.: Высшая школа, 1973.

Техника высоких напряжений /Л. Ф. Дмоховская, В. П. Ларнонов, Ю. С. Пинталь и др.; Под ред. Д. В. Разевига.— М.: Энергия, 1976.

Техника высоких напряжений /А. В. Алмазов, А. А. Акопян, П. В. Борисоглебский и др.; Под ред. Л. И. Сиротинского.— М.— Л.: ГЭИ, 1951.— Ч. 1, 2.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
1. ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ	
1. Электрические разряды в газах	10
1.1. Общая характеристика электрического разряда в газах	10
1.2. Физические процессы в ионизированных газах	12
1.3. Разряды в газовых воздушных промежутках при длительно действующих напряжениях	22
1.4. Разряды в воздушных промежутках при импульсных напряжениях	44
1.5. Коронный разряд на проводах линий электропередачи	52
1.6. Разряд в воздухе вдоль поверхности твердой изоляции	66
2. Внешняя изоляция воздушных линий и распределительных устройств	
2.1. Изоляторы высокого напряжения	73
2.2. Изоляция воздушных линий	85
2.3. Внешняя изоляция распределительных устройств	91
3. Разряды в жидких и твердых диэлектриках и электрические характеристики внутренней изоляции	93
3.1. Общая характеристика внутренней изоляции электроустановок	93
3.2. Разряды в изолирующих жидкостях	96
3.3. Твердые диэлектрики	103
3.4. Маслосольная изоляция	115
3.5. Бумажно-масляная изоляция	120
3.6. Газовая изоляция	126
3.7. Старение внутренней изоляции и выбор допустимых величин рабочих и испытательных напряжений	133
4. Изоляционные конструкции высоковольтного оборудования	
4.1. Общая характеристика изоляционных конструкций	139
4.2. Проходные изоляторы 35 кВ и выше (вводы)	139
4.3. Изоляция силовых высоковольтных трансформаторов	143
4.4. Изоляция силовых кабелей высокого напряжения	147
4.5. Изоляция высоковольтных конденсаторов	156
4.6. Изоляция электрических машин высокого напряжения	161
5. Заводские и профилактические испытания изоляции	
5.1. Общая характеристика испытаний	165
5.2. Физические основы и методы неразрушающих испытаний	167
5.3. Испытания изоляции повышенным напряжением	178
5.4. Особенности испытаний отдельных видов электрооборудования	181

6. Испытательные установки высокого напряжения

6.1. Общие сведения	189
6.2. Испытательные установки переменного тока	189
6.3. Испытательные установки постоянного тока	193
6.4. Генераторы импульсных напряжений	196
6.5. Генераторы коммутационных перенапряжений	199
6.6. Генераторы импульсных токов	201

7. Измерения при высоких напряжениях

7.1. Электростатические вольтметры	203
7.2. Шаровые разрядники	205
7.3. Электронные осциллографы	209
7.4. Делители напряжений	211
7.5. Измерение импульсных токов	215
7.6. Бесконтактные методы измерений	217

II. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ И ЗАЩИТА ОТ НИХ

8. Волновые процессы в линиях электропередачи и обмотках машин

8.1. Распространение волн в линиях без потерь	219
8.2. Преломление и отражение волн. Правило Петерсена	220
8.3. Прохождение волн мимо емкости или через индуктивность	222
8.4. Падение волн на колебательный контур	225
8.5. Многократные отражения	227
8.6. Затухание и искажение волн	229
8.7. Распространение волн в многопроводных системах	232
8.8. Волновые процессы в обмотках трансформаторов и электрических машин	236

9. Молния как источник грозовых перенапряжений

9.1. Развитие разряда молнии	247
9.2. Электрические характеристики молнии. Интенсивность грозовой деятельности	249
9.3. Перенапряжения прямого удара молнии	251
9.4. Индуктированные перенапряжения	252
9.5. Тепловые и механические воздействия токов молнии	254

10. Защита от прямых ударов молнии

10.1. Общие сведения	254
10.2. Зоны защиты стержневых молниеотводов	255
10.3. Зоны защиты тросовых молниеотводов	258
10.4. Конструктивное выполнение молниеотводов	259

11. Заземления в установках высокого напряжения

11.1. Общие сведения	260
11.2. Сопротивление растекания заземлителя	260
11.3. Защитное заземление в электроустановках	264
11.4. Защитное заземление в электроустановках	264
11.5. Особенности работы заземлителей при стекании токов молнии	266
11.6. Грозозащитные заземления электроустановок	268
11.7. Измерение сопротивления заземлений и удельного сопротивления грунта	269

12. Защитные разрядники

12.1. Общие сведения	270
12.2. Трубочатые разрядники	271
12.3. Вентильные разрядники	274
12.4. Защитные искровые промежутки	285

13. Грозозащита линий электропередачи	
13.1. Общая характеристика атмосферных перенапряжений на линиях передачи	286
13.2. Прямой удар молнии в линию без тросов	288
13.3. Прямой удар молнии в линию с тросами	290
13.4. Рекомендуемые способы грозозащиты линий различного напряжения	295
14. Грозозащита оборудования подстанций и вращающихся машин	
14.1. Показатель грозоупорности подстанций	297
14.2. Защита от прямых ударов молнии и заземление молниеотводов	298
14.3. Защитное действие вентильного разрядника	300
14.4. Влияние расстояния между разрядниками и защищаемой изоляцией на защитное действие РВ	302
14.5. Допустимые напряжения на изоляции	304
14.6. Выбор длины защищенного подхода	306
14.7. Защита изоляции подстанции от набегающих волн	307
14.8. Защита вращающихся машин от набегающих волн	310
15. Общая характеристика перенапряжений в электрических системах	
15.1. Основные виды внутренних перенапряжений и их кратности	312
15.2. Схемы замещения для расчета перенапряжений и их параметры	314
15.3. Влияние способа заземления нейтрали на величину перенапряжений	317
15.4. Вероятностный характер внутренних перенапряжений	318
16. Повышения напряжения, обусловленные емкостным эффектом	
16.1. Основные уравнения для длинных воздушных линий	319
16.2. Напряжения на конце длинной ненагруженной линии	320
16.3. Влияние короны на перенапряжения	322
16.4. Влияние компенсирующих устройств на перенапряжения	323
16.5. Особенности емкостного эффекта в линии с двусторонним питанием. Полуволновой резонанс	327
16.6. Перенапряжения в длинных линиях при одностороннем питании и несимметричных к. з.	327
17. Феррорезонансные перенапряжения	
17.1. Резонансные явления в цепях с нелинейными индуктивностями	328
17.2. Феррорезонансные перенапряжения на основной гармонике при изолированной нейтрали приемного трансформатора	331
17.3. Влияние насыщения стали трансформаторов на перенапряжения в установившемся симметричном режиме системы с заземленной нейтралью	333
17.4. Феррорезонансные перенапряжения на основной гармонике при неполнофазных режимах в системах с заземленной нейтралью	335
17.5. Резонансные перенапряжения на высших и низших гармониках. Параметрический резонанс	336
18. Коммутационные перенапряжения при включениях	
18.1. Перенапряжения при включении колебательного контура	337
18.2. Статистические характеристики ударных коэффициентов	340
18.3. Перенапряжения при автоматическом повторном включении	342
19. Коммутационные перенапряжения при отключениях	
19.1. Перенапряжения при отключении ненагруженных линий	343

19.2. Перенапряжения при отключении реакторов и ненагруженных трансформаторов	345
19.3. Перенапряжения при отключении коротких замыканий и асинхронного хода	346
20. Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю	
20.1. Повышение напряжений на фазах при замыканиях на землю . . .	347
20.2. Меры снижения перенапряжений при замыканиях на землю . . .	350
21. Ограничение внутренних перенапряжений	
21.1. Схемные мероприятия по ограничению перенапряжений	353
21.2. Средства и способы защиты от перенапряжений переходного режима	355
22. Координация изоляции электрических систем	
22.1. Общие принципы координации изоляции	358
22.2. Координация и уровни изоляции воздушных линий электропередачи	359
22.3. Уровни и координация изоляции подстанционного оборудования	360
Литература	363