МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Институт *Высокоточных систем им. В.П. Грязева*
Кафедра «*Электроэнергетика*»

Утверждено на заседании кафедры
«*Электроэнергетика*»
«_ *23* _» *января* 20*19*г., протокол № _*1*_

Заведующий кафедрой

_____*В.М. Степанов*

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ
по дисциплине (модулю)
«*Техника высоких напряжений***»**

основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы магистратуры

по направлению подготовки
13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

с направленностью (профилем)
Устройства автоматического управления и релейной защиты в электроэнергетике

Форма(ы) обучения: *очная, заочная*

Идентификационный номер образовательной программы: 130402-05-19

Тула 2019 год

Разработчик конспекта лекций

Косырихин В.С. доцент, к.т.н.

(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание) *(подпись*

СОДЕРЖАНИЕ КУРСА

Часть 1. ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Основные виды электрической изоляции воздушных линий и распределительных устройств. Изоляция внешняя и внутренняя. Напряжения, воздействующие на изоляцию: длительные рабочие напряжения, грозовые и внутренние перенапряжения.

Коэффициент однородности электрического поля. Классификация изоляционных промежутков в зависимости от значения коэффициента неоднородности. Диэлектрические потери и угол потерь. Понятие об электрической прочности изоляции и пробивном напряжении.

Атмосферный воздух как диэлектрик. Электрическая прочность воздуха. Вольтамперная характеристика газового промежутка. Пробой воздушного промежутка с однородным полем. Закон Пашена.

Особенности пробоя газового промежутка с резконеоднородным полем. Понятие о перекрытии изоляции. Статистический характер разрядных напряжений. Испытания внешней изоляции. Стандартный грозовой импульс. Вольт-секундные характеристики изоляции электрооборудования.

Изоляторы. Общие представления и основные характеристики изоляторов. Конструкции и маркировка изоляторов.

Распределение напряжения вдоль гирлянды изоляторов. Развитие разряда в гирлянде по поверхности сухих изоляторов, под дождем и при увлажненном загрязнении. Понятие о длине пути утечки изолятора, а также об эффективной длине пути утечки.

Выбор изоляции ВЛ. Эксплуатационный контроль изоляции (методы контроля).

Коронный разряд на проводах ВЛ постоянного и переменного тока. Разновидности короны.

Выбор конструкции фазы ВЛ. Потери энергии на местную корону. Экологическое влияние ВЛ: радиопомехи, акустический шум.

Внутренняя изоляции. Общие представления и свойства. Комбинирование диэлектрических материалов во внутренней изоляции.

Основные виды внутренней изоляции (с примерами применения).

Пробой жидких диэлектриков. Пробой твердых диэлектриков (разновидности). Зависимость электрической прочности внутренней изоляции от длительности воздействия напряжения.

Старение внутренней изоляции (механизмы старения). Электрическое старение изоляции вследствие частичных разрядов.

Регулирование электрического поля: градирование изоляции, применение конденсаторных обкладок, применение полупроводниковых покрытий.

Герметизированные распределительные устройства с элегазовой изоляцией. Преимущества элегазовых ГРУ.

Изоляция кабельных линий электропередач.

Профилактические испытания внутренней изоляции (методы испытаний).

Часть 2. ВОЗДЕЙСТВИЕ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ИЗОЛЯЦИЮ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ОТКРЫТЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Молния. Развитие грозового разряда. Электрические характеристики молнии. Характеристики грозовой деятельности.

Защита от прямых ударов молнии. Молниеотводы стержневые и тросовые. Зоны защиты стержневых и тросовых молниеотводов. Заземление молниеотводов. Особенности работы заземлителей при отводе токов молнии. Понятие об импульсном сопротивлении заземления.

Грозозащита воздушных ЛЭП: случаи поражения ВЛ, мероприятия по повышению надежности грозозащиты ВЛ. Особенности грозозащиты ВЛ различного напряжения. Допустимое число отключений в год.

Защитные аппараты и устройства: защитные (искровые) промежутки, трубчатые разрядники, вентильные разрядники, нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН), их принцип действия, устройство и характеристики.

Деформация импульсов перенапряжений, набегающих на подстанцию. Защита подстанций от набегающих импульсов грозовых перенапряжений. Защищенный подход, его назначение и схема. Показатели, характеризующие эффективность защиты изоляции электрооборудования подстанции.

Часть 3. ВОЗДЕЙСТВИЕ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ИЗОЛЯЦИЮ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Общая характеристика и классификация внутренних перенапряжений. Перенапряжения установившегося режима: повышение напряжения в конце разомкнутой линии за счет емкостного эффекта линии; установившиеся перенапряжения при коротких замыканиях; феррорезонансные перенапряжения.

Коммутационные перенапряжения: при отключении малых индуктивных токов (ненагруженного трансформатора); при включении разомкнутой линии; при отключении ненагруженных линий; при отключении больших токов; при автоматическом повторном включении (АПВ); при перемежающихся замыканиях на землю.

Ограничение внутренних перенапряжений (принципы защиты). Использование выключателей с шунтирующими сопротивлениями. Допустимые значения коммутационных перенапряжений.

Глава 1. ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Основные виды электрической изоляции ВЛ и РУ. Изоляция внешняя и внутренняя

Надежность работы электроэнергетической системы и сетей определяется надежностью ее составляющих (ЛЭП, и всего комплекса электрооборудования: генераторов, трансформаторов, коммутационной аппаратуры, компенсирующих устройств и т. д.). В значительной степени решение этой задачи обеспечивается надежной работой изоляции электрических систем и оборудования при всех постоянно воздействующих на нее или кратковременно возникающих напряжениях.

Изоляция электроустановок разделяется ***на внешнюю и внутреннюю***.

К ***внешней изоляции*** относятся воздушные промежутки (например, между проводами разных фаз ЛЭП), внешние поверхности твердой изоляции (изоляторов), а также промежутки воздуха между контактами разъединителя и т. д. Основной особенностью внешней (воздушной) изоляции является зависимость ее электрической прочности от атмосферных условий: давления, температуры и влажности воздуха. На электрическую прочность изоляторов наружной установки существенно влияют также загрязнения их поверхности и атмосферные осадки.

К внутренней изоляции относится изоляция обмоток трансформаторов и ЭМ, изоляция кабелей, герметизированная изоляция вводов и т. д. Внутренняя изоляция представляет собой комбинацию твердого и жидкого диэлектриков (например, в трансформаторах) или твердого и газообразного диэлектриков(например, в герметизированных РУ с элегазовой изоляцией).

Электрическая прочность внутренней изоляции электрооборудования практически не подвержена влиянию атмосферных условий. Ее особенностью является ***старение***, т. е. ухудшение электрических характеристик в процессе эксплуатации.

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

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

Требования, предъявляемые к изоляции в электрооборудовании (ЭО):

1) требуемый ресурс (срок службы) при рабочем напряжении;

2) достаточная электрическая прочность при воздействии внутренних и грозовых (если это требуется) перенапряжений;

3) достаточная механическая прочность при всех возможных рабочих и аварийных нагрузках;

4) требуемая надежность;

5) минимальная стоимость;

6) в ряде случаев — минимальные размеры и масса;

7) технологичность изготовления изоляции и всего оборудования в целом;

8) простота ремонта;

10)безопасность обслуживания;

11)экологическая безопасность.

Напряжения, воздействующие на изоляцию

На ЭО, работающее в электрических сетях (ЭС), воздействуют: рабочее напряжение, внутренние и грозовые перенапряжения.

Длительные рабочие напряжения.

Электрооборудование подразделяется на ***классы напряжения***. Класс напряжения совпадает с номинальном линейным напряжением ЭС, для работы в которой предназначено электрооборудование.

Для каждого класса напряжения стандартами установлено наибольшее рабочее линейное напряжение $U_{раб.наиб}$ частоты 50 Гц, неограниченно длительное приложение которого допустимо по условиям нормальной работы электрооборудования и его изоляции.

По ГОСТ 1516.1 — 76 $U_{раб.наиб} = k_p U_{ном}$,

где k_p равно:

Класс напряжения, кВ	3-20	35-220	330	500-1150
k_p	1,2	1,15	1,1	1,05

Перенапряжения.

В процессе эксплуатации ЭО подвергается повышениям напряжения сверх рабочего – внутренним или грозовым перенапряжениям.

Перенапряжения характеризуются:

1) максимальным значением $U_{\max}$ или кратностью k_n по отношению к амплитуде наибольшего рабочего фазного напряжения $U_{раб.ф.наиб.}$:

$$k_n = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2} \cdot U_{раб.ф.наиб.}};$$

2) длительностью воздействия;

3) формой кривой напряжения;

4) частотой воздействия;

5) шириной охвата сети, под которой понимается количество изоляционных конструкций, на которые одновременно воздействует данный вид перенапряжения.

Внутренние перенапряжения.

Различают след. виды внутренних перенапряжений: режимные (квазистационарные) и коммутационные.

К режимным перенапряжениям относятся перенапряжения на разомкнутом конце односторонне включенной "холостой" линии, резонансные перенапряжения на основной частоте и высших гармонических, феррорезонанс, параметрический резонанас. Режимные перенапряжения характеризуются невысокой кратностью ($k_n \le 1{,}5-2{,}0$) и относительно большой длительностью – от долей секунд до десятков минут.

Коммутационные перенапряжения обусловлены включением или отключением линий или элементов оборудования, замыканиями на землю или между фазами, отключениями коротких замыканий. Эти перенапряжения характеризуются большей кратностью (k_n доходит до значений 3-4,5 и более) и меньшей длительностью — чаще всего один или несколько полупериодов промышленной частоты.

Как максимальные значения, так и длительность перенапряжений зависят от ряда случайных факторов: вида коммутации, характеристик коммутирующего аппарата (наличия повторных зажиганий дуги, скорости гашения дуги и др.), фазы начала процесса, мощности подстанции и др. Большинство из перечисленных выше факторов зависят от ряда обстоятельств, в том числе случайных, и подвержено статистическому разбросу. Это приводит к тому, что характеристики перенапряжений (максимальное значение и длительность) также подчиняются статистическим закономерностям.

Грозовые перенапряжения.

Воздушные сети вследствие большой протяженности часто поражаются молнией. При этом на изоляции линий возникают весьма высокие напряжения, которые изоляция выдержать не может. Происходит пробой воздуха вдоль гирлянды изоляторов, переходящий в поддерживаемый источником рабочего напряжения дуговой разряд. Помимо нарушения изоляции воздушных линий удары молнии приводят к появлению на проводах импульсов высокого напряжения, которые, распространяясь по проводам, достигают подстанций и воздействуют на установленное там электрооборудование.

Значения грозовых перенапряжений зависят от интенсивности ударов молнии и характеристик пораженных объектов и поэтому также являются статистической величиной.

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

Взаимное согласование значений воздействующих напряжений, характеристик защитной аппаратуры и электрических характеристик изоляции, обеспечивающее надежную работу и высокую экономичность электрической установки, называется ***координацией изоляции***.

Коэффициент однородности электрического поля

Количественной характеристикой степени однородности поля является ***коэффициент неоднородности***

$$k_н = \frac{E_{\max}}{E_{ср}},$$

представляющий собой отношение максимального значения напряженности электрического поля в изоляционном промежутке к среднему значению напряженности электрического поля.

По степени однородности электрического поля, зависящей от формы электродов, различают два вида изоляционных промежутков:

1) изоляционные промежутки с однородным и слабонеоднородным электрическим полем (СНП) которых ($k_н < 2$). Это промежутки с электродами типа плоскость – плоскость с закругленными краями или типа шар – шар, если радиусы шаров много больше расстояния между их поверхностями.;

2) изоляционные промежутки с резконеоднородным электрическим полем (РНП) ($k_н > 3..4$). Например, это промежутки с электродами стержень – плоскость.

Виды токов в изоляции

Изоляция электроустановки служит для предотвращения протекания электрического тока между изолируемыми частями. В нормальном состоянии через изоляцию могут протекать три вида токов:

1) ***емкостные токи*** при переменном напряжении, которые зависят от емкости изоляции и могут быть большими по величине;

2) ***абсорбционные токи*** (токи различных видов замедленной поляризации), сказывающиеся при постоянном и при переменном напряжениях;

3) ***сквозные токи***, чрезвычайно малые по величине, которые протекают при постоянном напряжении через длительное время после его включения.

Заряженные частицы, входящие в состав молекул и кристаллических решеток диэлектрика, достаточно прочно связаны в веществе и при условиях, близких к нормальным, не могут перемещаться на заметные расстояния. Сквозные токи обусловлены небольшим количеством свободных заряженных частиц, образуемых за счет внешних ионизаторов, и эти свободные заряженные частицы способны перемещаться через изоляцию от одного электрода к другому.

Диэлектрические потери и угол потерь

Любая изоляция нагревается при приложении к ней напряжения. Причиной нагрева являются сквозные токи через изоляцию, нагрев за счет замед-

ленных видов поляризации, ионизация газовых включений в твердой изоляции и неоднородность структуры изоляции.

Диэлектрическими потерями называют мощность нагрева изоляции за счет приложенного к ней напряжения. Диэлектрические потери при переменном напряжении обычно существенно больше, чем при постоянном напряжении той же величины, что и действующее значение переменного напряжения, и основную роль в нагреве на переменном напряжении до начала ионизации чаще всего играют поляризационные потери.

Углом диэлектрических потерь называют угол, дополняющий до 90^o угол сдвига фазы между напряжением на изоляции и током через изоляцию. tg δ показывает соотношение между активной мощностью нагрева изоляции и реактивной емкостной мощностью в изоляции. Понятие угла диэлектрических потерь применимо только для синусоидальных напряжений и токов.

Для определенности понятия емкости реальных конденсаторов или изоляции используют ***схемы замещения***. Чаще всего используют две простейшие схемы замещения, составленные емкостным элементом и резистивным элементом: последовательную и параллельную. Величина емкости не зависит от выбора схемы замещения только при малых диэлектрических потерях.

Общие сведения о пробое диэлектриков

При повышении напряжения на электродах, между которыми находится диэлектрик, может пройти ***пробой*** – потеря диэлектриком его электроизоляционных свойств с образованием канала высокой проводимости между электродами, приводящего к короткому замыканию электродов. В месте пробоя возникает искра или при большой мощности источника напряжения – электрическая дуга.

Минимальное напряжение, приложенное к диэлектрику и приводящее к его пробою, называют ***пробивным напряжением*** $U_{пр}$. Оно обычно измеряется в киловольтах (кВ).

Продолжительное воздействие электрического поля высокой напряженности приводит к необратимым процессам в диэлектрике, в результате которых пробивное напряжение снижается, т.е. происходит ***электрическое старение*** изоляции. Вследствие старения изоляции срок службы изоляции ограничен.

Пробивное напряжение $U_{пр}$ растет с увеличением толщины диэлектрика. Для характеристики способности материала противостоять разрушающему действию электрического поля вводят понятие напряженности электрического поля, при которой происходит пробой. Напряженность электрического поля, при которой происходит пробой диэлектрика, ***называется электрической прочностью*** $E_{пр}$. Она определяется, как отношение пробивного напряжения $U_{пр}$ к толщине диэлектрика d и измеряется в кВ/м

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{d}.$$

Электрическая прочность $E_{пр}$ является одним из важнейших параметров электроизоляционного материала. На ее значение влияют степень однородности поля, связанная с формой электродов, время нахождения диэлектрика под напряжением, вид напряжения, его частота, температура и влажность диэлектрика.

Пробой в диэлектрике может быть вызван электрическими, тепловыми или физико-химическими процессами, происходящими в нем. Атомы и молекулы диэлектрика характеризуются очень сильной связью между собой заряженных частиц, так что в обычном состоянии все заряженные частицы связаны, взаимно компенсируют друг друга и перемещения заряженных частиц на расстояния, сопоставимые с расстоянием между электродами, не происходит. При пробое происходит освобождение заряженных частиц, которые направленно перемещаются под действием сил электрического поля, создавая электрический ток.

Наиболее изученным является пробой газовых промежутков; механизмы пробоя жидких и твердых диэлектриков отличаются большим разнообразием и значительно более сложны. В то же время именно газовая изоляция (воздух) является основным видом изоляции в электроустановках и изучение поведения ее в электрических полях большой напряженности имеет первостепенное значение. Далее будут подробнее рассмотрены процессы пробоя в разных видах диэлектриков.

Атмосферный воздух как диэлектрик. Электрическая прочность воздуха

Основным диэлектрическим «материалом» для создания внешней изоляции электроустановок служит атмосферный воздух. Изолируемые электроды (шины распределительных устройств, провода линий электропередачи, наружные токоведущие части электрических аппаратов) располагаются на определенных расстояниях друг от друга и от земли (или заземленных частей установок) и укрепляются в заданном положении с помощью изоляторов. Изоляционные расстояния по воздуху зависят от значений напряжения, воздействию которого подвергается установка, и от электрической прочности воздуха.

При нормальных атмосферных условиях электрическая прочность воздушных промежутков относительно невелика и в однородном поле при межэлектродных расстояниях более 1 см имеет значение, не превышающее 30 кВ/см. В большинстве изоляционных конструкций при приложении высокого напряжения создается резконеоднородное электрическое поле. Электрическая прочность воздуха в таких полях еще меньше и при расстояниях между электродами порядка 1—2 м составляет приблизительно 5 кВ/см, а при расстояниях 10—20 м снижается соответственно до 2,5—1,5 кВ/см. В связи с

этим габариты воздушных линий электропередачи и распределительных устройств в значительной мере определяются электрической прочностью воздуха и при увеличении номинального напряжения очень быстро возрастают.

На разрядные напряжения воздушных промежутков оказывают влияние давление, температура и абсолютная влажность воздуха, поэтому изоляционные расстояния по воздуху выбираются таким образом, чтобы они имели достаточную электрическую прочность при неблагоприятных атмосферных условиях.

Вольтамперная характеристика газового промежутка

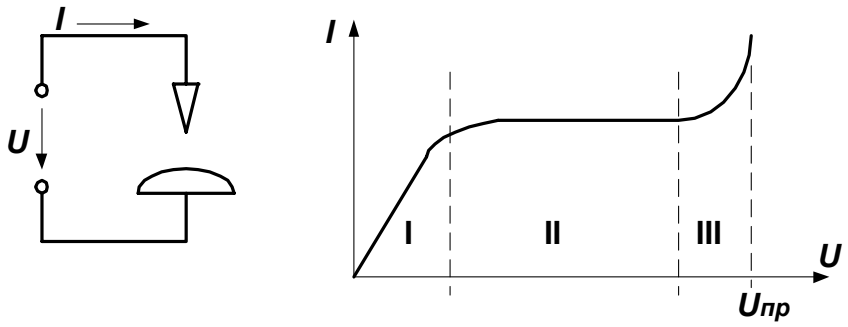


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика газового промежутка

В газовых изоляционных промежутках при небольших напряжениях выполняется закон Ома (рис. 1, область I); при повышении напряжения наступает насыщение, при котором все генерируемые внешними ионизаторами заряженные частицы достигают электродов и роста тока при росте напряжения не происходит (область II), плотность тока при этом составляет примерно 10^{-15} А/м^2 при напряженности поля около 0,6 В/м. Только при больших напряжениях, когда возникает ионизация за счет большой напряженности электрического поля, начинается резкий рост электрического тока (область III), приводящий к независимости разряда от внешних ионизаторов, то есть к его самостоятельности.

Пробой воздушного промежутка с однородным полем

Развитие разряда происходит за время значительно меньшее, чем полупериод переменного напряжения частотой 50 Гц, поэтому разрядные напряжения воздушных промежутков при постоянном и переменном напряжениях практически одинаковы.

Пробой воздуха, как и других газов, следует рассматривать как следствие развития процессов ударной и фотонной ионизации. В газах всегда содержится небольшое количество положительных ионов и электронов, которые, как и нейтральные молекулы газа, находятся в хаотическом тепловом движении.

Под действием электрического поля заряженные частицы, начинают

двигаться в направлении сил поля, получая при этом некоторую добавочную скорость. При этом заряженная частица между двумя соударениями, при условии достаточной однородности поля, приобретают дополнительную энергию

$$\Delta W = E \cdot q \cdot l_{cp},$$

где E – напряженность электрического поля;

q – заряд;

l_{cp} – среднее расстояние, пройденное заряженной частицей без столкновения, т.е. длина свободного пробега.

При столкновении нейтральной молекулы с заряженной частицей добавочная энергия передается молекуле. Если эта энергия достаточно велика, то происходит либо ***ударная ионизация*** молекулы, т. е. расщепление молекулы на электрон и положительно заряженный ион, либо возбуждение молекулы, связанное с переходом внешнего электрона на более удаленную орбиту. В последующий момент, возбужденный электрон возвращается на исходную орбиту, а избыточная энергия выделяется в виде фотона. Фотон, поглощенный другой молекулой может ее ионизировать. Это явление носит название внутренней ***фотонной ионизации***.

Ударная ионизация начинается при определенном значении напряженности электрического поля, поскольку при заданном давлении газа и заданной температуре значения q и l_{cp} постоянны для каждого газа. Эту напряженность называют начальной напряженностью, а соответствующее электрическое напряжение – ***начальным напряжением*** пробоя.

Ионизация, в основном, осуществляется электронами, т. к. длина свободного пробега у них на порядок выше, чем у ионов. Кроме того, из-за меньших размеров и массы, электроны имеют большую подвижность и, соответственно, набирают при движении под действием сил поля большую энергию.

На развитие разряда в газах, также, оказывает воздействие явление вторичной эмиссии электронов с катода, заключающееся в том, что положительные ионы освобождают электроны из металла, бомбардируя поверхность катода.

Ударная ионизация составляет основу пробоя в газах. Освобожденные, вследствие ударной ионизации и вторичной эмиссии, электроны под действием электрического поля вызывают ионизацию молекул газа. В результате этого процесса число электронов в газовом промежутке растет, увеличиваясь при этом лавинообразно (рис. 2).

В последующий момент времени эти молекулы испускают фотоны. Фотоны, обгоняют лавину и, поглощенные какими-либо молекулами впереди лавины, могут при этом их ионизировать. Пути фотонов показаны волнистыми линиями. Электроны, появляющиеся впереди первоначальной лавины на участке А-В, могут стать основой для возникновения других электронных лавин и т. д.

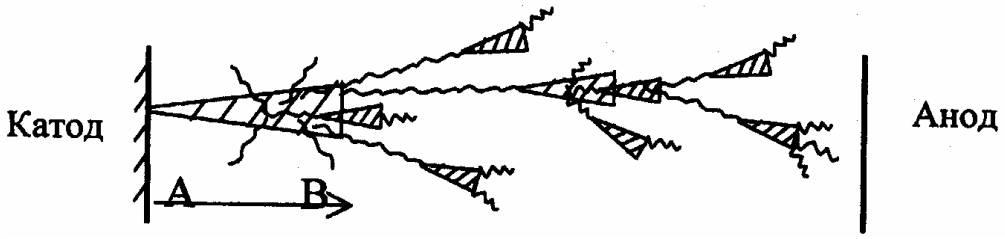


Рис. 2. Образование стримера

Отдельные лавины, нагоняя друг друга, сливаются между собой, образуя сплошной канал ионизированного газа, носящий название ***стримера,*** по которому и происходит пробой. Поскольку скорость излучения очень велика, фотонная ионизация приводит к быстрому развитию стримера – быстрее, чем продвижение первоначальной электронной лавины на участке А-В.

Наряду с электронами, которые движутся к аноду, к катоду направляются положительно заряженные ионы, также участвующие в создании стримера.

Закон Пашена

Пробивное напряжение газового промежутка с однородным (ОП) и слабонеоднородным (СНП) электрическим полем зависит как от расстояния между электродами, так и от давления и температуры газа. Эта зависимость определяется ***законом Пашена***, согласно которому пробивное напряжение газового промежутка с ОП и СНП при заданной температуре определяется произведением относительной плотности газа δ на расстояние между электродами S, $U_{пр}=f(\delta S)$.

Относительной плотностью газа называют отношение плотности газа в данных условиях к плотности газа при нормальных условиях (20^{o} С, 760 мм рт. ст.).

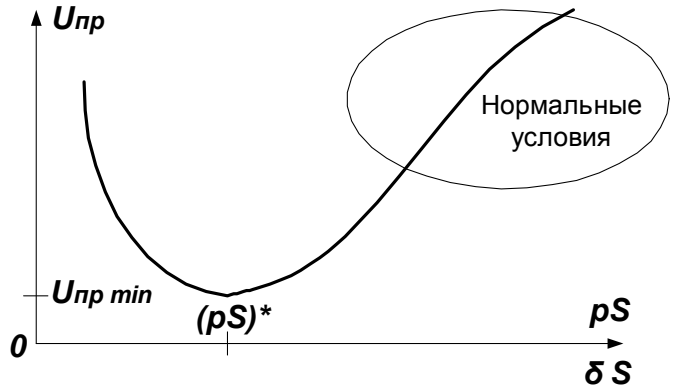


Рис. 3. Вид зависимости закона Пашена

Первоначально закон был сформулирован для зависимости пробивного напряжения от расстояния между электродами и давления газа, но при постоянстве температуры обе зависимости аналогичны. Характер зависимости показан на рис. 3.

Значение *(pS)** для нормальной температуры равно 0,57 см·мм рт. ст., так что нормальные давления соответствуют области, отображенной овалом на рис. 3. В этой области зависимость $U_{пр}=f(\delta S)$ хорошо аппроксимируется выражением $U_{пр} = a\delta S + b\sqrt{\delta S}$, a и b – константы.

Особенности пробоя газового промежутка с резконеоднородным полем

Рассмотрим промежуток типа стержень – плоскость (С-П).

При сравнительно небольшой средней напряженности поля напряженность у острия настолько велика, что там может происходить ударная ионизация с развитием электронных лавин и образованием проводящих каналов – стримеров. Обладающие большой подвижностью ***отрицательные свободные электроны*** ответственны за образование новых заряженных частиц, а остающиеся после ионизации малоподвижные положительные ионы меняют распределение электрического поля в промежутке.

Поскольку ***ионизация начинается всегда у острия***, то при его положительной полярности ***положительный объемный заряд*** (ПОЗ) экранирует острие и затрудняет развитие ионизационных процессов вблизи острия, облегчая в то же время развитие разряда в оставшемся промежутке между ПОЗ и отрицательной плоскостью. При отрицательном острие ПОЗ вблизи него резко интенсифицирует ионизацию вблизи острия, затрудняя развитие разряда в промежутке ПОЗ – положительная плоскость.

Перечисленные факторы определяют основные отличия закономерностей пробоя промежутка С-П от промежутка с однородным и слабонеоднородным электрическим полем, которые сводятся к следующему:

1) ***электрическая прочность*** промежутка С-П существенно меньше электрической прочности промежутка с однородным и слабонеоднородным электрическим полем; так, при нормальных условиях электрическая прочность воздуха при расстояниях между электродами порядка десятков сантиметров составляет примерно 30 кВ/см для однородного поля и снижается до единиц киловольт на сантиметр для промежутка С-П;

2) при сравнительно небольших напряженностях электрического поля в промежутке С-П наблюдается ***явление короны***, то есть самостоятельного электрического разряда вблизи стержня, сопровождающегося свечением и потрескиванием, при котором только часть промежутка становится проводящей, а промежуток в целом сохраняет изоляционные свойства;

3) ***напряжение начала короны зависит от полярности стержня***; при отрицательном стержне корона начинается при существенно меньшем напряжении, чем при положительном острие;

4) ***эффект полярности наблюдается и при пробое*** промежутка С-П: при положительном стержне напряжение пробоя в 2 – 2,5 раза меньше, чем при отрицательном стержне.

Перекрытие изоляции

Перекрытием называют разряд по границе раздела двух сред, чаще всего это граница твердый диэлектрик – газ. Напряжение перекрытия $U_{пер}$ всегда существенно меньше пробивного напряжения $U_{пр}$ чисто газового промежутка с теми же электродами. ***Основными причинами*** этого эффекта считают влияние газовых включений между металлом электрода и твердым диэлектриком, влияние микрокапель влаги и накопление объемных зарядов на боковой поверхности изолятора. Для увеличения $U_{пер}$ применяют ребристые конструкции изоляторов, что будет рассмотрено позже.

Статистика разрядных напряжений

На разрядное напряжение внешней изоляции — воздушных промежутков и изоляторов — при постоянных метеорологических условиях оказывают влияние случайные факторы, связанные с возникновением и развитием разряда. К ним относятся, например, возникающие в одних и тех же условиях различные траектории разряда. Поэтому разрядное напряжение является ***случайной величиной***, подчиняющейся статистическим закономерностям.

Эксперименты показывают, что разбросы значений разрядного напряжения внешней изоляции соответствуют нормальному закону распределения (распределению Гаусса).

Испытания внешней изоляции. Стандартный грозовой импульс. Вольт-секундные характеристики

К внешней изоляции применяются следующие виды испытаний.

1. Испытания переменным напряжением частотой 50 Гц дают возможность судить о надежности изоляции при воздействии внутренних перенапряжений. Испытания изоляторов проводятся как в сухих условиях, так и под дождем (для наружной изоляции). Испытания переменным напряжением загрязненной и увлажненной изоляции показывают ее работоспособность при рабочем напряжении.

2. *Испытания коммутационными импульсами напряжения* проводятся при положительной и отрицательной полярностях импульсов. Форма апериодического импульса: время подъема напряжения до максимума 250±50 мкс, длительность импульса от начала до момента, когда напряжение понижается до половины максимального значения, 2500±500 мкс. Кратко такой импульс обозначается как 250/2500 мкс. Испытания линейной изоляции проводятся также затухающими колебательными коммутационными импульсами 4000/7500 мкс. Допуск по времени подъема напряжения до первого максимума ±1000 мкс, по длительности импульса ±2500 мкс. Испытания изоляторов проводятся в сухом состоянии и под дождем. Допускается замена испытаний коммутационными импульсами испытанием переменным напряжением.

3. Испытания грозовыми импульсами напряжения позволяют проверить способность изоляции противостоять грозовым перенапряжениям.

При кратковременном приложении напряжения, когда время приложения напряжения сопоставимо со временем развития пробоя, процесс пробоя изменяется с изменением пробивного напряжения по сравнению с ситуацией медленно нарастающего напряжения. Пробивное напряжение зависит от скорости подъема напряжения на изоляционном промежутке, поскольку вначале требуется некоторое время для достижения статического пробивного напряжения, затем требуется время на появление первого эффективного электрона, с которого начинается развитие пробоя, и затрачивается какое-то время на формирование канала разряда.

Все составляющие предразрядного времени зависят от скорости подъема напряжения и, в общем случае, от формы импульса напряжения. Зависимость разрядного напряжения оказывается связанным с предразрядным временем, и эта зависимость называется ***вольт-секундной характеристикой изоляционного промежутка.***

Кратковременные повышения напряжения происходят при разрядах молнии в оборудование или при близких разрядах молнии. Для обеспечения защиты оборудования от перенапряжений с помощью защитного разрядного промежутка требуется, чтобы при быстром подъеме напряжения пробивался защитный промежуток.

Вольт-секундные характеристики изоляции оборудования определяют при параметрах импульса, близких к средним параметрам грозовых перенапряжений. Эти параметры определяются ГОСТ 1516.2-97, а соответствующий импульс называется ***стандартным грозовым импульсом***.

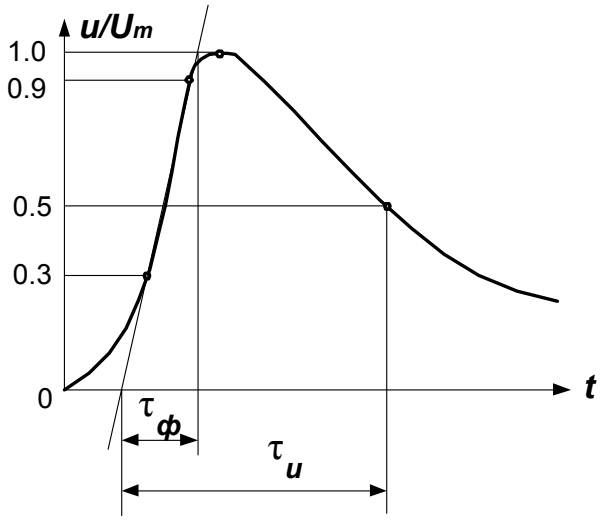


Рис. 4. Определение параметров апериодического импульса

Определение характеристик изоляции на стандартном грозовом импульсе позволяет унифицировать испытания и сопоставлять различные изоляционные конструкции между собой.

ГОСТ 1516.2-97 определяет время нарастания импульса напряжения и длительность импульса. Для выделения наиболее значимой части импульса на его фронте (рис. 4) проводят прямую линию через точки, соответствую-

щие 0,3 и 0,9 амплитуды импульса и по пересечению этой линией оси абсцисс и линии максимального значения импульса определяют длительность фронта $\tau_ф$.

По времени достижения спада импульса до половины максимального значения определяют длительность импульса $\tau_и$. Для стандартного грозового импульса $\tau_ф$=1,2 мкс ± 30%, $\tau_и$=50 мкс ± 20%.

Вольт-секундные характеристики имеют особое значение в вопросах защиты оборудования от перенапряжений, когда защитными элементами служат искровые промежутки, вентильные и трубчатые разрядники. При воздействии грозовых перенапряжений факт пробоя защитного промежутка или защищаемой изоляции определяется видом вольт-секундных характеристик и их взаимным пересечением (рис. 5).

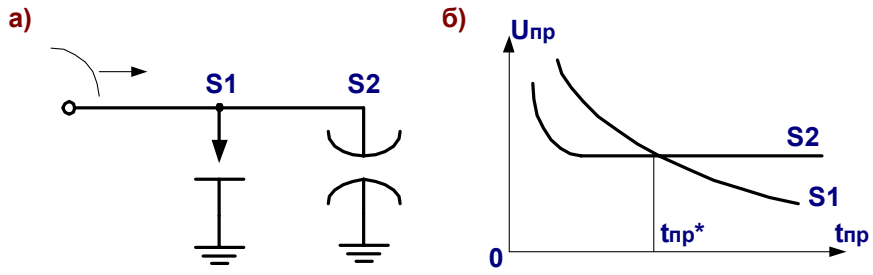


Рис. 5. Вольт-секундные характеристики промежутков разных типов

Вольт-секундные характеристики промежутков с однородным и слабонеоднородным электрическим полем имеют более пологий вид по сравнению с промежутками с резконеоднородным полем. Защитный промежуток S1 (рис. 5) не обеспечит защиту изоляции S2 при предразрядных временах менее $t_{пр}^{*}$, хотя на частоте 50 Гц пробивное напряжение S1 может быть меньше, чем у S2.

Из-за сложности получения вольт-секундных характеристик часто пользуются более простым пятидесятипроцентным пробивным напряжением, под каковым понимают амплитуду такого стандартного грозового импульса, при котором из десяти поданных на промежуток импульсов пять приводят к пробою промежутка, а оставшиеся пять – нет.

Изоляторы

Общие представления и основные характеристики изоляторов

Изоляторами называют электротехнические изделия, предназначенные для изолирования разнопотенциальных частей электроустановки, то есть для предотвращения протекания электрического тока между этими частями электроустановки, и для механического крепления токоведущих частей.

Диэлектрики, из которых изготавливаются изоляторы, должны обладать высокой ***механической прочностью***, поскольку изоляторы, являясь элементом конструкции, несут значительную нагрузку. Изоляторы линий электропередачи, например, несут нагрузку от тяжести проводов, исчисляемую тоннами, а иногда и десятками тонн. Опорные изоляторы, на которых крепятся шины распределительных устройств, выдерживают громадные нагрузки от электродинамичееких сил, возникающих между шинами при коротких замыканиях.

Диэлектрики должны иметь высокую ***электрическую прочность***, позволяющую создавать экономичные и надежные конструкции изоляторов. Нарушение электрической прочности изолятора может происходить или при пробое твердого диэлектрика, из которого он изготовлен, или в результате развития разряда в воздухе вдоль внешней поверхности изолятора. Пробой твердого диэлектрика означал бы выход изолятора из строя, тогда как разряд по поверхности при условии быстрого отключения напряжения не причиняет изолятору никаких повреждений. Поэтому пробивное напряжение твердого диэлектрика в изоляторе должно быть (и всегда делается) примерно в 1,5 раза более высоким, чем напряжение перекрытия по поверхности, которым и определяется электрическая прочность изолятора.

Диэлектрики должны быть негигроскопичны и не должны изменять своих свойств под действием различных метеорологических факторов. При неблагоприятных условиях, (дождь, увлажненные загрязнения) на поверхностях изоляторов, устанавливаемых на открытом воздухе (изоляторов наружной установки), могут возникать частичные электрические дуги. Под их действием поверхность может обугливаться, и на ней могут появляться проводящие следы — треки, снижающие электрическую прочность изоляторов. Поэтому диэлектрики для изоляторов наружной установки должны обладать высокой ***трекингостойкостью***.

Всем указанным требованиям в наибольшей степени удовлетворяют ***глазурованный электротехнический фарфор и стекло***, получившие широкое распространение, а также некоторые ***пластмассы***.

Электрическая прочность фарфора в однородном поле при толщине образца 1,5 мм составляет 30—40 кВ/мм и уменьшается при увеличении толщины. Электрическая прочность стекла при тех же условиях — 45 кВ/мм.

Механическая прочность фарфора и стекла зависит от вида нагрузки. Например, прочность фарфоровых образцов диаметром 2—3 см составляет при сжатии 450 МПа, при изгибе — 70 МПа, а при растяжении — всего 30 МПа.

Поэтому наиболее высокой механической прочностью обладают изоляторы, в которых фарфор работает на сжатие.

Стекло по механической прочности не уступает фарфору и тоже лучше всего работает на сжатие. Стеклянные изоляторы в процессе изготовления подвергаются ***закалке:*** нагреваются до температуры примерно 700 °С и затем обдуваются холодным воздухом. Во время закалки наружные слои стекла твердеют значительно раньше внутренних, поэтому при последующей усадке внутренних слоев в толще стекла образуются растягивающие усилия. Такая предварительно напряженная конструкция имеет высокую прочность на сжатие. Стеклянные подвесные изоляторы тарельчатого типа для линий электропередачи изготовляются на нагрузки до 530 кН.

Изоляторы из закаленного стекла имеют ряд ***преимуществ*** перед фарфоровыми: технологический процесс их изготовления полностью автоматизирован; прозрачность стекла позволяет легко обнаружить при внешнем осмотре мелкие трещины и другие внутренние дефекты; повреждение стекла приводит к разрушению диэлектрической части изолятора, которое легко обнаружить при осмотре линии электропередачи эксплуатационным персоналом.

Полимерные изоляторы наружной установки изготовляются из эпоксидных компаундов на основе циклоолифатических смол, из кремнийорганической резины, из полиэфирных смол с минеральным наполнителем и добавкой фторопласта. Такие изоляторы имеют высокую электрическую прочность и достаточную трекингостойкость. Высокая механическая прочность полимерных изоляторов достигается посредством ***армирования их стеклопластиком***. Применение полимерных изоляторов на линиях электропередачи позволяет существенно уменьшить массу подвесных изоляторов. В закрытых помещениях изоляторы не подвержены влиянию атмосферных осадков, поэтому для их изготовления в некоторых случаях используется бакелизированная бумага. Для уменьшения гигроскопичности такие изоляторы покрываются снаружи водостойкими лаками. Однако наибольшее распространение для внутренней установки получили изоляторы из фарфора и стекла, отличающиеся от изоляторов наружной установки более простой формой.

Поскольку перекрытие изоляторов происходит в результате развития разряда в воздухе вдоль поверхности, на разрядные напряжения изоляторов оказывают влияние те же факторы, которые влияют на разрядные напряжения воздушных промежутков, т. е. давление, температура и абсолютная влажность воздуха. Помимо этого на разрядные напряжения изоляторов влияет состояние их поверхности. Условия развития разряда по поверхности изоляторов наружной установки существенно изменяются, если на их поверхностях имеются увлажненные загрязнения или же они смачиваются дождем. Тогда разрядные напряжения значительно уменьшаются.

По расположению токоведущей части различают опорные, проходные и подвесные изоляторы, назначение которых прямо определяются их названиями.

По конструктивному исполнению изоляторы делятся на:

- тарельчатые (изоляционная часть в форме тарелки);

- стержневые (изоляционная часть в виде стержня или цилиндра);

- штыревые (изолятор имеет металлический штырь, несущий основную механическую нагрузку).

По месту установки различают:

- линейные изоляторы, используемые для подвески проводов ЛЭП;

- станционные изоляторы, используемые на электростанциях, подстанциях.

Основными характеристиками изоляторов являются:

- номинальное напряжение электроустановки, для которой предназначен изолятор;

- разрядные напряжения;

- геометрические параметры;

- механические характеристики.

К разрядным напряжениям изоляторов относят три напряжения перекрытия и одно пробивное напряжение:

- ***сухоразрядное напряжение*** $\boldsymbol{U_{схр}}$ – напряжение перекрытия чистого сухого изолятора при напряжении частотой 50 Гц;
- ***мокроразрядное напряжение*** $\boldsymbol{U_{мкр}}$ – напряжение перекрытия чистого изолятора, смоченного дождем, падающим под углом 45^{o} к вертикали, при напряжении частотой 50 Гц;
- ***импульсное разрядное напряжение*** $\boldsymbol{U_{имп}}$ – пятидесятипроцентное напряжение перекрытия стандартными грозовыми импульсами (амплитуда импульса, при которой из десяти поданных на изолятор импульсов пять завершаются перекрытием, а оставшиеся пять не приводят к перекрытию);
- ***пробивное напряжение*** $\boldsymbol{U_{пр}}$ – напряжение пробоя изоляционного тела изолятора на частоте 50 Гц, редко используемая характеристика, поскольку при пробое вызывает необратимый дефект изолятора и напряжение перекрытия должно быть меньше пробивного напряжения.

У подвесных тарельчатых изоляторов сухоразрядное напряжение в 1,8..2 раза больше мокроразрядного напряжения, у стержневых изоляторов различие меньше, порядка 15..20%. Импульсное разрядное напряжение практически не зависит от увлажнения и загрязнения изолятора и обычно примерно на 20% больше амплитуды сухоразрядного напряжения. Загрязнения на поверхности изолятора сильно снижают мокроразрядное напряжение изолятора.

К геометрическим параметрам относят следующие:

- ***строительная высота*** $\boldsymbol{H_{с}}$**,** то есть габарит, который изолятор занимает в конструкции после его установки;
- ***наибольший диаметр D*** изолятора;
- ***длина пути утечки*** по поверхности изолятора $l_{у}$;
- ***кратчайшее расстояние между электродами по воздуху*** $\boldsymbol{l_{с}}$ (сухоразрядное расстояние), от которого зависит сухоразрядное напряжение;

- ***мокроразрядное расстояние*** $l_м$**,** определяемое в предположении, что часть поверхности изолятора стала проводящей из-за смачивания дождем, падающим под углом 45° к вертикали.

Длина пути утечки изолятора нормируется ГОСТ 9920-75 для различных категорий исполнения и в зависимости от степени загрязненности атмосферы (табл. 2.1).

Основными ***механическими характеристиками*** изоляторов являются три следующие характеристики:

- минимальная разрушающая сила на растяжение, имеющая преимущественное значение для подвесных изоляторов;
- минимальная разрушающая сила на изгиб, имеющая преимущественное значение для опорных и проходных изоляторов;
- минимальная разрушающая сила на сжатие, которая для большинства изоляторов имеет второстепенное значение.

Измеряют минимальную разрушающую силу в деканьютонах (даН) или килоньютонах (кН).

Конструкции и маркировка изоляторов

Опорно-стержневые изоляторы применяют в закрытых и открытых распределительных устройствах для крепления на них токоведущих шин или контактных деталей. Изоляторы внутренней установки конструктивно представляют собой фарфоровое тело, армированное крепежными металлическими деталями (рис. 1). Арматура одновременно является внутренним экраном, с помощью которого снижается напряженность поля у края электрода, где она максимальна.

Ребро на теле изолятора играет роль барьера, заставляя разряд развиваться под углом к силовым линиям поля, т. е. по пути с меньшей напряженностью. Внутренний экран и ребро существенно увеличивают разрядное напряжение изолятора.

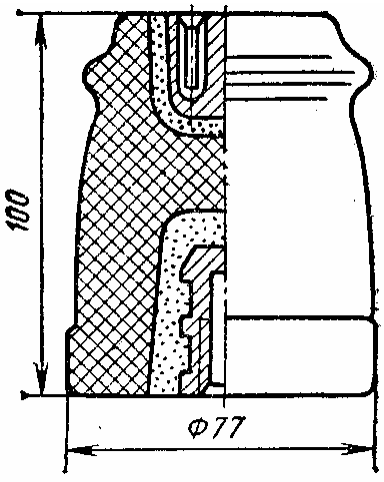


Рис.1 . Опорно-стержневой изолятор на напряжение 6 кВ для внутренней установки

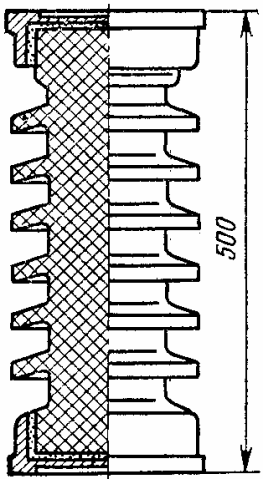


Рис. 2. Опорно-стержневой изолятор на напряжение 35 кВ для наружной установки

Изоляторы внутренней установки выпускаются на напряжения до 35 кВ. Обозначение изоляторов, например, ОФ-35-375 расшифровывается следующим образом: опорный, фарфоровый на 35 кВ, с минимальной разрушающей силой на изгиб 375 даН.

Опорно-стержневые изоляторы наружной установки отличаются большим количеством ребер, чем изоляторы внутренней установки. Ребра служат для увеличения длины пути утечки с целью повышения разрядных напряжений изоляторов под дождем и в условиях увлажненных загрязнений. Изоляторы на напряжения 35—110 кВ состоят из сплошного фарфорового стержня, армированного чугунными фланцами (рис. 2). Обозначение, например, ОНС-35-2000 расшифровывается следующим образом: опорный, наружной установки, стержневой на 35 кВ, с минимальной разрушающей силой 2000 даН.

Опорно-штыревые изоляторы применяют для наружных установок в тех случаях, когда требуется высокая механическая прочность, и опорно-стержневые применены быть не могут.

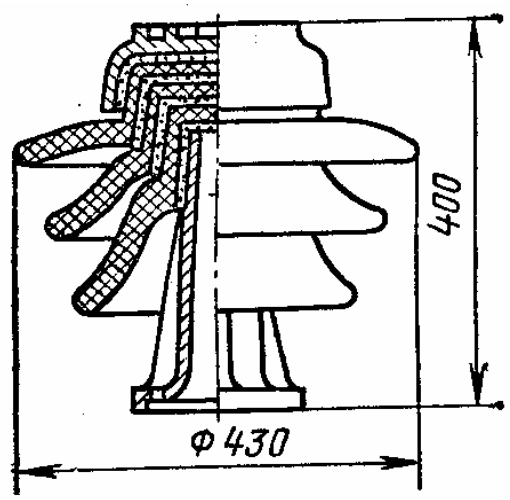


Рис. 3. Опорно-штыревой изолятор на напряжение 35 кВ

Опорно-штыревой изолятор состоит из фарфоровой или стеклянной изолирующей детали, с которой при помощи цемента скрепляется металлическая арматура — штырь с фланцем и колпачок (шапка).

Изолирующая деталь опорных штыревых изоляторов на напряжения 6—10 кВ выполняется одноэлементной, а на напряжение 35 кВ — двух- или трехэлементной (рис. 3).

В установках напряжением 110 кВ и выше используются колонки, состоящие из нескольких установленных друг на друга опорно-штыревых изоляторов на напряжение 35 кВ. В обозначение изоляторов введена буква Ш (штыревой).

Штыревые линейные изоляторы на напряжение 6—10кВ состоят из фарфоровой или стеклянной изолирующей детали, в которую ввертывается металлический крюк или штырь (рис. 4). Крюк служит для закрепления изолятора на опоре. Провод укладывается в бороздки на верхней или боковой поверхности изолятора и крепится посредством проволочной вязки или специальных зажимов. На напряжение 35 кВ изоляторы выполняются из двух склеенных между собой изолирующих деталей, что увеличивает их электрическую и механическую прочность. Обозначение штыревых линейных изоляторов, например ШФ6, означает: Штыревой фарфоровый на 6 кВ. Буква С в обозначении (ШС) указывает на то, что изолятор стеклянный.

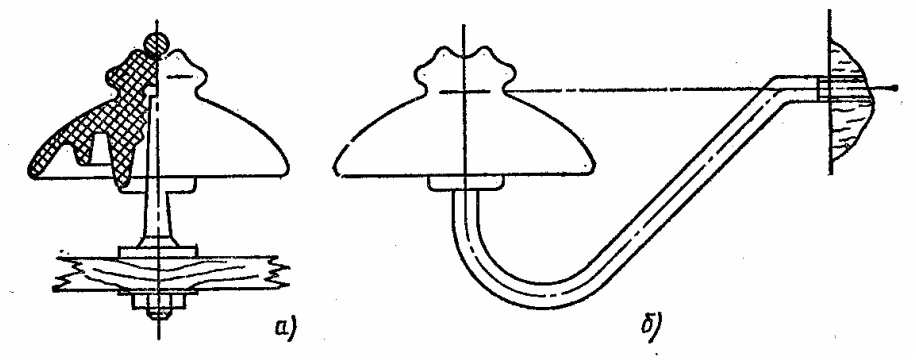


Рис. 4. Штыревой линейный изолятор на напряжение 35 кВ

Подвесные изоляторы тарельчатого типа широко применяются на ВЛ 35 кВ и выше. Они состоят из изолирующей тела (стеклянного или фарфорового), на котором при помощи цемента укрепляется металлическая арматура — шапка и стержень (пестик) (рис. 5).Различают изоляторы с конической и цилиндрической шапкой.

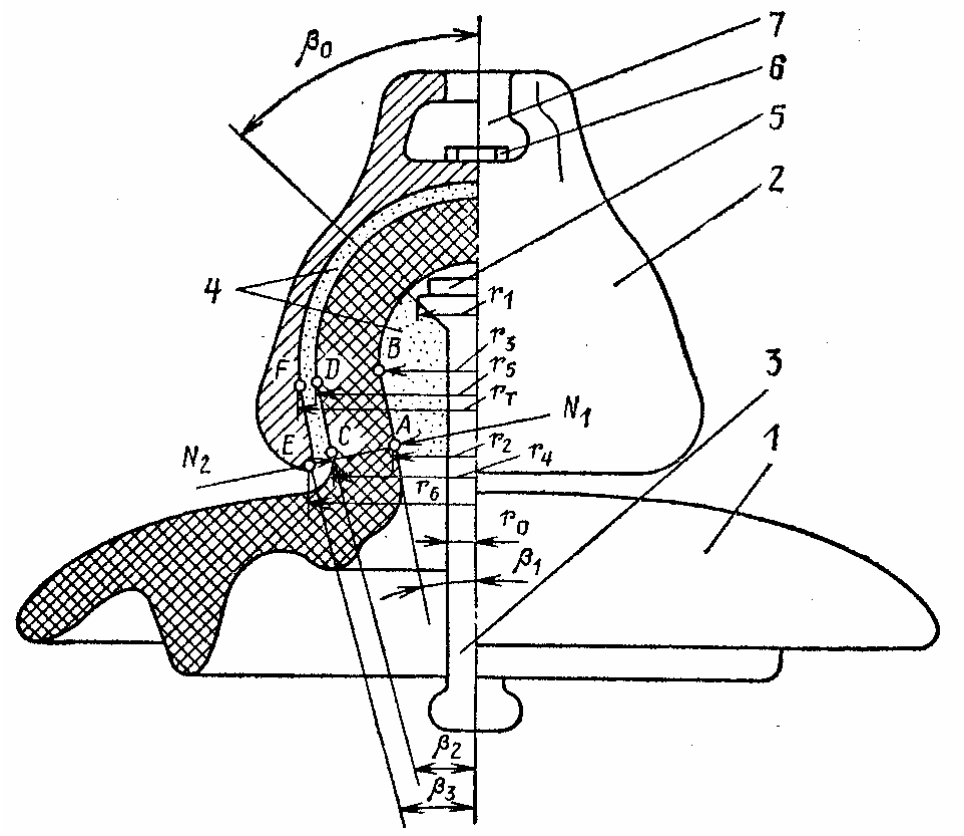


Рис. 5. Подвесной тарельчатый изолятор с конической головкой

1 – изолирующее тело, 2 – шапка изолятора, 3 – стержень (пестик), 4 - цементно-песочная связка, 5 – прокладка, 6 – пружинный замок, 7 – паз

Требуемый уровень выдерживаемых напряжений достигается соединением необходимого количества изоляторов в гирлянду. Это осуществляется путем введения головки стержня в гнездо на шапке другого изолятора и закрепления его пружинным замком. Гирлянды благодаря шарнирному соеди-

нению изоляторов работают только на растяжение. Однако изоляторы сконструированы так, что внешнее растягивающее усилие создает в изоляционном теле в основном напряжения сжатия. Тем самым используется высокая прочность фарфора и стекла на сжатие.

У фарфорового изолятора наружная и внутренняя поверхности головки (средней части изолирующей детали) покрывают фарфоровой крошкой, которая при обжиге спекается с фарфором. Это обеспечивает прочное сцепление цементной связки с головкой. Для компенсации температурных расширений цементной связки применяют эластичные промазки, которыми покрывают все элементы изолятора, соприкасающиеся с цементом. Для уменьшения внутренних механических напряжений между пестиком и телом изолятора устанавливается прокладка из пробки или кирзы.

Верхняя часть тарелки подвесного тарельчатого изолятора имеет гладкую поверхность, наклоненную под углом 5—10° к горизонтали, что обеспечивает стекание воды во время дождя. Нижняя поверхность тарелки для увеличения длины пути утечки выполняется ребристой.

По конструкции подвесные тарельчатые изоляторы могут быть сведены в следующие группы (рис. 6): а) с гладкой или почти гладкой поверхностью, обеспечивающей меньшую загрязняемость и лучшую самоочистку; б) с сильно развитой нижней поверхностью тарелки изолятора; в) колоколообразной формы с развитой наружной поверхностью; г) с двумя ребрами.

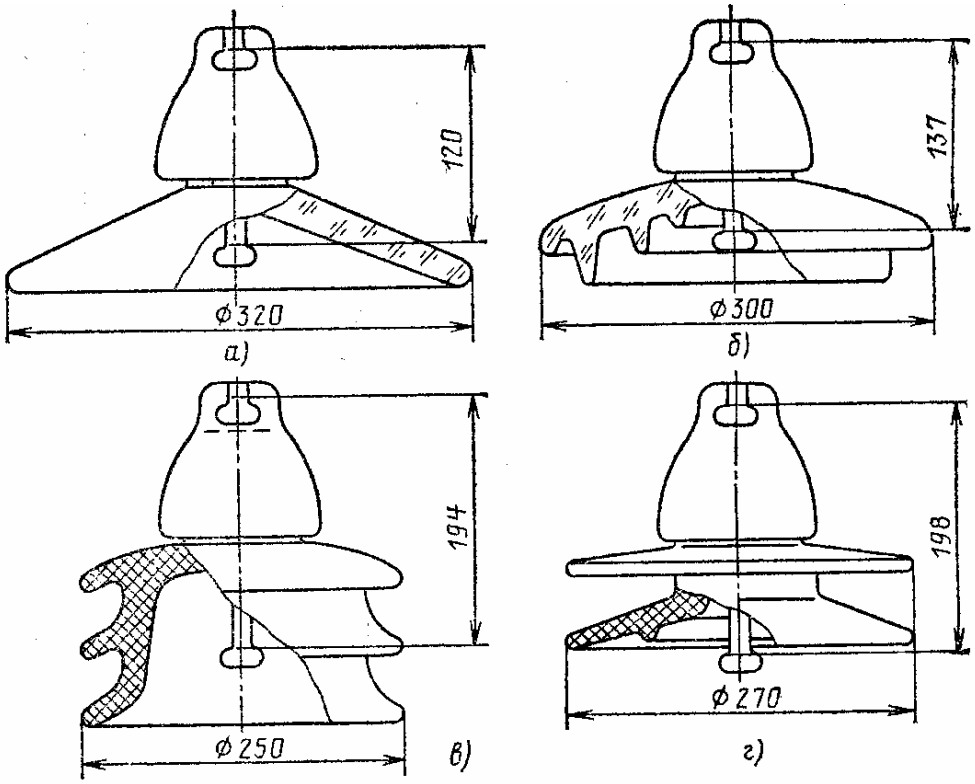


Рис. 6. Варианты исполнения подвесных тарельчатых изоляторов

Наиболее частой причиной выхода из строя тарельчатых изоляторов является пробой фарфора (стекла) между шапкой и стержнем, однако меха-

ническая прочность изолятора при этом не нарушается и падения провода на землю не происходит. Это является существенным достоинством тарельчатых изоляторов.

Обозначение изоляторов тарельчатого типа, например ПС-16Б, означает: П — подвесной, С — стеклянный, гарантированная электромеханическая прочность 160 кН, индекс Б означает вид конструктивного исполнения изолятора. Электромеханическая прочность изолятора — это величина разрушающей механической силы при приложении к изолятору напряжения, равного 75—80 % разрядного напряжения в сухом состоянии.

Подвесные стержневые изоляторы представляют собой стержень из изолирующего материала с выступающими на нем ребрами, армированный с обоих концов металлическими шапками (рис. 7). Эти изоляторы, как правило, выполняются из электротехнического фарфора. Однако в последнее время начат выпуск стержневых полимерных изоляторов. Стержневые изоляторы из фарфора не нашли в нашей стране широкого применения вследствие сравнительно невысокой механической прочности, а также возможности полного разрушения с падением провода на землю.

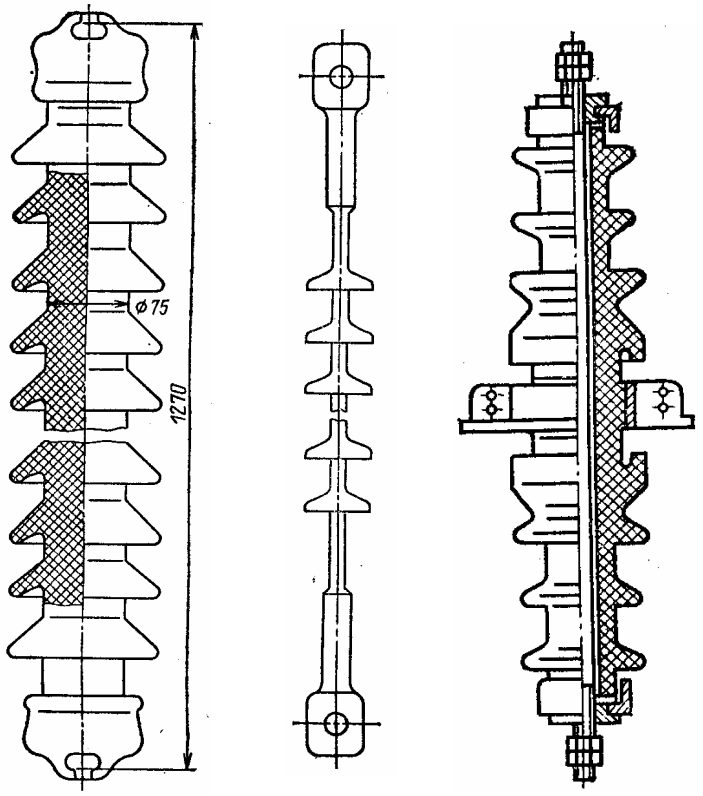


Рис. 7 . Стержневой подвесной изолятор на напряжение 110 кВ

Рис. 8. Стеклопластиковый стержневой изолятор

Рис. 9. Проходной изолятор на напряжение 35 кВ для внутренней установки

Проходные изоляторы применяются для изоляции токоведущих частей при прохождении их через стены, потолки и другие элементы конструкций распределительных устройств и аппаратов. Проходной изолятор в самом простом случае состоит из полого фарфорового элемента, внутри которого проходит токоведущий стержень (шина), и фланца, служащего для механического крепления изолятора к конструкции, через которую осуществляется ввод напряжения (рис. 9). Проходные изоляторы, предназначенные для наружной установки, имеют более развитую поверхность той части изолятора,

которая располагается вне помещения.

Обозначение проходного изолятора содержит значение номинального тока, например ПНШ-35/3000-2000 означает; проходной, наружной установки, шинный на напряжение 35 кВ и номинальный ток 3 кА с механической прочностью 20 кН.

Распределение напряжения вдоль гирлянды изоляторов

Гирлянда изоляторов, составленная из подвесных тарельчатых изоляторов, является одной из наиболее часто встречающихся видов изоляции проводов воздушных линий и контактной сети. Напряжение, приложенное к гирлянде изоляторов, ***распределяется неравномерно***, и на разные изоляторы приходятся разные доли напряжений, что снижает напряжение начала короны и напряжение перекрытия гирлянды. В наиболее неблагоприятной ситуации оказывается изолятор, ближайший к проводу.

Основной причиной неодинаковых напряжений на изоляторах можно считать наличие паразитных емкостей металлических частей изоляторов по отношению к земле (рис. 10). В гирлянде можно различить три вида емкостей: собственные емкости изоляторов C_0, емкости металлических частей по отношению к земле C_1 и емкости по отношению к проводу C_2. Порядок величин емкостей примерно таков: $C_0 \approx 50$ пФ, $C_1 \approx 5$ пФ, $C_2 \approx 0{,}5$ пФ.

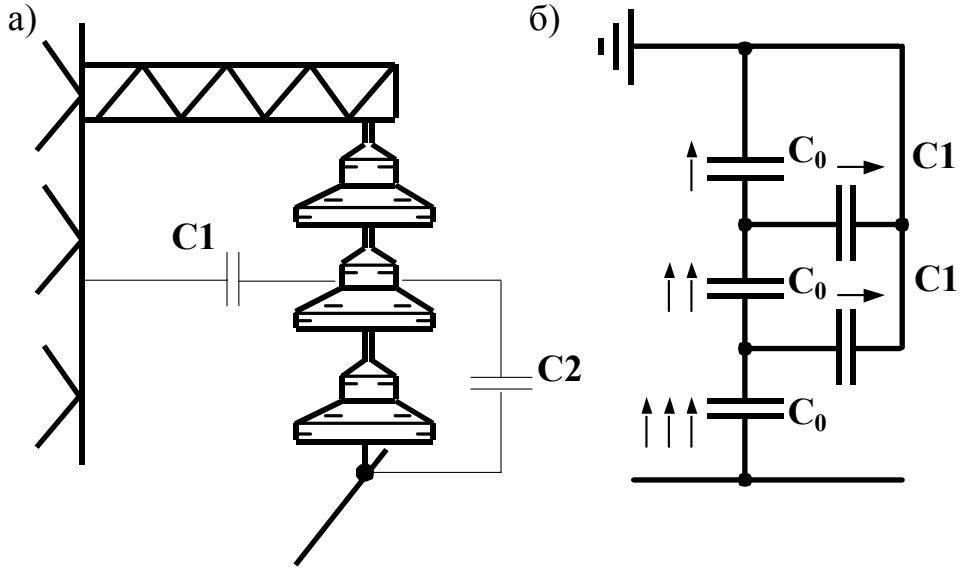


Рис. 10. Гирлянда изоляторов и схема замещения гирлянды

В первом приближении емкостью изоляторов по отношению к проводу можно пренебречь, и тогда схема замещения гирлянды сухих изоляторов выглядит как на рис. 10, б. При переменном напряжении по емкостным элементам протекает емкостный ток, и ток первого снизу изолятора разветвляется на ток емкостного элемента по отношению к земле и ток оставшейся части гирлянды. Через второй снизу изолятор течет емкостный ток меньшей величины, и падение напряжения максимально на нижнем, ближайшем к проводу

изоляторе, который находится в наихудших условиях. При числе изоляторов больше трех-четырех минимальное напряжение приходится, однако, не на самый верхний изолятор. Наличие емкостей C_2 приводит к некоторому выравниванию неравномерности падений напряжения и минимальное напряжение оказывается на втором-третьем (или далее, в зависимости от числа изоляторов в гирлянде) изоляторе сверху, рис. 11.



Рис. 11. Доля напряжения на изоляторах в гирлянде из 22 изоляторов

Для выравнивания напряжения по изоляторам гирлянды применяют экраны в виде тороидов, овалов, восьмерок, закрепляемых снизу гирлянды; на линиях с расщепленными фазами утапливают ближайшие изоляторы между проводами расщепленной фазы; расщепляют гирлянду около провода на две. Все эти меры выравнивают распределение напряжения из-за увеличения емкости C_2.

Развитие разряда в гирлянде по поверхности сухих изоляторов, под под дождем и при увлажненном загрязнении

Для разряда по загрязненной и увлажненной поверхности изолятора важным параметром является ***длина пути утечки*** изолятора — кратчайшее расстояние вдоль поверхности изолирующей детали между металлическими частями, находящимися под различными потенциалами.

Изоляторы, предназначенные для работы в районах со сравнительно чистой атмосферой, обычно имеют отношение длины пути утечки l_y к строительной высоте H_c около 2,2; изоляторы, предназначенные для работы в районах с загрязненной атмосферой, имеют более развитую поверхность, что позволяет увеличить длину пути утечки при неизменной строительной высоте и диаметре изолятора, т. е. увеличить отношение l_y / H_c до 2,7—3,2. Длина пути, по которому развивается разряд по загрязненной и увлажненной поверхности изолятора, называется ***эффективной длиной пути утечки*** и определяется по формуле

$$l_{уэ} = l_y / k_э$$

где l_y — длина пути утечки геометрическая; $k_э$ — коэффициент эффективности, который зависит от отношения длины пути утечки к диаметру изолятора и характера загрязнения. С увеличением отношения l_y/d от 0,9 до 1,4 коэффициент эффективности увеличивается от 1 до 1,2.

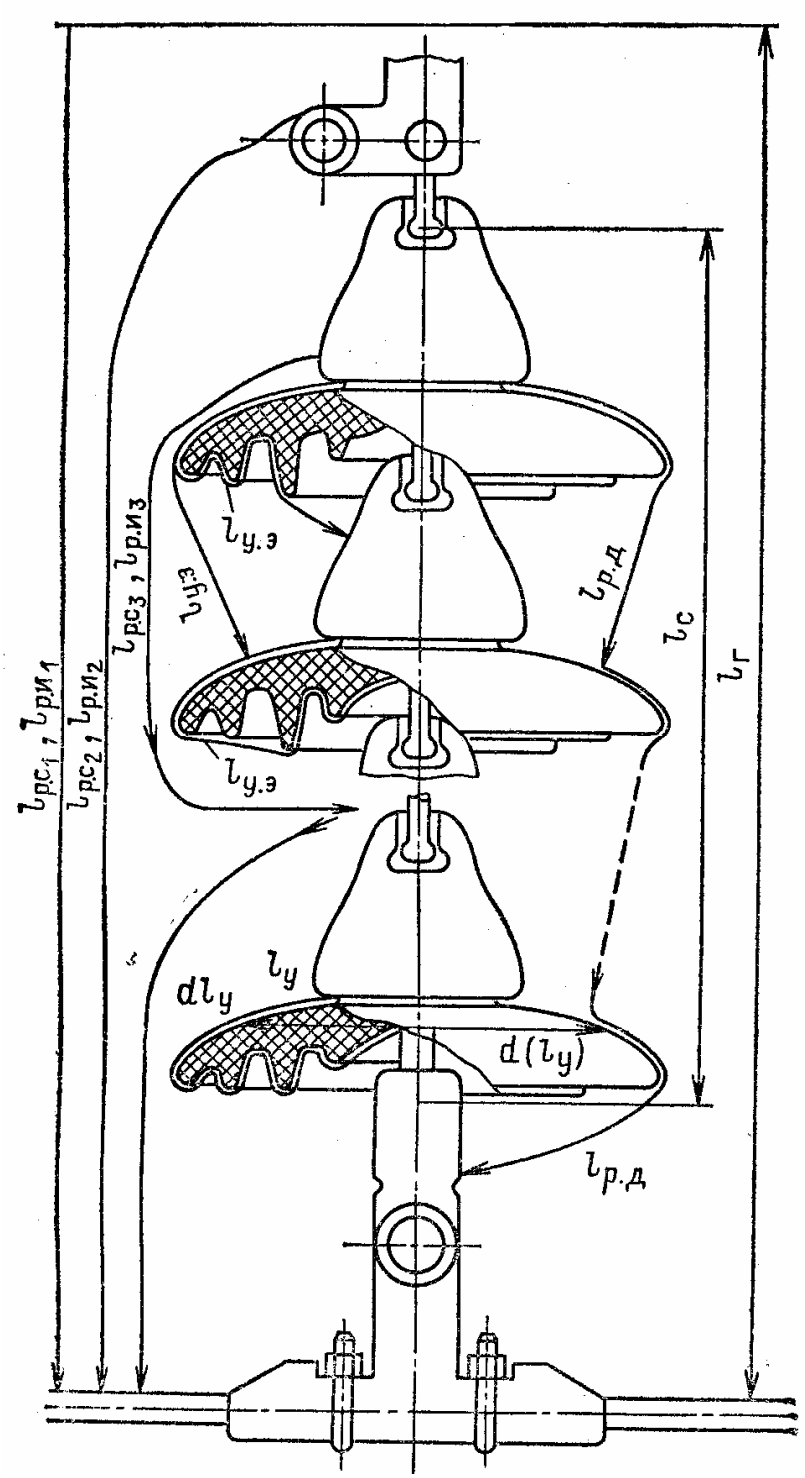


Рис. 12. Гирлянда изоляторов и возможные пути развития разряда

$l_{рс}$ - изолятор сухой, напряжение промышленной частоты и коммутационный импульс, $l_{ри}$ - грозовой импульс, $l_{рд}$ - при дожде, напряжение промышленной частоты, l_y - длина пути утечки, $l_{уэ}$ - эффективная длина пути утечки.

Выбор изоляции ВЛ постоянного и переменного тока

При выборе изоляции в первую очередь необходимо обеспечить безопасность людей, животных и механизмов, передвигающихся под линиями и вблизи оборудования подстанции, обеспечить оптимальную с экономической точки зрения надежность работы изоляции с учетом требований по допустимым уровням радиопомех и напряженности электрического поля вблизи земли.

Практика проектирования ВЛ показала, что с экономической точки зрения целесообразно выбирать изоляцию из условия ее надежной и безопасной работы при рабочем напряжении.

Существуют ***два пути выбора изоляции***. Первый предназначается для обычных линий электропередачи и подстанций, содержится в ПУЭ, сформулированных в результате обобщения многолетнего опыта эксплуатации и специально организованных научно-исследовательских работ.

Второй метод применяется для нестандартных линий электропередачи и для ВЛ, трассы которых проходят в специфических климатических условиях загрязнения, и основывается на статистическом или комбинированном методе выбора изоляции.

Для обычных линий. При расчете изоляции ВЛ вначале на основании технико-экономических расчетов производят выбор конструкции опоры, длины пролетов, сечения проводов и их механический расчет по нормативным нагрузкам, определяемым по климатическим условиям, характерным для территории прохождения трассы ВЛ.

Расчет изоляции ВЛ начинают с выбора длины гирлянды изоляторов по рабочему напряжению, так как опыт эксплуатации показал, что гирлянды, надежно работающие при рабочем напряжении, работают надежно и при коммутационных перенапряжениях.

Выбор числа и типа изолятора должен производиться в зависимости от степени загрязненности атмосферы, которая имеет семь градаций. Наиболее надежным критерием в выборе изоляции является опыт эксплуатации.

Количество изоляторов в гирлянде рассчитывают по формуле

$$N = \frac{\lambda_{уэ} U_{раб.наиб} k \cdot k_к}{l_{уи}},$$

где $\lambda_{уэ}$ — удельная (на 1 кВ) эффективная длина пути утечки, зависающая от степени загрязненности атмосферы;

$U_{раб.наиб}$ — наибольшее рабочее напряжение;

k и k_K — коэффициенты эффективности использования длины пути утечки одиночного изолятора и составной конструкции;

$l_{уэ}$ — длина пути утечки изолятора.

Результат расчета числа изоляторов в гирлянде округляют в большую сторону, если количество десятых превышает 3.

Поскольку с уменьшением давления воздуха влагоразрядные напряже-

ния загрязненных изоляторов снижаются, при выборе изоляции ВЛ 100—750 кВ, проходящих на высотах от 1 до 2, от 2 до 3 и от 3 до 4 км, удельная эффективная длина пути утечки должна быть увеличена на 5, 10 и 15 % соответственно.

Коэффициенты эффективности зависят от характера загрязнения и метеорологических условий и могут быть определены специально проведенными испытаниями. При отсутствии таких данных коэффициент эффективности использования длины пути утечки приближенно определяется по соотношению l_y / d_m, где — l_y длина пути утечки изолятора; d_m — диаметр тарелки изолятора с использованием таблиц.

По расчетной длине гирлянды и выбранной конструкции опоры для рабочего напряжения, коммутационных и грозовых перенапряжений определяют расстояние от провода до стойки опоры при отсутствии ветра ***как сумму расстояния***, на которое может отклониться провод при нормативных метеорологических условиях, и наименьшего допустимого расстояния по воздуху от провода до опоры.

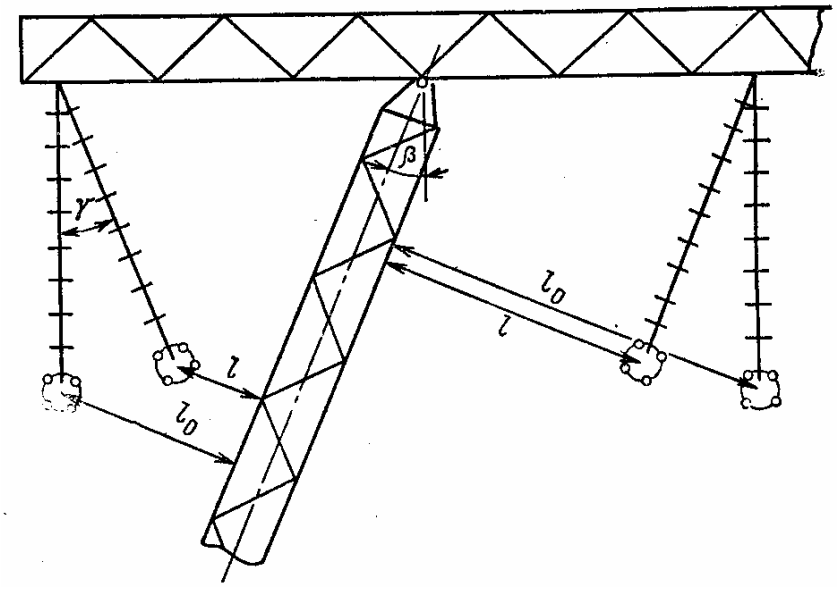


Рис. 13. К определению расстояния между проводом и стойкой опоры

При проектировании ВЛ выбирается наибольшее из расчетных расстояний от провода до опоры при отсутствии ветра. Для ВЛ 6—500 кВ, как правило, расстояние от провода до опоры определяется требованием безопасности при подъеме на опору.

Статистический метод выбора изоляции используется для нестандартных ВЛ, у которых провода могут быть фиксированы на опоре и в пролете, кроме того, в процессе эксплуатации не предусматривается подъем на опору обслуживающего персонала при наличии напряжения на линии. В таких случаях длина воздушного промежутка должна выбираться как по рабочему напряжению, так и по коммутационным перенапряжениям. Длина гирлянды при статистическом методе выбирается по рабочему напряжению.

Эксплуатационный контроль изоляции

К эксплуатационным мероприятиям, повышающим надежность работы изоляции в условиях сильных загрязнений и увлажнений, относятся обмыв или очистка изоляторов и применение гидрофобных покрытий.

Основным средством борьбы с загрязнением подстанционной изоляции является ***ручная очистка изоляторов***, т. е. протирка изоляторов тряпками, смоченными в воде или растворителе. На ВЛ ручная очистка изоляторов применяется редко и главным образом на участках промышленных загрязнений, так как она крайне трудоемка и связана к тому же с отключением напряжения. На протирку гирлянды изоляторов ВЛ 500 кВ при нецементирующемся загрязнении требуется около 40 мин.

Для увеличения интервалов между чистками изоляторов и облегчения очистки цементирующихся загрязнений применяют ***гидрофобные*** покрытия в виде твердых пленок или вязких покрытий типа вазелинов.

Изоляторы имеют кроме внешней также и внутреннюю изоляцию. Основной причиной выхода из строя изоляторов является образование трещин в диэлектрике под шапкой изолятора, в месте наибольших механических напряжений.

Методы контроля изоляторов.

1. Метод контроля, основанный на ***измерении распределения напряжения по гирляндам*** или колонкам, достаточно эффективен и не требует отключения. Сущность метода заключается в сравнении измеренных падений напряжения на каждом элементе с нормальными падениями напряжения, измеренными в отсутствие поврежденных изоляторов. Эксплуатационный опыт энергосистем показывает, что падение напряжения на дефектном изоляторе составляет 50 % нормального или меньше.

Распределение напряжения измеряется с помощью специальных устройств (измерительных головок), снабженных изолирующими штангами, рассчитанными на соответствующее напряжение. Простейшая измерительная головка представляет собой шаровой искровой промежуток с указателем расстояния между шарами, отградуированным в киловольтах. Для измерения падения напряжения шаровой промежуток с помощью металлических щупов подключают параллельно изолятору и сближают шары до возникновения между ними пробоя. Расстояние между шарами изменяют с помощью шнура из изоляционного материала или поворотом изолирующей штанги и связанного с ней подвижного измерительного шара.

2. ***Измерение радиопомех,*** возникающих от частичных разрядов**.** Контроль состояния изоляции посредством измерения распределения напряжения позволяет обнаружить изоляторы только с развитыми дефектами. Изоляторы с микротрещинами, как правило, выдерживают рабочее напряжение, но постепенное развитие микротрещин неминуемо приводит к пробою изолятора. Частичные же разряды в микротрещинах создают радиопомехи. Для выявления дефектных изоляторов применяют измеритель радиопомех.

Поскольку радиопомехи создают не только изоляторы, но и корона на

проводах, для выявления дефектного изолятора применяют поочередное шунтирование изоляторов в гирлянде (колонке), пока не будет обнаружено прекращение или резкое ослабление радиопомех.

3. ***Испытание повышенным напряжением*** является наиболее эффективным методом контроля состояния изоляции. Подавая на изоляцию напряжение выше того, что возникает в процессе эксплуатации, можно проверить запас электрической прочности изоляции и выявить слабые места в изоляции.

Повышенные напряжения рекомендуется применять при профилактических испытаниях одноэлементных изоляторов, а также при сомнениях в эффективности других методов. При проверке изоляции одновременно несколькими методами рекомендуется испытание повышенным напряжением проводить в качестве завершающего.

Коронный разряд на проводах ВЛ постоянного и переменного тока

Коронный разряд, или корона, — это самостоятельный разряд, возникающий в резконеоднородных полях, в которых ионизационные процессы могут происходить только в узкой области вблизи электродов.

Начальная напряженность поля коронного разряда зависит от радиуса провода r и коэффициента гладкости провода m, учитывающего форму провода. На ВЛ применяются провода, свитые из большого числа проволок. Степень неоднородности электрического поля витого провода выше, чем гладкого, а значит, корона возникает при меньшем напряжении. Обычно значение m составляет 0,82-0,94 в зависимости от марки провода.

При коронном разряде в результате ионизации воздуха у поверхности провода образуется объемный заряд того же знака, что и полярность напряжения на проводе. Так как объемный заряд перемещается от провода к земле, то напряженность поля у поверхности провода стремится увеличиться. Однако из-за усиления при этом ионизации воздуха объемный заряд вблизи провода пополняется и напряженность поля в итоге сохраняется. Таким образом, вследствие непрерывного удаления объемного заряда от провода коронный разряд может поддерживаться ***неограниченно долго***.

При больших диаметрах проводов напряженность электрического поля в окрестности провода уменьшается значительно медленнее, чем вблизи проводов малого диаметра. Поэтому зона ионизации (***чехол короны***) имеет большие размеры.

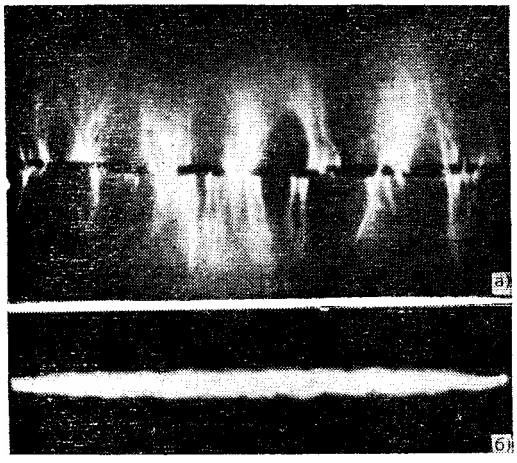


Рис. 1. Стримерная (а) и лавинная (б) короны на проводе

Корона в этом случае возникает сразу в ***стримерной форме***, и от провода исходят многочисленные стримерные каналы (рис. 1, а).

На проводах малых диаметров (до 1 см) корона возникает в ***лавинной форме.*** Зона ионизации достаточно однородна, свечение сосредоточено в узком чехле (рис. 1, б). Однако при увеличении напряжения сверх начального размеры зоны ионизации возрастают и корона из лавинной переходит в стримерную.

Различают униполярную и биполярную корону. ***Униполярная корона*** возникает на одном проводе, когда провода разнесены далеко.

В случае ***биполярной короны*** ионы разных знаков от проводников разной полярности движутся навстречу друг другу. Посередине между проводами происходит частичная рекомбинация ионов. Значительная же их часть проникает в зону короны противоположной полярности, усиливая там поле. В результате этого интенсивность ионизации возрастает, ток короны, а, сле-

довательно, и потери энергии увеличиваются.

Поскольку при проектировании ВЛ провода разносятся на достаточное расстояние, то биполярной короны практически не возникает, т. е. процессы коронирования в разных фазах друг на друга практически не влияют. При этом каждая фаза может рассматриваться отдельно.

На рис. 2 показано изменение напряжений и тока короны при переменном напряжении.

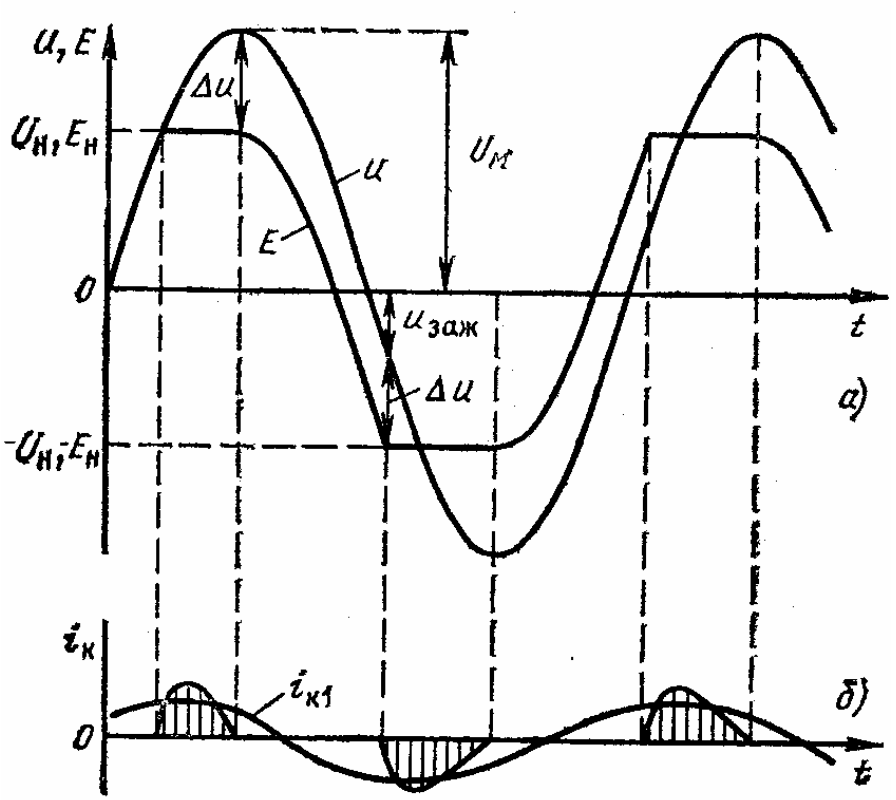


Рис. 2. Корона при переменном напряжении (а) и лавинная (б) короны на проводе

а – изменение во времени напряжения источника (U) и напряженности электрического поля на поверхности провода (E); б – ток короны ($i_к$) и его первая гармоника ($i_{к1}$)

При увеличении напряжения на проводе возрастает также напряженность электрического поля у его поверхности. (Масштабы напряжения и напряженности E выбраны на рисунке так, что кривые в начальной части совпадают.) При $u = U_н$ и $E=E_н$ у провода начинается коронный разряд. Напряжение продолжает увеличиваться, а напряженность поля у поверхности провода остается постоянной и равной $E_н$ вследствие накопления положительного объемного заряда. В момент, когда напряжение достигает амплитудного значения U_m, коронирование прекращается. И если считать, что положительный объемный заряд остается неподвижным, то напряженность поля у провода в дальнейшем снижается по синусоиде, сдвинутой на ΔU относительно напряжения.

Когда напряженность поля достигнет в следующий полупериод значения $-E_н$, коронирование возобновляется. Во второй и каждый из последую-

щих полупериодов коронирование более продолжительно, чем в первый после включения полупериод. Во второй полупериод сначала нейтрализуется положительный заряд, образовавшийся в первый полупериод, а затем в пространстве у провода накапливается отрицательный заряд. Далее процесс продолжается с переменой знаков заряда.

При разложении тока короны на гармоники становится очевидным, что первая его гармоника опережает напряжение на угол, меньший 90°. Значит, ток короны имеет активную и емкостную составляющие, т. е. при короне имеют место потери энергии и увеличивается емкость провода.

На характеристики коронного разряда — начальное напряжение, потери энергии и радиопомехи — значительное влияние оказывают погодные условия. Атмосферные осадки усиливают напряженность электрического поля у провода, образуя на его поверхности водяные или ледяные выступы и острия. Начальное напряжение короны при этом резко снижается. Коэффициент гладкости провода должен учитывать изменение состояния провода при атмосферных осадках

Выбор конструкции фазы ВЛ

Для того чтобы исключить потери энергии на корону, а также радиопомехи, начальное напряжение короны должно быть не ниже наибольшего рабочего напряжения линии относительно земли. Обеспечить это соотношение надлежащим выбором диаметра проводов можно только для условий сухой погоды. При атмосферных осадках исключить коронирование проводов невозможно.

Так для ВЛ напряжением 110 и 220 кВ наименьшие диаметры проводов, при которых исключается корона в хорошую погоду, составляют соответственно 1,2 и 2,4 см.

При номинальных напряжениях 330 кВ и выше необходимы провода еще большего диаметра, во многих случаях превышающего диаметр, выбранный из условия передачи по линии заданной мощности. В таких случаях целесообразно использовать провода, площадь поперечного сечения которых по проводящему материалу и диаметру независимы. Это так называемые ***расширенные провода***. Они имеют диаметр, при котором обеспечивается необходимое снижение напряженности поля на их поверхности, а для сокращения площади поперечного сечения делаются полыми или со стеклопластиковой сердцевиной.

Другое решение было предложено еще в 1910 г. акад. В. Ф. Миткевичем и состоит в применении ***расщепленных проводов фаз***. В этом случае каждая фаза линии состоит вместо одного провода большого диаметра из нескольких параллельных проводов относительно малого диаметра (рис. 3). Таким образом, удается при требуемом суммарном сечении проводов существенно уменьшить максимальную напряженность поля на их поверхности.

В этом случае заряд каждого провода q_1 составляет только часть обще-

го заряда расщепленной фазы $q_ф$:

$$q_1 = \frac{q_ф}{n} = \frac{C_{р.ф.} \cdot U_ф}{n},$$

где n – число проводов в фазе, $C_{р.ф.}$ - емкость единицы длины расщепленной фазы, $U_ф$ - фазное напряжение.

Наиболее существенное влияние на максимальную напряженность электрического поля оказывает радиус расщепления $r_р$. При увеличении $r_р$, с одной стороны, уменьшается влияние зарядов соседних проводов, а с другой стороны, увеличивается емкость фазы и соответственно ее заряд. Поэтому существует оптимальный радиус расщепления, при котором максимальная напряженность электрического поля $E_{\max}$ наименьшая (рис. 4).

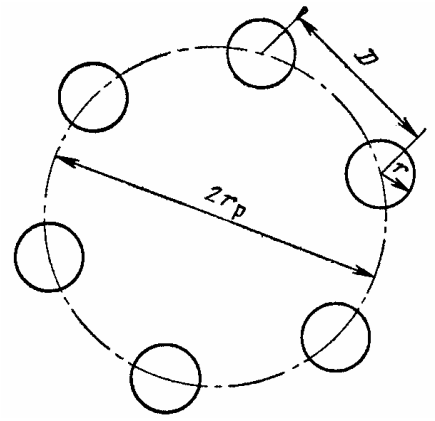


Рис. 3. Конструкция расщепленной фазы

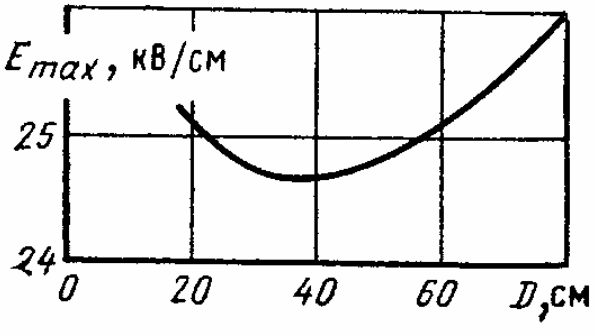


Рис. 4. Зависимость $E_{\max}$ на проводах расщепленной фазы от расстояния между проводами ВЛ 500кВ (n=3)

Потери энергии на местную корону

Увеличением диаметра проводов и снижением напряженности поля на их поверхности нельзя исключить коронного разряда при неблагоприятных атмосферных условиях. Более того, даже при хорошей погоде не может быть исключена корона, например, в местах повреждения поверхности провода и арматуры гирлянд, на элементах крепления, т. е. в точках местного усиления поля. Такую корону называют местной в отличие от общей короны, существующей на всей поверхности проводов.

Оценка потерь энергии на корону производится на основе экспериментально полученных данных.

Например, в одном из способов используются обобщенные характеристики потерь для разных погодных условий. Для трассы линии электропередачи определяются по метеорологическим данным продолжительности отдельных видов погоды в часах: хорошей погоды $h_{х,п}$, дождя $h_д$, снега $h_с$,

изморози $h_{из}$. Затем по отношению $E_{\max} / E_н$ из существующих кривых находят мощность потерь для разных погодных условий. Годовые потери энергии на корону, кВт·ч/км, определяются как

$$A_к = N^2 \cdot r^2 (P_{х,п} \cdot h_{х,п} + P_д \cdot h_д + P_с \cdot h_с + P_и \cdot h_и),$$

где N – общее число проводов в трех фазах линии.

Среднегодовая мощность потерь на корону, кВт/км, равна

$$P_{с,г} = A_к / 8760.$$

Экологическое влияние ВЛ

Ток стримерной короны состоит из отдельных импульсов с очень крутым фронтом (длительность фронта — порядка десятков наносекунд). Эта высокочастотная составляющая тока короны является источником интенсивного электромагнитного излучения с широким спектром частот, которое создает ***помехи радио- и телевизионному приему.***

Поскольку наиболее благоприятные условия для возникновения стримерной короны складываются при различных осадках, когда значительно снижается начальная напряженность поля, а также при применении проводов большого диаметра, наиболее сильные радиопомехи и акустический шум возникают при коронировании линий сверхвысокого напряжения во время дождя и снега. В хорошую погоду помехи возрастают при загрязнении проводов.

Спектр частот излучения, создающего радиопомехи, охватывает диапазон от 10 кГц до 1 ГГц. Помехи на частотах выше 30 МГц оказывают мешающее влияние на телеприем и возникают только при коронировании линий 750 кВ. Источниками помех в этом случае помимо короны на проводах служат частичные разряды в зазорах и трещинах изоляторов и корона на заостренных элементах арматуры. В хорошую погоду корона на проводах практически не создает помех телевизионному приему.

Интенсивность радиопомех характеризуется ***вертикальной составляющей напряженности*** электрического поля вблизи поверхности земли (E_2, мкВ/м). Уровень радиопомех, дБ, определяется величиной

$$Y = 10 \lg \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^2 = 20 \lg \frac{E_2}{E_1}.$$

Обычно за базовое значение принимают $E_1 = 1$ мкВ/м, тогда $Y = 20 \lg E_2$.

В качестве расчетной частоты по рекомендации Международного комитета по радиопомехам принимается 0,5 МГц. Уровень полезного сигнала при этой частоте составляет примерно 60 дБ.

Радиоприем считается удовлетворительным, если полезный сигнал превышает помехи на 20 дБ. Поэтому допустимый уровень радиопомех в хорошую погоду составляет 40 дБ, что в соответствии с формулой дает E= 100

мкВ/м. Это значение напряженности электрического поля радиопомех принято в качестве допустимого на расстоянии 100 м от проекции на землю крайнего провода линии электропередачи напряжением 330 кВ и выше.

Акустический шум возникает главным образом в плохую погоду, когда усиливается интенсивность коронирования проводов. Звуковой эффект при этом имеет две составляющие:

1) шипение, соответствующее частоте 100 Гц и кратным ей частотам (обусловлено движением объемного заряда у проводов, что дважды за период создает волны звукового давления);

2) широкополосный шум (генерируется стримерной короной).

Особенно интенсивный шум от короны возникает при сильном дожде, однако такой дождь сам создает шум, превышающий по громкости возможные акустические помехи от линии электропередачи. Поэтому более существенны помехи при моросящем дожде, в туман, при мокрых проводах после сильного дождя. Уровень громкости в этих случаях на 5 — 6 дБ (А) ниже, чем в сильный дождь, но значительно превышает общий звуковой фон.

По санитарным нормам допустимый уровень громкости равен 45 дБ (А). Исходя из этого требования, линии сверхвысокого напряжения должны находиться по отношению к населенным пунктам на расстоянии не менее чем на 300 м. На таком расстоянии уровни громкости при влажных проводах ниже допустимого уровня.

Внутренняя изоляции. Общие представления и свойства

Внутренней изоляцией называют те элементы или участки электроизоляционной конструкции, в пределах которых изоляционные промежутки между проводниками заполнены газообразными, жидкими или твердыми диэлектрическими материалами или их комбинацией, но не атмосферным воздухом. Изоляционные промежутки в атмосферном воздухе составляют внешнюю изоляцию.

Чтобы пояснить смысл приведенного выше определения, рассмотрим типовую для многих видов оборудования конструкцию, схематически показанную на рис. 1, — ввод высокого напряжения внутрь металлического заземленного корпуса, заполненного жидким диэлектриком или газом.

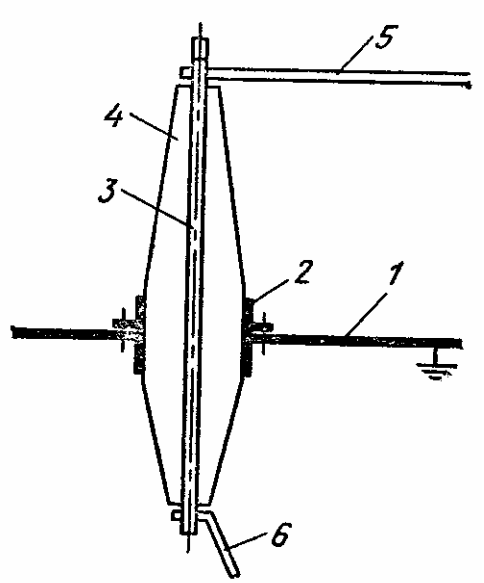


Рис. 1. Ввод высокого напряжения

1 – стенка корпуса,
2 – фланец,
3 – токоведущий стержень,
4 – изоляционное тело,
5 – шина высокого напряжения,
6 - проводник

На заземленной стенке корпуса 1 установлен ввод (проходной изолятор), состоящий из заземленного фланца 2, токоведущего стержня 3, находящегося под высоким напряжением, и изоляционного тела 4, выполненного из диэлектрических материалов. Конструкция последнего может быть сложной и включать ряд элементов из различных материалов, например фарфоровые покрышки, бумажный остов с системой дополнительных электродов, пропитанный маслом, и т. д.

Верхняя часть ввода находится в воздухе, нижняя — внутри корпуса, заполненного, например, трансформаторным маслом. В воздухе к токоведущему стержню присоединена шина 5 высокого напряжения; в масле присоединен проводник 6, идущий к основной функциональной части устройства (в трансформаторе, например, к обмотке).

В состав ***внутренней изоляции*** здесь входят: изоляционное тело 4, промежуток в масле между проводником 6 и стенкой 1. К ***внешней изоляции*** этой конструкции относится промежуток в атмосферном воздухе между шиной 5 и стенкой 1.

В рассмотренном примере структура внутренней изоляции достаточно проста. В реальных установках высокого напряжения она может быть значи-

тельно сложнее и включать в себя ряд различных по конструкции, условиям работы и характеристикам участков изоляции.

Применение в установках высокого напряжения твердых, жидких или специальных газообразных диэлектрических материалов, а не окружающего воздуха обусловлена рядом причин:

1) эти материалы обладают значительно ***более высокой электрической*** прочностью (в 5—10 раз и более), что позволяет резко сократить изоляционные расстояния между проводниками, а значит и снизить габариты;

2) внутренняя изоляция выполняет функцию ***механического крепления*** проводников, находящихся под напряжением, то есть она должна обладать необходимой механической прочностью.

3) через внутреннюю изоляцию осуществляется ***отвод тепла***, выделяющегося при прохождении рабочих токов (это относится в первую очередь к трансформаторному маслу).

Внутренняя изоляция (твердая, жидкая или газообразная) обладает ***следующими свойствами***:

1) сложный характер зависимости электрической прочности от длительности воздействия напряжения;

2) в большинстве случаев необратимость разрушения при пробое;

3) влияние на нее механических, тепловых и других внешних воздействий.

Комбинирование диэлектрических материалов во внутренней изоляции

К диэлектрическим материалам, используемым для внутренней изоляции оборудования высокого напряжения предъявляются следующие требования.

1. Они должны обеспечивать высокие (кратковременную и длительную) ***электрические прочности***. Это означает, что они должны обладать определенным комплексом свойств: иметь высокие пробивные напряженности в области чисто электрического пробоя, малые диэлектрические потери, обеспечивать отсутствие в изоляции газовых включений.

3. Они должны обладать хорошими ***тепловыми свойствами:*** выдерживать рабочие температуры активных частей электрооборудования, обладать необходимой теплопроводностью и стойкостью к тепловому старению.

4. Иметь необходимые ***механические свойства***. Это требование обусловлено не только значительными нагрузками на изоляцию в эксплуатации, но и нагрузками, возникающими в процессе изготовления самой изоляции и конструкции в целом.

5. Должны обладать ***технологичностью*** в производстве изоляционных конструкций.

6. Должны удовлетворять ***экологическим требованиям***: они не должны содержать или образовывать в процессе эксплуатации токсичные продукты; после отработки всего срока службы они должны легко утилизироваться.

7. Наконец, диэлектрические материалы должны быть ***недефицитны-***

ми и недорогими.

Весь комплекс перечисленных требований наилучшим образом удовлетворяется при использовании в составе внутренней изоляции ***комбинации из нескольких материалов***, дополняющих друг друга и выполняющих несколько различные функции.

Необходимая механическая прочность конструкции достигается использованием твердых диэлектриков. Эти материалы имеют и высокую электрическую прочность. Однако они обладают низкой теплопроводностью, а также требуют больших трудозатрат на механическую обработку. Кроме того, невозможно обеспечить надежное сочленение деталей из таких материалов друг с другом или с электродами без образования воздушных зазоров, в которых под действием рабочего напряжения могут развиваться частичные разряды, вызывающие старение изоляции.

Указанные недостатки устраняются, если в комбинации с твердыми материалами использовать высокопрочные газы под давлением или жидкие диэлектрики. Газы и жидкости легко заполняют изоляционные промежутки любой конфигурации и повышают электрическую прочность. Кроме того, жидкие диэлектрики используются как теплоносители для охлаждений всей конструкции.

Основные виды внутренней изоляции

Основу ***масло-барьерной изоляции (МБИ)*** составляет минеральное (трансформаторное) масло, которое заполняет изоляционные промежутки с электродами любой конфигурации и обеспечивает хорошее охлаждение конструкции за счет самопроизвольной или принудительной циркуляции. МБИ используется в качестве главной изоляции в силовых трансформаторах, автотрансформаторах и реакторах.

В состав МБИ входят твердые диэлектрические материалы: электрокартон, кабельная бумага и др. Они используются для обеспечения механической прочности конструкции, а также для повышения электрической прочности МБИ. С целью повышения электрической прочности МБИ в масляных промежутках устанавливают барьеры из электрокартона толщиной 2,0—3,0 мм, покрывают электроды полимерными материалами или наносят на них слои бумажных лент.

Введение барьеров в масляный промежуток приводит к увеличению напряженности в масле на 5—7%, так как диэлектрическая проницаемость пропитанного маслом картона примерно в 1,5 раза выше, чем масла. Тем не менее, барьеры повышают электрическую прочность МБИ на 30—50 %. Объяснить это можно следующим образом. В технически чистом масле неизбежно присутствуют взвешенные твердые примесные частицы. Такие частицы в электрическом поле втягиваются в области повышенных напряженностей, которые образуются у поверхностей электродов. Около частиц из-за различия диэлектрических проницаемостей происходит усиление электрического поля, что приводит к снижению электрической прочности масляного

промежутка. Барьеры, разделяя промежуток, ограничивают количество примесных частиц, которые могут приближаться к электродам и участвовать в инициировании разрядного процесса.

К достоинствам МБИ относятся сравнительная простота конструкции и технологии ее изготовления, интенсивное охлаждение активных частей трансформаторов (обмоток, магнитопроводов), а также возможность восстновления качества изоляции в эксплуатации путем сушки конструкции и замены масла.

Твердый диэлектрик может использоваться отдельно, а также входить в состав комбинированной изоляции.

Одной из особенностей твердой изоляции является возможность ее теплового пробоя вследствие затрудненного теплоотвода. Поэтому твердые диэлектрики должны обладать малыми диэлектрическими потерями, высокой нагревостойкостью и хорошей теплопроводностью.

Различают неорганическую изоляцию и органическую.

Неорганическая изоляция устойчива к внешним воздействиям, долговечна и имеет невысокую стоимость. Это: керамика, стеклотекстолит, слюда, и получаемая на ее основе микалента, асбест.

Органическая изоляция создается на основе целлюлозы, синтетических материалов или каучука. Это гетинакс, текстолит, фибра (спрессованная бумага, обработанная хлористым цинком), высушенная и пропитанная древесина твердых пород, полиэтилен, компаунды на основе эпоксидной смолы.

Основным недостатком изоляции на основе целлюлозы являются ее высокая гигроскопичность и низкая нагревостойкость.

Бумажно-масляная изоляция (БМИ). Исходными материалами служат кабельная или конденсаторная бумага и минеральное масло (трансформаторное, кабельное, конденсаторное).

Основу БМИ составляют слои бумаги, которые могут быть сплошными или состоять из отдельных лент. Слои ленточной изоляции образуются путём плотной намотки на электрод бумажной ленты внахлест (положительное перекрытие) или с зазором между соседними витками (отрицательное перекрытие). После плотной намотки необходимого числа слоев бумаги изоляция подвергается сушке под вакуумом при температуре 100—120 °С. Затем под вакуумом производится пропитка тщательно дегазированным маслом.

Поскольку БМИ многослойна, то в ней случайный дефект твердого диэлектрика (бумаги) заведомо ограничен пределами одного слоя и многократно перекрывается другими слоями.

БМИ имеет высокую кратковременную и длительную электрические прочности. По этому показателю она превосходит все другие виды внутренней изоляции. К числу достоинств БМИ относятся малые диэлектрические потери, возможность механизации процесса наложения слоев бумаги и относительно низкая стоимость.

Недостатками БМИ являются невысокая допустимая рабочая температура (не более 90 °С), горючесть. Бумажно-масляную изоляцию нельзя использовать в конструкциях с электродами сложной формы, когда возможно

образование складок и морщин в слоях бумаги. Изоляция требует надежной защиты от попадания влаги, так как увлажнение влечет за собой резкое ухудшение ее характеристик.

В настоящее время разновидности БМИ широко используются в силовых конденсаторах, во вводах на напряжения от 110 до 1150 кВ, в силовых кабелях с номинальными напряжениями от 35 до 500 кВ, в силовых трансформаторах, автотрансформаторах и реакторах (в качестве витковой изоляции), в измерительных трансформаторах тока.

Газовая и вакуумная изоляция.

Применение газовой изоляции дает ряд преимуществ по сравнению с твердыми и жидкими диэлектриками:

- газовая изоляция отличается малыми диэлектрическими потерями;
- практически не изменяет своих свойств в процессе эксплуатации;
- ее применение приводит к резкому снижению массы конструкции;
- конструкция устройства становится пожаробезопасной.

В настоящее время в качестве изоляции применяются воздух, азот и шестифтористая сера (SF_6) или элегаз. Из них наибольшей электрической прочностью, превышающей прочность азота и воздуха примерно в 2,5 раза, обладает элегаз. При увеличении давления электрическая прочность элегаза возрастает почти пропорционально давлению и может быть выше электрической прочности жидких и некоторых твердых диэлектриков.

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

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

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

Возникновение разряда в конструкциях с *вакуумной* изоляцией связано только с процессами на электродах. Вакуумная изоляция используется в установках и приборах, где вакуум является рабочей средой. Это — ускорители, космические двигатели, электростатические сепараторы, электровакуумные приборы. Вакуумная изоляция применяется также в конденсаторах на 20—50 кВ, в выключателях, вакуумных разрядниках и реле.

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

Пробой жидких диэлектриков

Явление пробоя в жидких диэлектриках, в основном, связано с наличием примесей (воды, газов, твердых частиц), т. к. предельно очищенные жидкости получить очень трудно.

Теория пробоя в жидких диэлектриках может быть применена к максимально очищенным жидкостям. В этих диэлектриках при высоких значениях напряженности электрического поля происходит вырывание электронов с поверхности катода (холодная эмиссия) и ионизации молекул, также как и в газах, за счет явления ударной ионизации.

В жидких диэлектриках, содержащих газовые включения, явление пробоя начинается с ионизации газовых включений. Ионизационные потери, в виде тепла, вызывают нагрев жидкости на границе с газовыми включениями, что приводит к вскипанию микрообъемов жидких диэлектриков, примыкающих к включению. Объем газовых включений увеличивается, они сливаются между собой, образуя ионизированный канал между электродами, по которому и проходит разряд при пробое.

Наличие воды в жидком диэлектрике редко снижает ее электрическую прочность. Под действием электрического поля молекулы воды поляризуются, т.е. становятся дипольными, притягиваются друг к другу разноименными концами, образуют между электродами проводящие цепочки, по которым и проходит пробой.

Твердые частицы (сажа, волокна и другие) снижают электрическую прочность жидкого диэлектрика. Под действием поля эти частицы или, если они полярные, образуют проводящие мостики, или искажают поле внутри диэлектрика, т.е. делают его более резко неоднородным.

Для повышения электрической прочности жидкого диэлектрика его подвергают очистке. Так, например, у трансформаторного масла после тщательной очистки электрическая прочность увеличивается в 5 - 6 раз.

Пробой твердых диэлектриков

Различают четыре вида пробоя твердых диэлектриков: электрический пробой макроскопически однородных диэлектриков; электрический пробой неоднородных диэлектриков; тепловой (электротепловой) пробой; электрохимический пробой.

Электрический пробой макроскопически однородных твердых диэлектриков по своей природе является чисто электронным процессом, связанным с явлением ударной ионизации. Для однородных диэлектриков имеется заметная разница в пробивных напряжениях при воздействии однородного и неоднородного полей.

Электрический пробой неоднородных диэлектриков характерен для диэлектриков, которые содержат газовые включения. Пробивные напряжения неоднородных диэлектриков, в условиях однородного и неоднородного полей, невысоки и мало отличаются друг от друга.

Электрическая прочность неоднородных диэлектриков в однородном поле зависит от толщины диэлектрика и площади электродов: чем меньше площадь электродов и толщина диэлектрика, тем меньше инородных включений, попадающих в пределы действия поля и, тем самым, больше его электрическая прочность. Электрическая прочность неоднородных диэлектриков мало зависит от температуры до некоторого ее значения. Выше этого значения наблюдается заметное снижение электрической прочности, что говорит о проявлении механизма теплового пробоя.

Тепловой пробой возникает в том случае, когда количество теплоты, выделяющегося в диэлектрике, вследствие диэлектрических потерь, превышает количество теплоты, которое может рассеиваться диэлектриком во внешней среде. При этом нарушается тепловое равновесие и процесс приобретает лавинообразный характер, т. к. диэлектрические потери в твердых диэлектрика, как правило, сильно возрастают с ростом температуры. Явление теплового пробоя сводится к разогреву материала в электрическом поле до температуры плавления, обугливания и пр.

Электрохимический пробой имеет существенное значение при повышенных температурах и высокой влажности воздуха. Он наблюдается как при постоянном напряжении, так и при переменном напряжении низкой частоты, когда в материале развивается необратимые процессы, связанные с уменьшением сопротивления изоляции (электрохимическое старение изоляции). Электрохимический пробой связан с явлением электропроводности и для своего развития требует длительного времени.

Электрохимический пробой во многом зависит от материала электродов. Например, электроды из серебра, способного диффундировать в керамику, понижают ее пробивное напряжение.

Электрохимической пробой наблюдается как у неорганических, так и у многих органических материалов.

Зависимость электрической прочности внутренней изоляции от длительности воздействия напряжения

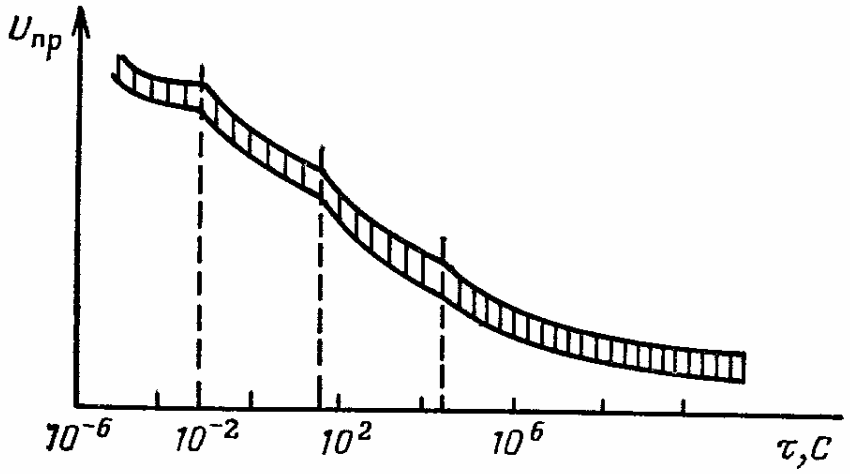


Рис. 2. Зависимость пробивного напряжения внутренней изоляции от времени воздействия напряжения

На рис. 2 приведена характерная для внутренней изоляции зависимость пробивного напряжения $U_{пр}$ от времени τ приложения напряжения.

Сложный вид этой зависимости объясняется тем, что при разных временах τ процессы в изоляции, приводящие к пробою, имеют различную физическую природу.

Пробивное напряжение $U_{пр}$ величина случайная, разбросы которой характеризуются среднеквадратическим отклонением σ. Это объясняется как природой процессов развития пробоя, так и неконтролируемыми случайными различиями между внешне одинаковыми изоляционными конструкциями.

Зависимость $U_{пр} = f(\tau)$, может быть разделена на несколько участков, границы которых указаны ориентировочно.

При малых временах τ, т. е. в диапазоне от единиц микросекунд до нескольких миллисекунд, в изоляции возможен так называемый чисто ***электрический пробой***. При этом электроны в сильном электрическом поле приобретают энергию, достаточную для ионизации нейтральных молекул и образования потока электронов. За счет энергии, выделяющейся при взаимодействии потока электронов с молекулами диэлектрика, происходит разрушение диэлектрика с образованием проводящего канала.

При $\tau \rhd 10^{-3}$ с для внутренней изоляции, содержащей большие объемы жидкого диэлектрика, может наблюдаться некоторое снижение $U_{пр}$. Это происходит вследствие того, что с увеличением τ сильнее проявляется влияние ***примесных твердых частиц***, неизбежно присутствующих в жидких диэлектриках. Такие частицы имеют, более высокую, чем у жидкости, диэлектрическую проницаемость. Поэтому около них происходит некоторое увеличение напряженности в жидкости, что влечет за собой снижение величины $U_{пр}$. Под действием электрического поля примесные частицы перемещаются в области повышенных напряженностей. Чем больше время τ, тем дальше успевают сместиться частицы, тем больше вероятность появления их в наиболее напряженной области изоляции и, следовательно, ниже пробивное напряжение $U_{пр}$.

Следующий участок кривой $U_{пр} = f(\tau)$ – область ***теплового пробоя***. В зависимости от размеров и свойств изоляции и температуры окружающей среды он может занимать диапазон от десятков секунд до нескольких часов.

Последний участок зависимости $U_{пр} = f(\tau)$ соответствует временам τ от нескольких минут или часов до 10—15 лет и более. Это область электрического ***старения изоляции***. Интенсивность процессов старения может быть очень малой, поэтому время, необходимое для постепенного разрушения изоляции до пробоя, может исчисляться годами.

Длительная и кратковременная электрическая прочность

Для инженерной практики интерес представляет не вся зависимость $U_{пр} = f(\tau)$, а те ее участки, которые соответствуют реально возможным в эксплуатации электрическим воздействиям.

В связи с этим для внутренней изоляции различают:

1) кратковременную электрическую прочность при воздействии стандартного грозового импульса;

2) кратковременную электрическую прочность при воздействии внутренних перенапряжений (при воздействии коммутационных импульсов нормированной формы или при одноминутном приложении напряжения частоты 50 Гц);

3) длительную электрическую прочность, под которой понимается электрическая прочность при непрерывном воздействии рабочего напряжения в течение времени, равного сроку службы конструкции.

Электрическая прочность внутренней изоляции при всех временах τ должна быть выше возможных в эксплуатации электрических воздействий.

Старение изоляции

В процессе эксплуатации на изоляцию воздействуют ***электрические, механические и тепловые нагрузки***, вызывающие постепенное ухудшение ее свойств, связанное с уменьшением сопротивления изоляции, ростом диэлектрических потерь, снижением электрической прочности. Процесс ухудшения свойств называют ***старением изоляции***. Эти изменения носят, как правило, необратимый характер и завершаются пробоем изоляции, что ограничивает сроки службы изоляционных конструкций.

Различают четыре основных вида воздействия на изоляцию и ***четыре процесса*** старения изоляции:

1) электрические нагрузки, связанные с возможной ионизацией при большой напряженности электрического поля – электрическое старение изоляции;

2) тепловые нагрузки, приводящие постепенному разложению или появлению трещин в изоляции – тепловое старение изоляции;

3) механические нагрузки, связанные с возникновением и развитием трещин в твердой изоляции – механическое старение;

4) проникновение влаги из окружающей среды – увлажнение изоляции.

Электрическое старение твердой изоляции происходит из-за возникновения разрядных процессов в толще изоляции. Основной причиной электрического старения внутренней изоляции являются ***частичные разряды***, то есть такие разрядные процессы в изоляции, которые распространяются лишь на часть изоляционного промежутка. Они возникают в ослабленных местах изоляции: в газовых включениях, в местах резного усиления напряженности поля. Наибольшую опасность представляют частичные разряды в газовых

включениях, так как они возникают при меньших напряжениях, чем разряды в жидких или твердых компонентах твердой изоляции. Последнее обстоятельство связано с меньшей диэлектрической проницаемостью газового промежутка и соответственно большей напряженностью электрического поля в нем, а также с малой электрической прочностью газа по сравнению с твердой или жидкой изоляцией.

Закономерности развития частичных разрядов можно проиллюстрировать схемой замещения, изображенной на рис. 4.1, где изображен газовый пузырь в твердой изоляции и схема замещения изоляции.

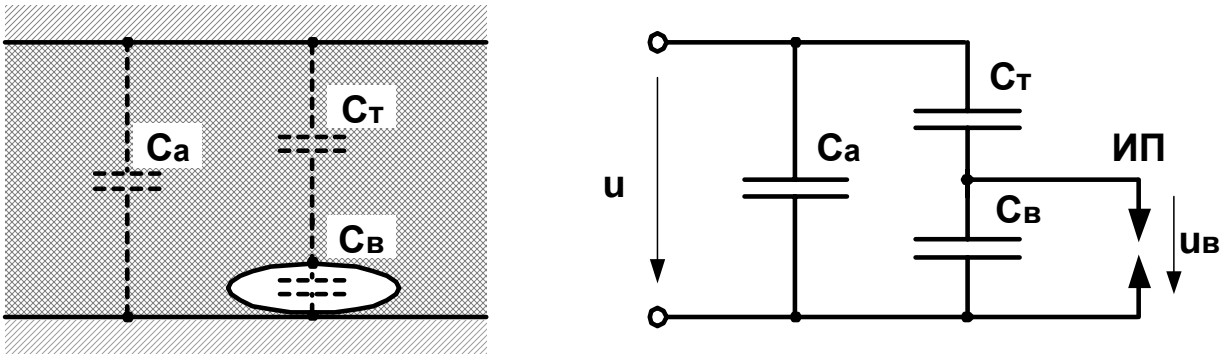


Рис. 3. Схема развития частичных разрядов в газовом включении

На рис. 3 $C_в$ – емкость газового включения, $C_т$ – емкость части изоляции, включенной последовательно с газовым включением, $C_а$ – емкость оставшегося массива изоляции.

При подаче на изоляцию переменного напряжения на воздушном включении также будет изменяющееся во времени напряжение:

$$u_B = u \frac{C_T}{C_T + C_B} .$$

При достижении этим напряжением пробивного напряжения газового включения $U_{в\text{-}пр}$ происходит пробой газового включения с резким снижением напряжения на нем до уровня напряжения гашения $U_{в\text{-}г}$, которое меньше пробивного напряжения.

После этого, если напряжение на всей изоляции продолжает возрастать, то снова начинается рост напряжения и на газовом включении и может произойти новый пробой, то есть в ***газовом включении происходят многократные пробои*** промежутка. Графическое изображение зависимости напряжений от времени показаны на рис. 4.

Эффективным средством борьбы с частичными разрядами является ***пропитка изоляции***. Замена воздуха жидким диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_г>1$ увеличивает емкость $C_в$, снижая напряжение на воздушном включении; кроме того, электрическая прочность жидкого диэлектрика существенно больше электрической прочности газа.

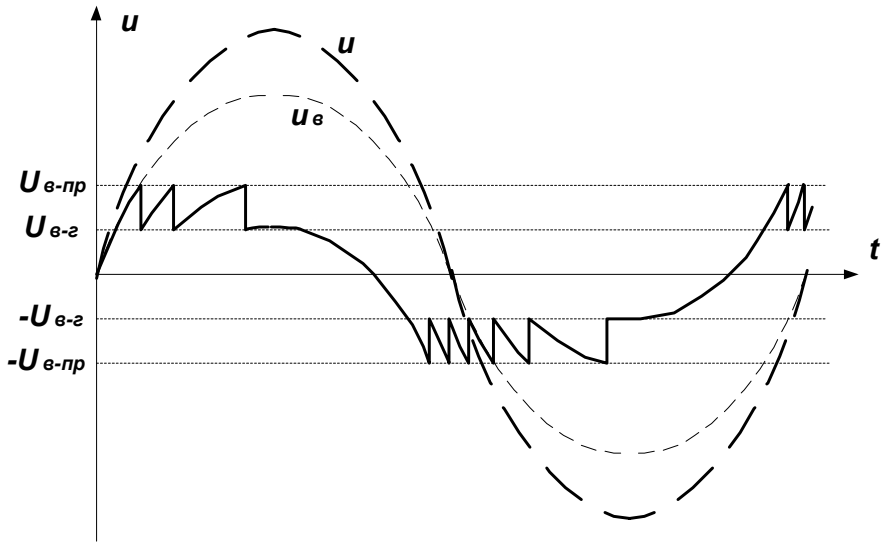


Рис. 4. Зависимость напряжений от времени при частичных разрядах

Тепловое старение внутренней изоляции возникает за счет ускорения различных химических реакций при рабочих температурах изоляции, обычно лежащих в пределах от 60°С до 130°С. Химические реакции приводят к постепенному изменению структуры и свойств материалов и к ухудшению изоляции в целом.

Для твердой изоляции наиболее характерным является постепенное снижение механической прочности в процессе теплового старения, что приводит к повреждению изоляции под действием механических нагрузок и затем к ее пробою. В жидких диэлектриках продукты разложения загрязняют изоляцию и снижают ее электрическую прочность. Для органической изоляции повышение температуры на 10°С снижает срок службы изоляции вдвое; в сложной изоляции силовых трансформаторов процесс теплового старения протекает еще быстрее.

Старение изоляции возникает и ***при механических нагрузках*** на твердую изоляцию. Сущность этого вида старения заключается в том, что в напряженном материале возникает упорядоченное движение локальных микродефектов, и за счет этого образуются и постепенно увеличиваются в размерах микротрещины. При действии сильных электрических полей в микротрещинах возникают частичные разряды, ускоряющие разрушение изоляции.

Увлажнение изоляции может рассматриваться как одна из форм старения изоляции. Влага проникает в изоляцию главным образом из окружающего воздуха. При этом происходит уменьшение сопротивления изоляции, рост диэлектрических потерь, связанный с дополнительным нагревом изоляции и ускоряющий тепловое старение изоляции.

Увлажнение – процесс в принципе обратимый, влага может быть удалена из изоляции сушкой. Однако сушка крупногабаритных конструкций требует вывода оборудования из строя на длительное время, а в ряде случаев извлечение влаги из изоляции затруднено или невозможно, например, практически не поддается сушке бумажно-масляная изоляция кабелей, вводов и

другого оборудования.

Для снижения увлажнения применяют герметизацию конструкций, воздухоосушители, гибкие диафрагмы и другие методы.

Регулирование электрического поля

Целью регулирования электрических полей является повышение эффективности использования изоляции. Для надежной эксплуатации изоляции необходимо, чтобы максимальные напряженности поля не превосходили допустимого значения, т. е. $E_{\max} \le E_{доп}$. Если выразить $E_{\max}$ через коэффициент неоднородности электрического поля $K_н$ и среднюю напряженность поля $E_{ср} = U/d$ (U – рабочее напряжение; d — толщина изоляции), то получим

$$\frac{U}{d} K_н \le E_{доп} \text{ или } d \ge \frac{U}{E_{доп}} K_н .$$

То есть при заданном значении $E_{доп}$ необходимая толщина изоляции пропорциональна коэффициенту неоднородности поля. Иными словами, толщина изоляции минимальна, если поле однородно. Поэтому основной задачей регулирования электрических полей является ***снижение коэффициента неоднородности***.

Регулирование электрического поля осуществляется при помощи градирования, использования конденсаторных обкладок или полупроводниковых покрытий.

Градирование изоляции

Одним из способов регулирования электрического поля в конструкциях с бумажно-масляной изоляцией является ***градирование изоляции***, которое осуществляется посредством комбинации материалов с различными диэлектрическими проницаемостями. Этот способ широко применяется в кабельной изоляции.

Рассмотрим изоляцию одножильного кабеля с токопроводящей жилой радиусом r_1. При использовании однородного диэлектрика распределение напряженностей поля в радиальном направлении будет характеризоваться кривой 1 на рис. 5, б. Если же применить два изоляционных материала с диэлектрическими проницаемостями ε_{r1} и ε_{r2} ($\varepsilon_{r1} \rhd \varepsilon_{r2}$), то распределение напряженностей поля будет соответствовать кривой 2.

Коэффициент неоднородности поля при градировании изоляции ниже, чем для однотипной изоляции, поэтому толщина градированной изоляции при заданном значении $E_{доп}$ оказывается меньше.

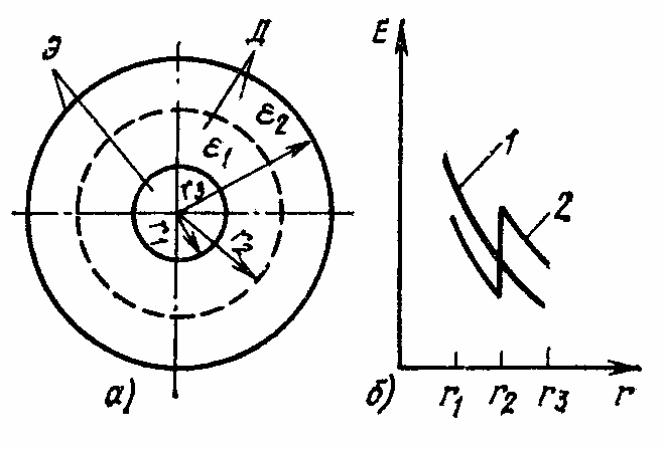


Рис. 5. Регулирование электрического поля с помощью градирования изоляции:
а – схема изоляции: Э – электрод, Д – диэлектрик;
б – распределение напряженности в радиальном направлении: 1 – в неградированной изоляции; 2 – в градированной изоляция

Градирование бумажно-масляной изоляции кабелей осуществляется с помощью различных сортов бумаги. Обычно градирование производится на два слоя, при этом внутренний слой наматывается более плотной бумагой. Градирование на большее число слоев применяется редко и только в кабелях сверхвысокого напряжения, например в некоторых кабелях, с номинальным напряжением 500 кВ используются 3—5 слоев.

Применение конденсаторных обкладок

Регулирование электрического поля в конструкциях с бумажно-масляной изоляцией может осуществляться с помощью так называемых ***конденсаторных обкладок,*** представляющих собой дополнительные электроды из металлической фольги, которые располагаются в толще изоляции между главными электродами. В результате образуется цепочка последовательно включенных конденсаторов, емкости которых при переменном напряжении (или сопротивления изоляции между обкладками при постоянном напряжении) определяют распределение напряженностей в изоляции.

Путем изменения размеров, числа и взаимного расположения конденсаторных обкладок можно изменять емкости последовательно включенных конденсаторов, регулируя тем самым характер распределения напряженностей.

Конденсаторные обкладки могут располагаться: в области основной изоляции между электродами для регулирования поля как в радиальном, так ив осевом направлении (рис. 6), а также в области между краями электродов для выравнивания электрического поля между ними.

При достаточно большом количестве обкладок расстояние между обкладками мало (2—4 мм), поэтому в пределах каждого слоя разница между максимальной и минимальной напряженностями поля незначительна и, таким образом, напряженность поля в радиальном направлении практически постоянна. Это позволяет существенно уменьшить диаметр изоляционной конструкции.

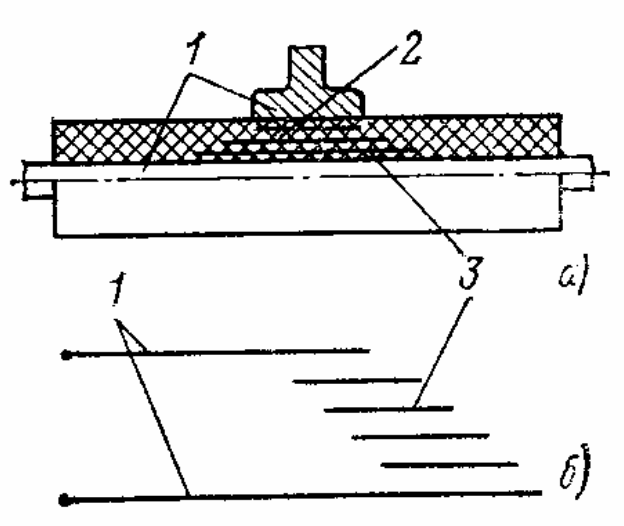


Рис. 6. Варианты расположения конденсаторных обкладок в изоляции:
а – между электродами для регулирования в области основной изоляции;
б – между электродами для регулирования поля между их краями;
1 – электроды; 2 – диэлектрик;
3 – конденсаторные обкладки

Применение полупроводниковых покрытий

Схема конструкции, в которой полупроводящее покрытие используется для ослабления поля у острого края одного их электродов, показана на рис. 7. В этой конструкции покрытие создает участок длиной l_n с удельным поверхностным сопротивлением $\rho_n \lhd\lhd \rho_s$, где ρ_s — удельное поверхностное сопротивление изоляции без покрытий.

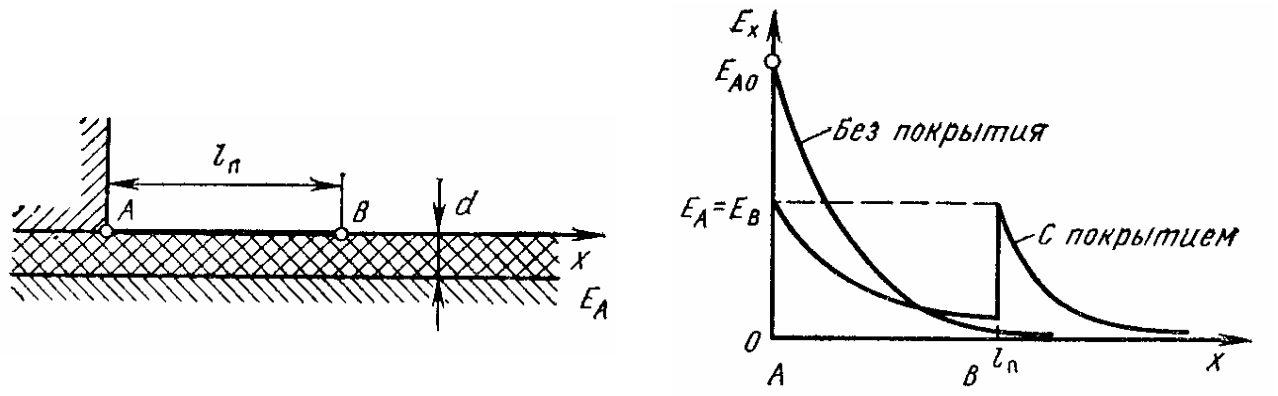


Рис. 7. Использование полупроводящего покрытия

Вследствие того что $\rho_n \lhd\lhd \rho_s$, составляющая напряженности E_A вдоль поверхности изоляции в точке А снижается. Но у конца покрытия (в точке В) образуется новая область с резконеоднородным полем. Однако емкостные токи, протекающие по полупроводящему покрытию, вызывают падения напряжения вдоль покрытия. Поэтому напряженность E_B в точке В получается ниже, чем напряженность E_{A0} в точке А при отсутствии полупроводящего покрытия. Подбором значений ρ_n и l_n можно добиться снижения напряженностей E_A и E_B до допустимых уровней.

Полупроводящие покрытия используются для ослабления краевого эффекта главным образом в статорных обмотках крупных вращающихся машин (в местах выхода стержней из пазов статора). Значительно реже этот метод применяется в проходных изоляторах.

Недостаток этого метода регулирования электрических полей состоит в том, что эффект регулирования зависит от частоты. Поэтому он будет разным при воздействии рабочего напряжения и кратковременных перенапряжений.

Изоляция открытых и закрытых распредустройств

Изоляция вводов высокого напряжения

Проходные изоляторы высокого напряжения, называемые иначе вводами, имеют ***неблагоприятное расположение электродов*** с большой напряженностью электрического поля. Наибольшая напряженность электрического поля наблюдается у края фланца изолятора (рис. 1), где велики и нормальная к поверхности изолятора составляющая напряженности электрического поля, и тангенциальная составляющая. В этом месте возможно возникновение короны, скользящих разрядов, приводящих к перекрытию и к радиальным пробоям. Довольно часто при эксплуатации появляются наиболее опасные ***механические нагрузки на изгиб*** изолятора. Кроме того, на изолятор воздействую ***тепловые нагрузки*** за счет нагрева токоведущих частей и диэлектрических потерь в изоляционном теле.

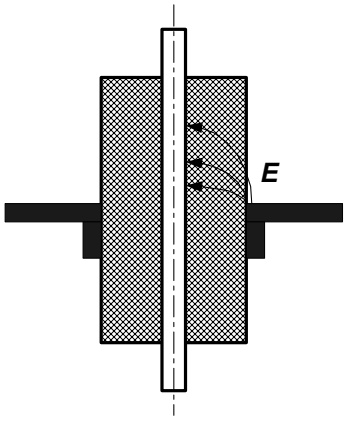


Рис. 1. Схематическое изображение проходного изолятора

Для создания более равномерного электрического поля используются конструкции ***конденсаторного типа***, в которых требуемое распределение напряжения по изоляционной конструкции принудительно осуществляется при помощи металлических обкладок, закладываемых в изоляцию в процессе ее намотки (см. ранее в регулировании электрического поля). Такая конструкция уменьшает требуемые размеры ввода, особенно его диаметр, что ***улучшает условия отвода тепла***.

По типу выполнения изоляции проходные изоляторы делятся на сплошные фарфоровые, бумажно-бакелитовые, маслобарьерные и бумажно-масляные (конденсаторного типа).

Для внутренней установки на напряжение ***до 35 кВ*** используются ***фарфоровые армированные*** проходные изоляторы, внутри которых проходит

токоведущий стержень, или ***бумажно-бакелитовые*** проходные изоляторы конденсаторного типа. Бумажно-бакелитовые изоляторы изготавливаются путем намотки бумаги, пропитанной бакелитовой смолой, с обкладками из металлической фольги, обжимаются и выдерживаются при температуре 160^{o}С, при которой происходит полимеризация смолы. Недостатками бумажно-бакелитовых вводов являются малая влагостойкость и наличие газовых включений, поэтому на напряжения выше 35 кВ их не применяют.

На напряжении 110 кВ и выше используются конденсаторные вводы с маслобарьерной или бумажно-масляной изоляцией. В связи с более простой технологией изготовления наиболее распространены последние. В этой конструкции на токоведущий стержень наматывается изоляция из кабельной бумаги, а между слоями бумаги закладываются металлические обкладки из алюминиевой фольги. Бумага высушивается под вакуумом и пропитывается трансформаторным маслом. Сверху конструкция закрывается фарфоровыми покрышками, укрепленными на металлическом фланце. Пространство внутри покрышек заполняется трансформаторным маслом.

Изоляция трансформаторов тока

Конструкция изоляции трансформатора тока зависит от его номинального напряжения. У трансформаторов тока номинальным напряжением 6—10 кВ применяется ***литая эпоксидная*** изоляция, которая обеспечивает необходимую электрическую и механическую прочность конструкции при малых габаритах.

Для изоляции трансформаторов тока на номинальное напряжение 35 кВ и выше изоляция обмоток производится ***кабельной бумагой***, наматываемой вполнахлеста. Обмотки с магнитопроводом помещаются в фарфоровую покрышку. Внутренняя полость трансформатора после вакуумной сушки заполняется минеральным маслом.

Конструкция изоляции трансформаторов тока на номинальные напряжения 110—220 кВ принципиально не отличается от изоляции трансформаторов тока на 35 кВ.

При напряжениях более 220 кВ применяются ***каскадные схемы***, то есть вторичная обмотка верхней ступени трансформатора питает первичную обмотку нижней ступени. Изоляция обмоток — бумажно-масляная.

Помимо конструкций опорного типа имеются трансформаторы тока, встроенные во вводы силовых трансформаторов и выключателей.

Изоляция масляных выключателей

Внутренняя изоляция масляных выключателей выполняется с большими запасами электрической прочности, потому что в эксплуатации при затяжном характере гашения электрической дуги масло в дугогасительных камерах и за их пределами сильно загрязняется углеродистыми частицами, которые оседают на изоляции и снижают ее электрическую прочность.

Внутренняя изоляция масляных выключателей состоит из масляных промежутков между токоведущими частями и баком выключателя и изоляционных барьеров (МБИ), а также из изоляции штанги и ее направляющего устройства. Штанги выключателей изготовляются из дерева твердых пород, пропитанных трансформаторным маслом, а направляющие штанг — из гетинакса.

Снижение электрической прочности изоляции масляных выключателей может происходить из-за влаги, поглощаемой им из атмосферы. Влага частично поглощается изоляционными деталями, а также выпадает на дно выключателя и в холодное время года замерзает. При оттепелях лед отделяется от днища бака, всплывает на поверхность масла и образует проводящую «дорожку» от токоведущих деталей к баку выключателя. Для предотвращения всплытия замерзшего конденсата устанавливается специальная перегородка, которая препятствует всплытию льда. При понижении температуры окружающего воздуха до -20° включается устройство подогрева масла.

Изоляция воздушных выключателей

Главной изоляцией выключателя является опорный ***фарфоровый изолятор,*** установленный на металлическом основании. На опорном фарфоровом изоляторе монтируется металлическая дугогасительная камера с эпоксидными вводами.

Для подачи сжатого воздуха в дугогасительную камеру и управления контактами выключателя внутри опорного фарфорового изолятора проходят изоляционные стеклопластиковые воздухопроводы.

При колебаниях температуры окружающего воздуха на внутренней поверхности опорных изоляторов может конденсироваться влага, что приведет к снижению разрядного напряжения и перекрытию по внутренней поверхности изоляторов. Для предотвращения конденсации влаги внутренние полости опорных изоляторов вентилируются (продуваются) сухим сжатым воздухом.

Изоляция силовых конденсаторов

Силовые конденсаторы ***применяют*** в следующих случаях:

1) в силовых сетях промышленной частоты высокого и низкого напряжений частотой 50 Гц (косинусные конденсаторы, конденсаторы продольной емкостной компенсации, конденсаторы емкостного отбора мощности);

2) в силовых установках повышенных частот (электротермические установки частотой до 10 кГц);

3) в установках постоянного и пульсирующего напряжений;

4) в установках импульсного напряжения.

Основное ***характерное отличие силовых конденсаторов*** от прочих конденсаторов – сравнительно большие протекающие через них токи, которые даже при малых диэлектрических потерях приводят к заметному нагреву конденсаторов.

Силовые конденсаторы состоят ***из секций*** в основном рулонного типа. Секции наматывают на цилиндрическую оправку, и после снятия с оправки сплющивают, либо оставляют на цилиндрическом изоляционном каркасе, получая цилиндрическую секцию. В зависимости от номинального напряжения и емкости конденсатора его секции соединяются параллельно, последовательно или смешанно. Пакет помещают в корпус, пропитывают и герметизируют для предотвращения попадания воздуха и влаги.

Секции конденсаторов выполняются либо ***со скрытой, либо с выступающей фольгой*** (рис. 2). Конструкцию с выступающей фольгой применяют для улучшения теплоотвода и для уменьшения индуктивности секций. Для увеличения напряжения применяют ***конструкцию со «слепой» промежуточной фольгой***, при этом секция состоит из нескольких подсекций, соединенных последовательно, а выводы имеют только первая и последняя фольга (рис. 2, г).

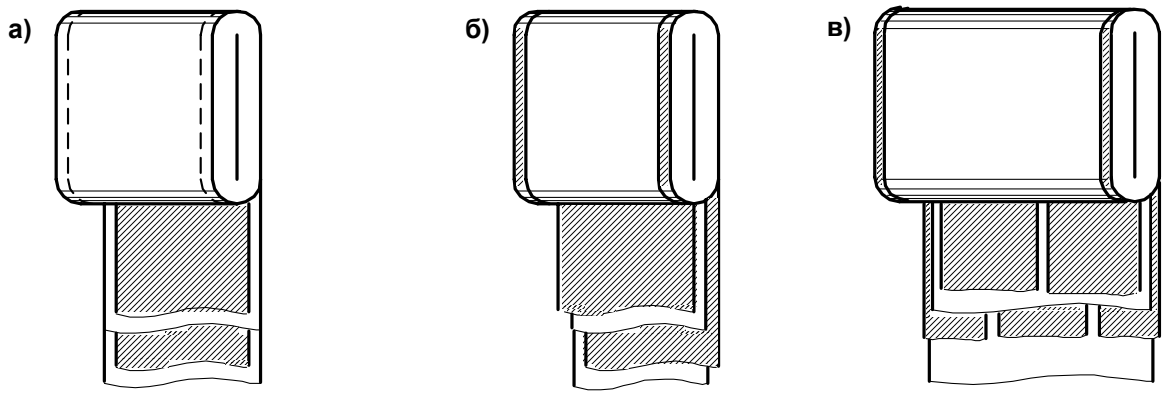


Рис. 2. Рулонные секции конденсаторов со скрытой фольгой (а), с выступающей фольгой (б) и с промежуточной «слепой» фольгой (в)

В качестве изоляции используется пропитанная ***конденсаторная бумага и полимерные пленки***. ***Из полимерных пленок*** в конденсаторах промышленной и повышенной частоты применяют полипропиленовую пленку, а в импульсных конденсаторах – лавсановую пленку.

В силовых конденсаторах часто применяют ***комбинированную бумажно-пленочную изоляцию***, в которой слои конденсаторной бумаги перемежаются со слоями полимерной пленки. Бумага впитывает жидкость, втягивая ее в прослойки между пленками, и обеспечивает отсутствие газовых включений.

В качестве пропиток используют нефтяное конденсаторное масло, хлорированные дифенилы и их заменители, а в импульсных конденсаторах – касторовое масло.

Электродами в силовых конденсаторах является алюминиевая фольга толщиной 7..12 мкм. В некоторых типах конденсаторов используется слой металла (цинка или алюминия), нанесенный на поверхность ленты или бумаги.

Изоляция силовых трансформаторов

Изоляция силовых трансформаторов с металлическим баком разделяется на внешнюю и внутреннюю. ***Внешняя изоляция*** составлена воздушными промежутками между вводами, между вводами и заземленным баком, а также по поверхности фарфоровых покрышек вводов. К ***внутренней изоляции*** относят изоляционные промежутки внутри бака: изоляцию обмоток, масляной части вводов, отводов и вспомогательных устройств.

Изоляцию обмоток разделяют на главную и продольную.

Главная изоляция составлена изоляцией между обмотками, между обмотками и магнитопроводом, междуфазной изоляцией между наружными катушками двух соседних стержней и изоляцию наружной катушки от стенки бака. Главная изоляция выполняется преимущественно маслобарьерного типа, обладающая высокой импульсной электрической прочностью и обеспечивающая интенсивное охлаждение обмоток и магнитопровода. Эта изоляция представляет собою трансформаторное масло с барьерами из электротехнического картона.

К ***продольной изоляции*** относят изоляционные промежутки между витками, между слоями витков и между катушками одной обмотки. Габариты главной и продольной изоляции при напряжениях до 220 кВ включительно определяются грозовыми перенапряжениями. Кроме того, конструкция изоляции должна обеспечивать охлаждение активных частей трансформатора. Продольная изоляция силовых трансформаторов выполняется обычно слоями электроизоляционной бумаги, накладываемой поверх провода.

Изоляция электрических машин высокого напряжения

К электрическим машинам высокого напряжения ***относятся*** турбогенераторы, гидрогенераторы, синхронные компенсаторы, синхронные и асинхронные двигатели большой мощности с номинальными напряжениями 3 кВ и выше. Основной особенностью работы изоляции машин является тяжелые условия эксплуатации: воздействия перенапряжений, высокой рабочей температуры и перепадов температуры, вибрации, ударных механических воздействий. По этой причине изоляция машин должна обладать высокой нагревостойкостью (класса не ниже В) и механической прочностью.

В электрических машинах высокого напряжения изоляцию обмоток статоров ***разделяют на следующие виды***:

1) корпусная или главная изоляция – между обмоткой и сталью статора;
2) междуфазная изоляция – между обмотками различных фаз;
3) витковая или продольная изоляция – между витками одной секции или между катушками;
4) изоляция элементарных проводников – между проводниками в одном витке или стержне обмотки.

Витковая изоляция ***выполняется*** обычно из стеклослюдяной ленты

или на основе эмалированных проводов со стекловолокнистой обмоткой, пропитанных эпоксидным компаундом. Главная изоляция выполняется на основе слюдяных изоляционных материалов с обеспечением отсутствия газовых прослоек. Токоведущая часть стержней выполняется прямоугольной формы. В этом случае электрическое поле в пазах неоднородно, поэтому для снижения неоднородности поля углы стержней закругляют или применяют экраны (прокладки) из алюминия.

Кратковременная электрическая прочность корпусной изоляции при толщинах от 3 до 12 мм характеризуется на частоте 50 Гц средней электрической прочностью 30..35 кВ/мм. Однако ***рабочие напряженности электрического поля*** в связи с нестабильностью характеристик выбираются на уровне 2..4 кВ/мм. При рабочих напряженностях в высоковольтных электрических машинах в течение длительного времени существуют частичные разряды заметной интенсивности, которые слабо влияют на надежность и долговечность изоляции, поскольку слюда весьма стабильна к воздействию частичных разрядов.

Герметизированные распределительные устройства с элегазовой изоляцией

В герметизированных распределительных устройствах (ГРУ) все токоведущие элементы расположены в закрытых металлических кожухах. В качестве изолирующей среды в ГРУ используется сжатый элегаз (SF_6).

Элегазовые ГРУ имеют ***ряд преимуществ*** перед открытыми распределительными устройствами (ОРУ) обычного типа:

1) размеры ГРУ существенно меньше, чем ОРУ;

2) ГРУ не создают радиопомех и работают бесшумно, что важно при размещении их в черте города;

3) обслуживание ГРУ безопасно, поскольку все элементы, находящиеся под высоким потенциалом, расположены внутри металлических заземленных кожухов;

4) ГРУ имеют более высокую надежность, так как все их токоведущие элементы изолированы от внешней среды (это особенно важно для прибрежных, сильно загрязненных и высокогорных районов);

5) ГРУ пожаробезопасны.

ГРУ может состоять из однофазных или трехфазных ячеек.

Для получения высоких разрядных напряжений газовых промежутков конструкция элементов ГРУ должна быть такой, чтобы электрическое поле между электродами было близким к однородному. Для этой цели соединительные шины выполняются в виде коаксиальных соосных цилиндров.

Крепление и перемещение токоведущих частей обеспечивается изоляционными элементами из твердых материалов. Для повышения надежности, облегчения монтажа и упрощения эксплуатации ячейки ГРУ выполняют состоящими из секций, отделенных друг от друга с помощью герметизирующих проходных изоляторов-распорок, изготавливаемых из эпоксидного ком-

паунда. Каждая секция снабжена приборами для контроля плотности или давления элегаза. Рабочее давление элегаза 200кПа.

Снижение напряженности электрического поля в месте контакта изолятора с внутренним электродом достигается приданием изолятору специальной формы или установки кольцевых экранов. Основные типы изоляторов-распорок представлены на рис. 3.

Следует отметить, что применение ребер, как это делают для изоляторов наружной установки, неэффективно, так как при этом происходит увеличение напряженности электрического поля в отдельных точках поверхности.

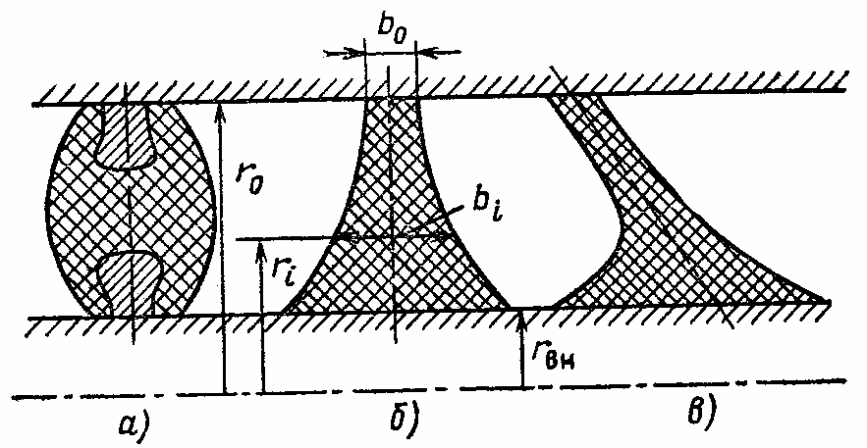


Рис. 3. Эскизы основных типов изоляторов-распорок ГРУ:
а – с залитым в эпоксидный компаунд экраном; б – дисковые; в – воронкообразные

Изоляция кабельных линий электропередач

Основными элементами силовых кабелей являются проводники — жилы, изоляция по отношению к земле и между жилами, герметичная металлическая оболочка и защитные покровы. Металлическая оболочка, выполняемая обычно из свинца или алюминия, предохраняет изоляцию главным образом от влаги и отчасти от механических повреждений. Защитные покровы включают броню из стальных проволок или лент и слои кабельной пряжи из джутового волокна, пропитанной битумными составами с антисептиками. Броня обеспечивает главную защиту оболочки кабеля и его изоляции от внешних механических воздействий, а джутовые покровы — защиту оболочки от коррозии.

Для напряжений ***до 35 кВ*** наибольшее применение получили кабели с ***вязкой пропиткой***, у которых ленточная бумажная изоляция пропитывается маслоканифольными или синтетическими нестекающими составами повышенной вязкости. Такие кабели могут прокладываться с разностью уровней до 300 м. При этом не возникает опасности стекания пропитывающего состава в нижнюю часть кабеля и образования в его верхней части больших объемов обедненно пропитанной изоляции.

Такие кабели выпускаются нескольких типов с одной, двумя, тремя и четырьмя жилами. В качестве примера на рис. 4 показано сечение трехжильного кабеля с поясной изоляцией и с секторными жилами.

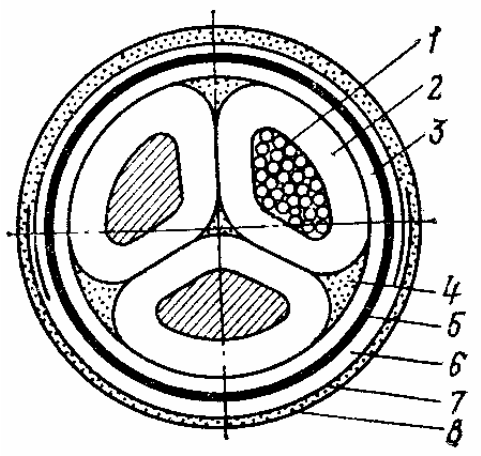


Рис. 4. Трехжильный кабель с поясной изоляцией и секторными жилами:
1 – жила, 2 – фазная изоляция, 3 – поясная изоляция, 4 – наполнитель, 5 – оболочка, 6 – пряжа, пропитанная битумом, 7 – броня из стальных лент, 8 – наружный защитный покров

Для напряжений ***110—220 кВ*** промышленной частоты используются ***маслонаполненные кабели***, которые, как правило, выполняются одножильными. В таких кабелях ленточная бумажная изоляция пропитывается маловязким маслом, которое может перемещаться внутри жилы вдоль кабеля и находится под избыточным давлением. Благодаря этому исключается возможность появления в изоляции газовых включений при циклических изменениях температуры, и длительная электрическая прочность повышается в 3 раза и более, по сравнению с прочностью изоляции, пропитанной вязкими составами. Для поддержания неизменного давления в кабеле в условиях эксплуатации на кабельной линии через каждые 1—2,5 км устанавливаются баки давления.

По давлению маслонаполненные кабели делятся на кабели низкого (до 0,2 МПа), среднего (0,4—0,5 МПа) и высокого (0,8—1,6 МПа) давления. С увеличением давления масла электрическая прочность растет, однако конструкция упрочняющих покровов и уплотнений в муфтах усложняется.

В маслонаполненных кабелях на напряжения 110— 220 кВ особое внимание уделяется регулированию электрических полей. Прежде всего, жила кабеля выполняется из проволок специального профиля, а не из круглых, как в кабелях на напряжения до 35 кВ. За счет этого достигается более гладкая поверхность жилы. Кроме того, жила экранируется слоями полупроводящей бумаги, благодаря чему устраняются повышения напряженности у кромок отдельных проволок. Наконец, в таких кабелях изоляция выполняется градированной.

При напряжениях 110—150 кВ переменного тока наибольшее распространение получили маслонаполненные кабели высокого давления ***в стальных трубах***. Устройство таких кабелей показано на рис. 5.

В стальном трубопроводе, заполненном маловязким маслом под давлением около 1,5 МПа, помещаются три круглые жилы с изоляцией, которая пропитана вязкими составами. Изоляция покрыта эластичным, герметически плотным слоем, который предотвращает контакт изоляции с маслом в трубе,

а также увлажнение изоляции при транспортировке и монтаже. Эластичное покрытие свободно передает изоляции давление масла, заполняющего стальную трубу.

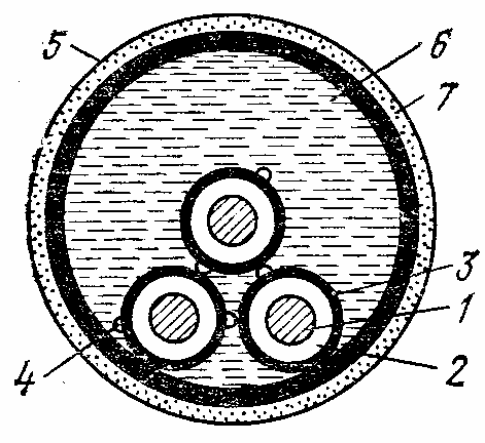


Рис. 5. Трубопровод с кабелем под давлением масла:
1 – жила, 2 – изоляция, 3 – герметизирующие покровы, 4 –полукруглая проволока, 5 – стальная труба, 6 –масло, 7 – антикоррозийные покровы

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

При напряжениях до 220 кВ также применяются ***газонаполненные кабели***, в которых необходимая длительная электрическая прочность достигается за счет повышения давления газа (сухой очищенный азот). Эти кабели имеют устройство примерно такое же, как и маслонаполненные, но в них используется изоляция с обедненной пропиткой, заведомо содержащая газовые включения. Электрическая прочность включений повышается за счет того, что создается повышенное давление путем непосредственного ввода газа в кабель под давлением, либо за счет прокладки кабеля с эластичной оболочкой в стальной трубе с газом под давлением. Преимущество таких кабелей состоит в том, что получается более простая система обеспечения повышенных давлений за счет использования баллонов со сжатым газом. Кроме того, такие кабели могут укладываться на трассах с большим уклоном. Однако в газонаполненных кабелях условия охлаждения хуже, и это ограничивает рабочие токи.

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

Преимущества пластмассовых кабелей по сравнению с кабелями с вязкой пропиткой состоят в том, что масса их меньше и не требуется (или уп-

рощается) система оболочек, защищающих изоляцию от внешних воздействий. Однако нагревостойкость существующих изоляционных пластмасс существенно ниже, чем бумажной изоляции с вязкой пропиткой.

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

Кабельные муфты. Кабельные линии выполняются обычно из нескольких отрезков ограниченной длины (строительная длина — от 250 до 750 м). Для соединения отрезков кабеля в линию, а также для присоединения концов кабеля к шинам распределительных устройств или аппаратов выполняются соединительные и концевые муфты. Устройство кабельных муфт и их изоляции зависит от конструкции кабеля. Однако во всех случаях учитывается, что монтаж выполняется в полевых условиях и изоляция в муфтах имеет более низкое качество, чем в самом кабеле. Поэтому изоляционные расстояния в муфтах увеличиваются.

Эскиз соединительной муфты показан на рис. 6.

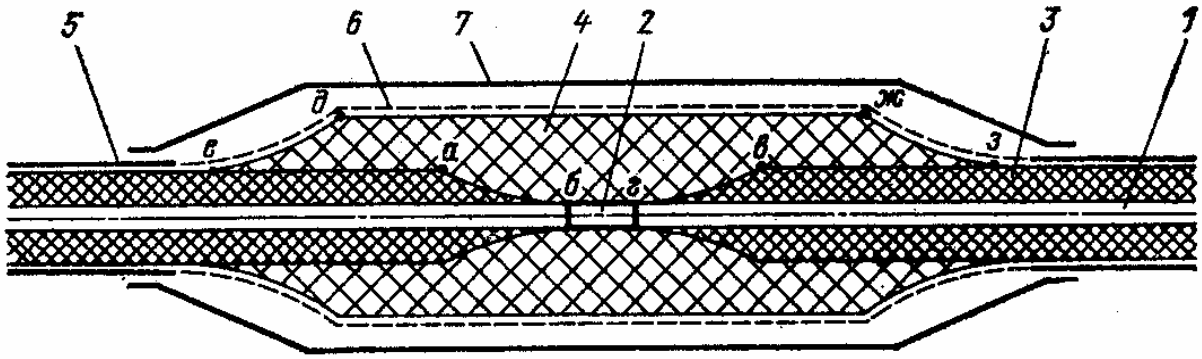


Рис. 6. Кабельная соединительная муфта:
1 – жила, 2 – соединение жил, 3 – изоляция кабеля, 4 – дополнительная изоляция,
5 – оболочка кабеля, 6 – бандаж из свинцовой проволоки, 7 – корпус муфты

Профилактические испытания внутренней изоляции

Цель профилактических испытаний — своевременное обнаружение дефектов в изоляции, возникших по случайным причинам в процессе эксплуатации и сокращающих ресурс оборудования, а также дефектов, развившихся вследствие нормального старения изоляции. Для оценки состояния изоляции и выявления в ней различного рода дефектов используются:

1) испытания приложением высокого напряжения;
2) неразрушающие электрические методы испытаний;
3) неразрушающие неэлектрические методы контроля;
4) электрические методы контроля при рабочем напряжении.

Испытания высоким напряжением.

Профилактические испытания изоляции высоким напряжением проводят для крупных электрических машин, кабельных линий, а также для оборудования до 10 кВ. Применение этого метода ограничивается возможностями создания транспортабельных источников высокого напряжения требуемой мощности и опасностью неконтролируемого повреждения изоляции высоким испытательным напряжением.

Изоляция кабельных линий испытывается практически только постоянным высоким напряжением. Достоинствами постоянного испытательного напряжения являются существенно меньшая мощность испытательной установки, возможность измерений токов утечки, которые дают полезную информацию о состоянии изоляции, а также значительно меньшая, чем при переменном испытательном напряжении, опасность повреждения изоляции.

Для кабелей с бумажно-масляной изоляцией используются следующие значения испытательных напряжений $U_{исп}$:

при $U_{ном} \lhd 10$ кВ, $U_{исп} = (5 \div 6) \cdot U_{ном}$;

при $U_{ном} \lhd 20 \div 35$ кВ, $U_{исп} = (4 \div 5) \cdot U_{ном}$ продолжительность приложения напряжения 5 мин.

Для маслонаполненных кабелей 110 и 220 кВ испытательные напряжения равны соответственно 250 и 400 кВ; длительность испытания 15 мин. Маслонаполненные кабели 500 кВ высоким напряжением не испытываются.

Неразрушающие электрические методы испытаний.

К этой группе методов относятся измерения значений $tg\delta$ при напряжениях $U_{исп} \lhd\lhd U_{раб}$, а также методы, в которых используются явления абсорбции зарядов (миграционной поляризации), характерные для комбинированной изоляции.

Измерения значений $tg\delta$ изоляции оборудования 35 кВ и выше проводят с помощью переносных мостов Шеринга при напряжениях не выше 10 кВ. Как правило, по значению $tg\delta$ удается выявить распределенные дефекты, например увлажнение изоляции.

Внешними проявлениями абсорбционных процессов в изоляции, используемыми для профилактического контроля, являются изменение сопротивления утечки изоляции R_y во времени (после включения напряжения) и зависимость емкости изоляции от частоты. Поэтому при контроле состояния изоляции измеряют сопротивления утечки R_{15} и R_{60} (соответственно через 15 и 60 с после включения напряжения). Оценку качества изоляции проводят по абсолютному значению сопротивления R_{60} и отношению $k_{абс} = R_{60} / R_{15}$, которое называют ***коэффициентом абсорбции***. Для изоляции в нормальном

состоянии обычно $k_{абс} \rhd 1{,}3$.

Для контроля степени увлажненности изоляции силовых трансформаторов используются критерии, определяемые по результатам измерения зависимости емкости изоляции от частоты.

Достоинствами этих методов являются простота выполнения измерений, недостатками — необходимость вывода оборудования из работы, слабая связь измеряемых величин с фактической электрической прочностью изоляции, а также сильное влияние на результаты измерений температуры изоляции (необходимость введения поправок).

Неразрушающие неэлектрические методы контроля изоляции.

Среди многих возможных неэлектрических методов контроля (акустических, оптических, химических, ультразвуковых, радиоволновых, рентгенографических и др.) широко используются методы контроля изоляции маслонаполненного оборудования, основанные на анализе проб масла. Важное достоинство этих методов состоит в том, что они не требуют вывода из работы проверяемого оборудования.

Для выявления достаточно грубых дефектов изоляции пробы масла подвергаются простому химическому анализу, для них измеряются электрическая прочность и $tg\delta$.

Наиболее совершенным является контроль по составу и концентрации газов, растворенных в масле. В этом случае берут две-три пробы масла объемом по 10 мл. Далее анализ газов из проб масла проводят в лабораторных условиях методом газовой хроматографии. Установлено, что по составу и концентрациям газов, растворенных в масле, можно достаточно достоверно судить о характере дефекта, а по динамике изменения концентраций — о степени опасности этого дефекта.

Методы контроля изоляции при рабочем напряжении.

Все рассмотренные выше методы пригодны для организации только периодического контроля изоляции. В связи с этим большое внимание в последние годы уделяется разработке методов и аппаратуры для автоматического непрерывного контроля изоляции при рабочем напряжении.

Основу этих методов составляют измерения диэлектрических характеристик (неравновесно-компенсационный, мостовой, ваттметровый методы) и регистрация частичных разрядов.

Глава 2. ВОЗДЕЙСТВИЕ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ИЗОЛЯЦИЮ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ОТКРЫТЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Молния. Развитие грозового разряда

Молния представляет собой электрический разряд между облаком и землей или между облаками. ***Процесс электризации облаков*** выглядит следующим образом. Капли воды, достигшие области отрицательных температур, замерзают. Замерзание начинается с поверхности капли, которая покрывается корочкой льда. Имеющиеся в воде положительные ионы под действием разности температур перемещаются к поверхностному слою капли и заряжают его положительно, в то время как жидкой сердцевине капли сообщается при этом избыточный отрицательный заряд. Когда замерзает сердцевина капли, то вследствие ее расширения ранее замерзший поверхностный слой лопается и его положительно заряженные осколки уносятся потоком воздуха в верхние части облака. Таким образом, нижняя часть грозового облака оказывается заряженной отрицательно, а вершина — положительно.

По мере концентрации в нижней части облака отрицательных зарядов увеличивается напряженность электрического поля, и когда она достигает критического значения (20—24 кВ/см), происходит ионизация воздуха и в сторону земли начинает развиваться разряд.

На начальной стадии, называемой ***лидерной***, молния представляет собой относительно медленно (со скоростью в среднем $1{,}5 \cdot 10^5$ м/с) развивающийся слабо светящийся канал (лидер). Заряды облака и лидера индуктируют на поверхности земли и на расположенных на ней объектах заряды другого знака. По мере приближения лидера к земле индуктированный заряд и напряженность электрического поля на вершинах возвышающихся над поверхностью земли объектов возрастают, и с них могут начать развиваться встречные лидеры, имеющие заряды, по знаку обратные заряду лидера. Ток в лидерной стадии молнии имеет порядок десятков и сотен ампер.

Когда канал развивающегося от облака лидера приближается к земле или к одному из встречных лидеров, то между ними на расстоянии 25—100 м возникает высокая напряженность электрического поля, среднее значение которой 10 кВ/см. Этот промежуток пробивается за несколько микросекунд, и в нем выделяется энергия порядка 0,5—5 МДж, которая расходуется на нагрев и термоионизацию. Проводимость этой части канала резко возрастает, и зона повышенной напряженности перемещается по направлению к облаку. Этот процесс, называемый ***главным разрядом***, сопровождается сильным свечением канала разряда. Ток в канале за 5—10 мкс достигает десятков и даже сотен килоампер, а затем за время 25—200 мкс спадает до половины амплитудного значения. В течение этого очень короткого времени канал разряда разогревается до температуры 20—30 тыс. °С.

При нагревании канал разряда быстро расширяется, что вызывает распространение в окружающем воздухе ***ударной волны***, имеющей на своем

фронте высокое давление и воспринимаемой как гром. Во время главного разряда происходит нейтрализация зарядов лидера. Нарастание тока главного разряда (фронт импульса тока) соответствует нейтрализации зарядов в лидерном канале, а спад тока — нейтрализации зарядов в зоне ионизации лидера.

В завершающей (***финальной***) стадии молнии по каналу в течение десятков миллисекунд проходит ток порядка десятков и сотен ампер. В это время нейтрализуются заряды облака. Часто на ток финальной стадии накладываются импульсы тока повторных разрядов, во время которых разряжаются на землю скопления зарядов, расположенные в разных местах по высоте грозового облака. Яркие вспышки канала при повторных разрядах воспринимаются как мерцание молнии.

В большинстве случаев молния состоит из двух-трех отдельных разрядов, однако наблюдались молнии и с несколькими десятками компонентов. Такая многокомпонентная молния может длиться до 1 с. Чаще всего длительность удара молнии не превышает 0,1 с.

Электрические характеристики молнии

Переход от лидерной стадии к главному разряду можно имитировать замыканием на землю вертикального заряженного провода (рис. 2.1). Будем считать, что во время лидерной стадии сформировался проводящий канал (вертикальный провод) с постоянной плотностью отрицательного заряда на единицу длины σ. При замыкании ключа К происходит нейтрализация отрицательного заряда за счет положительных зарядов, поступающих в канал молнии с поверхности земли.

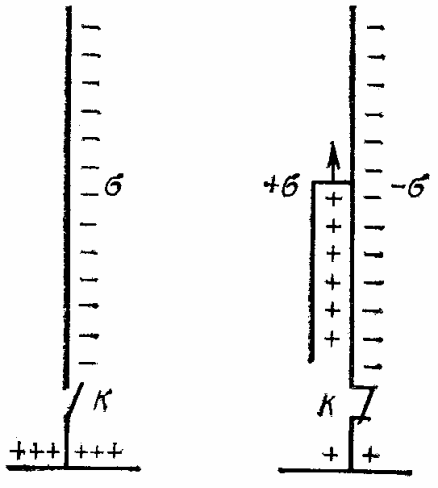


Рис. 2.1. Упрощенная схема развития главного разряда

Если волна нейтрализации распространяется вверх со скоростью v, то амплитуда тока

$$I_м = \sigma \cdot v$$

Если провод замыкается на землю через некоторое сопротивление R, то ток уменьшается и определяется как

$$I_м = \sigma \cdot v \cdot \frac{Z}{Z + R}$$

где Z — эквивалентное волновое сопротивление канала молнии.

С точки зрения электромагнитного воздействия на установки высокого напряжения важное значение имеют форма и значение тока главного разряда (рис. 2.2).

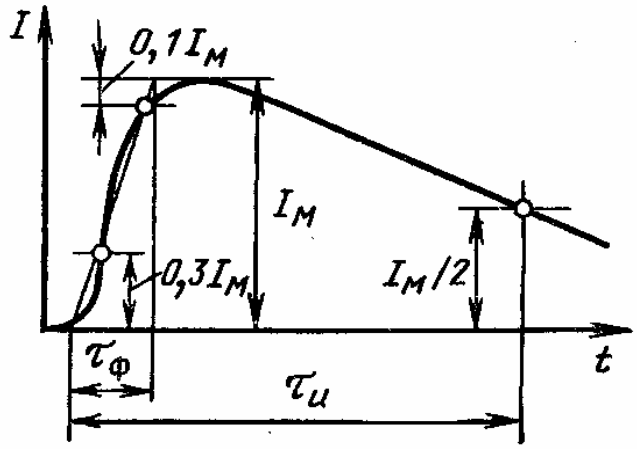


Рис. 2.2. Определение параметров импульса тока молнии

Важнейшими электрическими характеристиками молнии являются:

1) максимальное значение тока молнии $I_м$, часто называемое просто током молнии.

2) крутизна фронта тока молнии

$$a = \frac{di_м}{dt}$$

3) средняя крутизна фронта

$$a_{ср} = \frac{I_м}{\tau_ф}.$$

Характеристики грозовой деятельности

Одновременно на земном шаре существует примерно 2000 грозовых очагов, из которых ежесекундно происходит около 100 ударов молнии.

Интенсивность грозовой деятельности в данной местности характеризуется ***средним числом грозовых часов в году*** $D_г$. Число грозовых часов минимально в высоких широтах и постепенно увеличивается к экватору, где повышенная влажность воздуха и высокая температура, способствующие образованию грозовых облаков.

Другой характеристикой грозовой деятельности является ***среднее число ударов молнии*** $n_{уд}$ в 1 км^2 поверхности земли за 100 грозовых часов.

Возвышающиеся над поверхностью земли объекты вследствие развития с них встречных лидеров собирают удары молнии с площади, превышающей их территорию. Число ударов молнии за 100 грозовых часов в сооружение, например в подстанцию, длиной *A*, шириной *B* и высотой *H* (раз-

меры в метрах) может быть рассчитано по формуле

$$n_{уд} = 6{,}7 \cdot (A + 7H) \cdot (B + 7H) \cdot 10^{-6}.$$

Число ударов молнии в 100 км воздушной линии электропередачи за 100 грозовых часов

$$n_{уд} = 6{,}7 \cdot 100 \cdot 6h_{ср} \cdot 10^{-3} \approx 4 \cdot h_{ср},$$

где $h_{ср} = h_{оп} - \frac{2}{3} \cdot f$ – средняя высота, м, подвеса троса или при отсутствии тросов — верхнего провода; $h_{оп}$ — высота опоры; f — стрела провеса троса или провода.

Годовое число ударов молнии в линию длиной l при числе грозовых часов в году $D_г$, определяется как

$$n_{год} = n_{уд} \frac{l}{100} \cdot \frac{D_г}{100}.$$

Защита от прямых ударов молнии. Молниеотводы

Защита от прямых ударов молнии осуществляется с помощью молниеотводов. Молниеотвод представляет собой возвышающееся над защищаемым объектом устройство, через которое ток молнии, минуя защищаемый объект, отводится в землю. М***олниеотвод состоит*** из молниеприемника, непосредственно воспринимающего на себя удар молнии, токоотвода и заземлителя.

Защитное действие молниеотводов основано на том, что во время лидерной стадии на вершине молниеотвода скапливаются заряды и наибольшие напряженности электрического поля создаются на пути между развивающимся лидером и вершиной молниеотводов. Возникновение и развитие с молниеотвода встречного лидера еще более усиливает напряженности поля на этом пути, что окончательно предопределяет удар в молниеотвод. Защищаемый объект, более низкий, чем молниеотвод, будучи расположен поблизости от него, оказывается заэкранированным молниеотводом и встречным лидером и поэтому практически не может быть поражен молнией.

Молниеотводы по типу молниеприемников разделяются на ***стержневые и тросовые***. Стержневые молниеотводы выполняются в виде вертикально установленных стержней (мачт), соединенных с заземлителем, а тросовые — в виде горизонтально подвешенных проводов. По опорам, к которым крепится трос, прокладываются токоотводы, соединяющие трос с заземлителем Открытые распределительные устройства подстанций защищаются стержневыми молниеотводами, а линии электропередачи — тросовыми.

Необходимым условием надежной защиты является хорошее заземление молниеотвода, так как при ударе молнии в молниеотвод с большим сопротивлением заземления на нем создается высокое напряжение, способное вызвать пробой с молниеотвода на защищаемый объект.

Зоны защиты стержневых и тросовых молниеотводов

Защитное действие молниеотвода характеризуется его ***зоной защиты***, т. е. пространством вблизи молниеотвода, вероятность попадания молнии в которое не превышает определенного достаточно малого значения.

Зоны защиты молниеотводов были определены на основе обширных лабораторных исследований. Надежность их подтверждена длительным опытом эксплуатации. В настоящее время в связи с потребностями практики нормированы зоны защиты молниеотводов высотой до 150 м.

Зона защиты одиночного ***стержневого молниеотвода*** высотой $h \le 150$ м представляет собой круговой конус (рис. 2.3) с вершиной на высоте $h_0 \lhd h$, сечение которого на высоте h_x имеет радиус r_x.

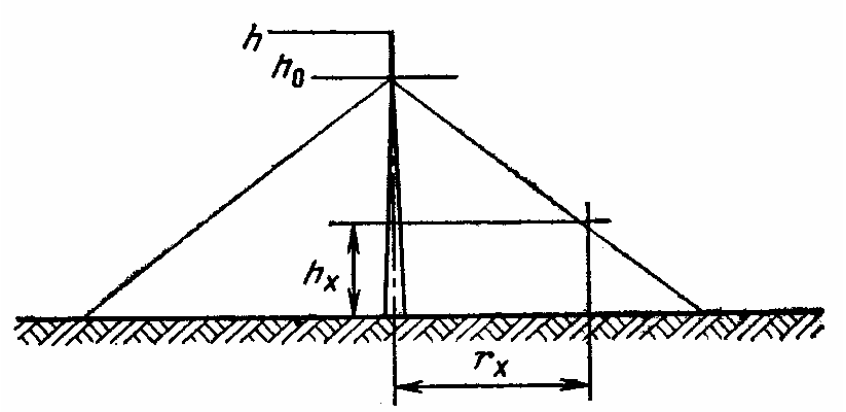


Рис. 2.3. Сечение зоны защиты стержневого молниеотвода

Граница зоны защиты находится по формулам (все размеры — в метрах)

$$\left.\begin{aligned} h_0 &= 0{,}85 \cdot h \\ r_x &= (1{,}1 - 0{,}002 \cdot h)(h - \frac{h_x}{0{,}85}). \end{aligned}\right\}$$

При этом вероятность прорыва молнии через границу зоны не превышает 0,005. Если допустить вероятность прорыва молнии 0,05, то зона защиты расширяется. В ряде случаев такая зона удовлетворяет потребностям практики, так как для объектов высотой до 30 м число разрядов обычно меньше 0,1 в год. Поэтому при вероятности прорыва 0,05 защищаемый объект в среднем будет поражаться не чаще, чем 1 раз за 200 лет эксплуатации. Зона защиты одиночного молниеотвода при вероятности прорыва 0,05 описывается формулами

$$\left.\begin{aligned} h_0 &= 0{,}92 \cdot h \\ r_x &= 1{,}5 \cdot (h - \frac{h_x}{0{,}92}). \end{aligned}\right\}$$

Зона защиты двух стержневых молниеотводов, находящихся вблизи друг от друга, расширяется по сравнению с зонами отдельных молниеотводов. Возникает дополнительный объем зоны защиты, обусловленный

совместным действием двух молниеотводов

Зона защиты одиночного ***тросового молниеотвода*** определяется по формулам:

а) при вероятности прорыва $P_{пр} = 0{,}005$

$$\left.\begin{aligned} h_0 &= 0{,}85 \cdot h \\ r_x &= (1{,}35 - 0{,}0025 \cdot h)(h - \frac{h_x}{0{,}85}); \end{aligned}\right\}$$

б) при вероятности прорыва $P_{пр} = 0{,}05$

$$\left.\begin{aligned} h_0 &= 0{,}95 \cdot h \\ r_x &= 1{,}7 \cdot (h - \frac{h_x}{0{,}92}); \end{aligned}\right\}$$

Заземление молниеотводов

Для устройства заземлений применяются вертикальные и горизонтальные электроды (заземлители).

Для ***горизонтальных заземлителей*** используется полосовая сталь шириной 20—40 мм и толщиной не менее 4 мм, а также сталь круглого сечения диаметром не менее 6 мм. В качестве ***вертикальных заземлителей*** применяются стальные трубы, стержни и профильная сталь.

На подстанциях заземлитель представляет собой сложную систему, состоящую обычно из горизонтальных полос, объединяющих вертикальные электроды и образующих сетку на площади, занимаемой подстанцией. На линиях электропередачи в качестве заземлителя опор могут использоваться их железобетонные фундаменты.

Заземлитель характеризуется значением сопротивления, которое окружающая земля оказывает стекающему с него току. Сопротивление заземлителя зависит от его геометрических размеров и удельного сопротивления грунта, в котором он находится. Для расчета сопротивления заземления одиночного стержневого молниеотвода или линейной опоры используются следующие формулы:

сопротивление вертикальной трубы или стержня

$$R = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \ln\left[\frac{4 \cdot l \cdot (2t + t)}{d(4t + t)}\right],$$

сопротивление горизонтальной полосы

$$R = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \ln\frac{1{,}5 \cdot l}{\sqrt{bt}},$$

сопротивление железобетонного фундамента

$$R = 1{,}7\frac{\rho}{2\pi \cdot t} \ln\frac{4 \cdot t}{b},$$

где l — длина трубы или полосы; t — глубина залегания полосы,

верхнего конца вертикального электрода или нижнего конца фундамента; b — ширина полосы или фундамента; d — диаметр трубы или стержня.

Расчетное значение ρ определяется по данным измерений как

$$\rho = K \cdot \rho_{изм},$$

где K — сезонный коэффициент; $\rho_{изм}$ — измеренное значение удельного сопротивления грунта. Если измерение проводилось при средней влажности грунта, то K=1,4. При повышенной влажности земли перед измерением берется K=2,6.

Особенности работы заземлителей при отводе токов молнии

При больших импульсных токах, что имеет место при ударе молний, плотность проходящего через заземляющие электроды тока велика, поэтому в земле у поверхности электродов создаются очень высокие напряженности поля, превосходящие пробивные напряженности грунта. Вокруг электродов образуются зоны искрения, увеличивающие их эффективные размеры, и ***сопротивление заземления уменьшается.***

Быстрое же нарастание тока молнии на фронте импульса создает падение напряжения на индуктивности протяженного заземлителя, что ограничивает отвод тока с удаленных его частей. При этом сопротивление заземления, наоборот, увеличивается.

В результате влияния того или иного фактора (образования зоны искрения или падения напряжения на индуктивности) сопротивление заземлителя при прохождении тока молнии отличается от стационарного сопротивления заземления, формулы для которого приведены выше. Такое сопротивление называется ***импульсным сопротивлением*** $R_и$.

Отношение импульсного и стационарного сопротивлений заземления называется ***импульсным коэффициентом***

$$\alpha_и = \frac{R_и}{R}.$$

Если заземлитель состоит из n труб или полос, то его импульсное сопротивление равно

$$R_и = \frac{\alpha_и \cdot R}{\eta_и \cdot n},$$

где $\eta_и$ - импульсный коэффициент использования заземлителя, учитывающий ухудшение условий растекания тока молнии вследствие взаимного экранирования электродов.

Допустимое расстояние между молниеотводом и защищаемым объектом

Для безопасного прохождения тока молнии по молниеотводу необходимо обеспечить:

1) минимальное расстояние по воздуху $l_в$ от молниеотвода до защи-

щаемого объекта при расчетных значениях молнии, которые обычно принимаются, $I_м = 60$ кА и $a = 30$ кА/мкс, и допустимой напряженности электрического поля в воздухе $E_в = 500$ кВ/м

$$l_в \geq 0{,}12 \cdot R_и + 0{,}1 \cdot l\,,$$

где l – расстояние от данной точки молниеотвода до заземлителя;

2) расстояние в земле $l_з$ между заземлителем отдельно стоящего молниеотвода и ближайшей точкой защищаемого объекта в земле при допустимой напряженности поля $E_з = 300$ кВ/м

$$l_з = \frac{60 \cdot R_и}{300} = 0{,}2 \cdot R_и\,.$$

При этом $l_в$ должно быть не менее 5 м, а $l_з$ – не менее 3 м.

На подстанциях при установке молниеотводов на порталах помимо соблюдения безопасных расстояний по воздуху и в земле необходимо согласовать импульсные разрядные напряжения изоляторов и напряжения, возникающие в точках их присоединения к порталу при ударах молнии в молниеотвод.

Грозозащита воздушных ЛЭП

Из всех объектов системы электроснабжения наиболее подвержены прямым ударам молнии воздушных ЛЭП. За грозовой сезон наблюдается несколько десятков прямых ударов молнии на каждые 100 км длины.

Разряд молнии в возвышенный объект сопровождается образованием встречных лидеров, развивающихся с возвышенных мест объекта – в случае линии с опоры, с грозозащитного троса и с фазных проводов. Место удара молнии определяется наиболее развившимся встречным лидером, поэтому для ВЛ различают следующие ***случаи поражения***:

1) удар молнии в провод с последующим перекрытием с провода на опору или между проводами;

2) удар молнии в вершину опоры с последующим перекрытием с опоры на провод;

3) удар молнии в пролет троса с последующим перекрытием с троса на провод или на землю.

Главную опасность для линии представляет прямой удар молнии в фазные провода с последующим перекрытием изоляции от возникающих при этом перенапряжений. По месту перекрытия возникает дуга за счет рабочего напряжения линии с необходимостью отключения короткого замыкания. Вероятность перехода импульсного перекрытия в дугу зависит от величины рабочего напряжения и материала опор. В случае деревянных опор вероятность перехода в дугу мала; для линий на железобетонных и металлических опорах эта вероятность порядка 0,5 для сетей 3..35 кВ, а для ЛЭП 110..500 кВ близка к единице.

Высокую надежность грозозащиты воздушных линий электропередачи

обеспечивают ***следующие мероприятия***:

1) подвеска грозозащитных тросов с достаточно малыми углами защиты;

2) снижение импульсного сопротивления опор;

3) повышение импульсной прочности изоляции линий и снижение вероятности установление дуги (в частности, этому способствует использование деревянных траверс и опор);

4) применение изолированной нейтрали или дугогасящего реактора;

5) использование автоматического повторного включения линий.

Для ***линий напряжением 220 кВ и выше***, сооружаемых обычно на металлических или железобетонных опорах, основным средством грозозащиты являются тросы, располагаемые над фазными проводами. Импульсное сопротивление заземлений опор, к которым присоединяются тросы, должно быть не более 15 Ом для линий 220 кВ, а для линий 110 кВ с железобетонными опорами – не более 20 Ом. При грунтах с удельным сопротивлением более 1000 Ом*м разрешаются более высокие значения сопротивления заземлений. Для уменьшения потерь энергии, возникающих из-за наведенного напряжения 50 Гц в контуре земля-опора-трос-опора-земля, заземление тросов производят не на каждой опоре, подвешивая трос на одном-двух изоляторах, зашунтированных искровым промежутком. Дополнительным средством уменьшения грозопоражаемости линий 220 кВ и выше является использование АПВ.

Линии напряжением 110-150 кВ на металлических и железобетонных опорах также обычно защищаются по всей длине тросами. Эксплуатация линий 110 кВ без тросов допускается в районах с числом грозочасов в году менее 20, при высоких удельных сопротивлениях грунта, в особо гололедных районах, в районах с коррозионным загрязнением атмосферы, в горных местностях с возвышающимися горными массивами. Линии 110-150 кВ на деревянных опорах не требуют подвески грозозащитных тросов в связи с высокой импульсной прочностью изоляции таких линий. Применение АПВ также повышает надежность грозозащиты таких линий.

Линии 35 кВ на металлических опорах защищаются тросами лишь в особо ответственных случаях. Линии 35 кВ на деревянных опорах имеют более высокую надежность грозозащиты. Линии напряжением 3-20 кВ не оборудуются тросовой защитой и защищаются от грозовых перенапряжений с помощью дугогасящего реактора или изолированной нейтрали и АПВ.

Дополнительные меры защиты (с помощью разрядников) должны быть использованы в следующих случаях:

1) пересечения линий электропередачи между собой или с другими линиями;

2) опоры со сниженной электрической прочностью изоляции и высокие опоры переходных пролетов;

3) ответвления к подстанциям на отпайках и секционирующие разъединители на линиях;

4) кабельные вставки на линиях.

Допустимое число отключений в год

Исходя из условий надежности электроснабжения, допустимое число отключений воздушных линий в год принимают равным

$$n_{откл.доп} = \frac{N_{доп}}{(1-\beta_{АПВ})},$$

где $N_{доп}$ – допустимое число перерывов электроснабжения в год ($N_{доп} \le 0{,}1$ при отсутствии резервирования и $N_{доп} \le 1{,}0$ при наличии резервирования), $\beta_{АПВ}$ – коэффициент успешности АПВ, равный 0,8-0,9 для линий 110 кВ и выше на металлических и железобетонных опорах.

Следует заметить, что частое применение АПВ осложняет эксплуатацию выключателей (требуются внеочередные ревизии), поэтому допускается $n_{откл.доп} = 1 \div 4$ в зависимости от типа выключателей.

Попадание молнии в линию без тросов

Наибольшие перенапряжения на линиях без тросов возникают **при прямом поражении** линии молнией.

При прямом ударе молнии в провод ток молнии растекается по пораженному проводу в обе стороны, поэтому амплитуда волны перенапряжения на проводе определяется как

$$U = \frac{I_M Z_{пр}}{2}$$

где $Z_{пр}$ — волновое сопротивление провода, которое в среднем, с учетом импульсной короны, может быть принято равным 300 Ом.

На линии ***с металлическими опорами*** импульс перенапряжения с амплитудой U воздействует на изоляцию провода на опоре. При токах молнии порядка 5—10 кА, т. е. в большинстве грозовых разрядов в линию, создаются перенапряжения, достаточные для перекрытия гирлянды изоляторов.

На линиях с номинальным напряжением до 220 кВ наряду с металлическими и железобетонными используются деревянные опоры. Сооружение таких линий обходится дешевле.

На линиях ***с деревянными опорами*** перекрытие прежде всего происходит между проводами по пути гирлянда — траверса — гирлянда (рис. 1).

Импульс на пораженном проводе индуктирует напряжение на соседнем проводе в соответствии с коэффициентом электромагнитной связи k. Между проводами возникает напряжение

$$U = \frac{I_M Z_{пр}}{2}(1-k),$$

где k — коэффициент связи между проводами с учетом импульсной короны, имеющий значения 0,25-0,4.

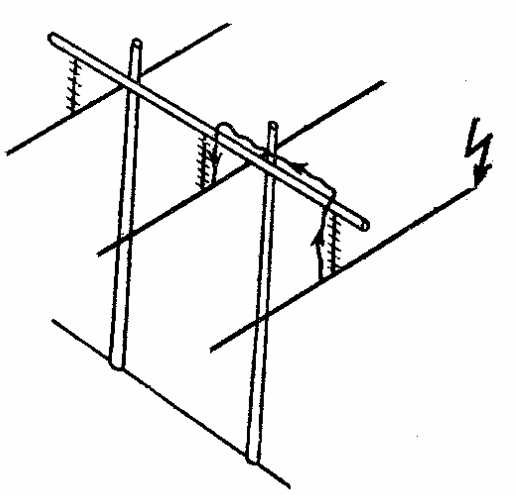


Рис. 1. Удар молнии в провод линии на деревянных опорах

Вероятность перекрытия линейной изоляции $P_{пер}$ рассчитывается по ***критическому значению тока*** молнии. Критический ток молнии определяется из условий равенства воздействующего напряжения U и импульсного разрядного напряжения изоляции $U_{50\%}$ по формулам:

для ВЛ на металлических и железобетонных опорах

$$I_{кр} = \frac{2 \cdot U_{50\%}}{Z},$$

Для ВЛ на деревянных опорах

$$I_{кр} = \frac{2 \cdot U_{50\%}}{Z(1-k)}.$$

<u>При ударах молнии вблизи ВЛ</u> на фазных проводах возникают индуктированные напряжения, которые имеют электрическую и магнитную составляющие

$$U_{инд} = U_{и,э} + U_{и,м}.$$

Отрицательный заряд канала лидера молнии вызывает появление на проводе положительного заряда (рис. 2).

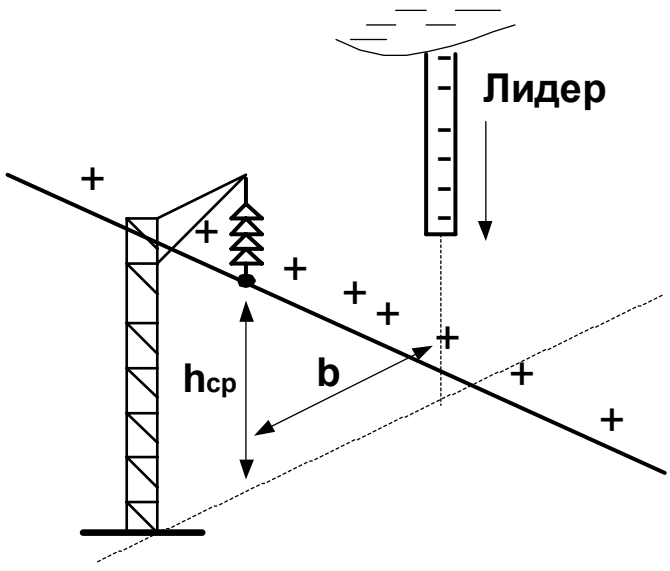


Рис. 2. Схема появления индуктированного перенапряжения при ударе молнии вблизи ВЛ

При сравнительно медленном продвижении лидера потенциал провода остается равным нулю, поскольку электрическое поле заряда провода уравновешивает электрическое поле заряда лидера. В стадии главного разряда, когда канал лидера очень быстро нейтрализуется, заряды на проводе освобождаются и создают волны напряжения, распространяющиеся в обе стороны линии. Это и есть электрическая составляющая индуктированного напряжения, которая прямо пропорциональна средней высоте подвеса провода $h_{ср}$ и обратно пропорциональна кратчайшему расстоянию до точки удара молнии b

$$U_{иэ} = k_э \frac{h_{ср}}{b} I_м,$$

где $k_э$ – коэффициент пропорциональности, уменьшающийся при возрастании скорости главного разряда v и имеющий размерность сопротивления.

Изменение магнитного поля главного разряда наводит в контуре опора – провод – ближняя опора – земля ЭДС, вызывающую магнитную составляющую индуктированного напряжения. Максимальное значение напряжения также зависит от высоты провода и расстояния, как и для электрической составляющей

$$U_{им} = k_м \frac{h_{ср}}{b} I_м,$$

где $k_м$ – коэффициент, возрастающий с увеличением скорости главного разряда.

Тогда максимальное значение индуктированного напряжения равно

$$U_{инд} = (k_э + k_м) \frac{h_{ср}}{b} I_м \approx 30 \frac{h_{ср}}{b} I_м,$$

где $k_э + k_м \approx 30\ Ом$.

Попадание молнии в линию с тросами

Грозовые отключения ВЛ с тросами могут происходить по следующим причинам:

1) удар молнии в трос в середине пролета и перекрытие воздушного промежутка трос — провод;

2) удар молнии в опору и обратное перекрытие изоляции с опоры на провод;

3) прорыв молнии через тросовую защиту, т. е. поражение провода.

При ударе молнии ***в трос в середине пролета*** между двумя опорами напряжение между тросом и проводом с учетом индуктированного на проводе напряжения равно

$$U_{тр-пр} = (1-k) \frac{a \cdot Z_{тр} \cdot l}{2 \cdot v},$$

где l – длина пролета.

Этот случай является расчетным для выбора расстояния между тросом и проводом, поскольку это уравнение связывает характеристики пролета воздушной линии с крутизной фронта тока молнии *a*.

Зная характеристики пролета, по нему можно определить значение *a*, при котором становится возможным пробой промежутка между тросом и проводом. Затем, используя зависимость вероятности крутизны фронта тока молнии, можно определить вероятность такого пробоя. Или же, задаваясь вероятностью пробоя, т. е. некоторым значением крутизны *a*, по этому уравнению можно определить требуемую электрическую прочность промежутка трос-провод и по экспериментальным данным — необходимое расстояние между ними.

Опыт эксплуатации показывает, что вероятность пробоя между тросом и проводом пренебрежимо мала, если расстояние трос-провод по вертикали составляет не менее 2 % длины пролета, например 8 м при длине пролета 400 м.

При ударе молнии ***в вершину опоры*** напряжение на изоляции линии равно разности потенциалов на опоре и на проводе.

Потенциал пораженной опоры определяется падением напряжения на сопротивлении заземления (импульсном), индуктивности опоры и составляющей, обусловленной индуктивностью между каналом молнии и телом опоры.

Потенциал провода имеет три составляющие: рабочее напряжение; напряжение, индуктированное на проводе зарядом лидера молнии (электрическая составляющая индуктированного напряжения); напряжение, индуктированное на проводе в результате распространения по тросам импульсов напряжения с вершины опоры.

Напряжение на изоляции линии необходимо сравнивать с напряжением перекрытия гирлянды при предразрядном времени, равном длительности фронта импульса тока молнии $\tau_ф$.

Вероятность перекрытия изоляции при ударе молнии в опору можно определить по значению критического тока (перекрытие изоляции произойдет, если ток превысит критическое значение)

$$I_{кр} = \frac{U_{50\%}}{R_и + \delta \cdot h_{оп}},$$

где $\delta = 0{,}15$ для линий с двумя тросами и $\delta = 0{,}3$ для линий с одним тросом.

Вероятность ***прорыва молнии через тросовую защиту*** принято определять в соответствии с опытом эксплуатации по эмпирической формуле

$$\lg P_\alpha = \frac{\alpha\sqrt{h_{оп}}}{90} - 4,$$

где $h_{оп}$ — высота опоры, м; α — угол защиты, образованный вертикалью, проходящей через трос, и прямой, соединяющей трос с проводом (рис. 3), и характеризующий экранирующее действие тросов.

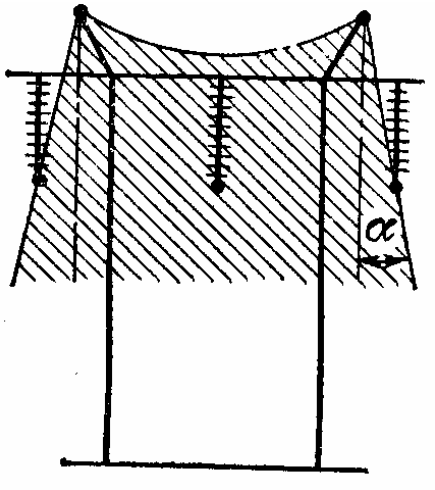


Рис. 3. Определение защитного угла тросов

Защитные аппараты и устройства

Задача защитного аппарата состоит в том, что он предотвращает появление на электроустановке импульсов перенапряжений, опасных для ее изоляции, и не препятствует работе электроустановки при рабочем напряжении.

Защитные (искровые) промежутки

Простейшим защитным устройством является ***искровой промежуток***, включенный параллельно изоляционной конструкции. Конструктивно ЗП выполняются в виде стержневых электродов, создающих резконеоднородное поле. Для предупреждения перекрытия или пробоя изоляции вольт-секундная характеристика защитного искрового промежутка (ЗП) с учетом разброса должна в идеальном случае лежать ниже вольт-секундной характеристики защищаемой изоляции (рис. 1).

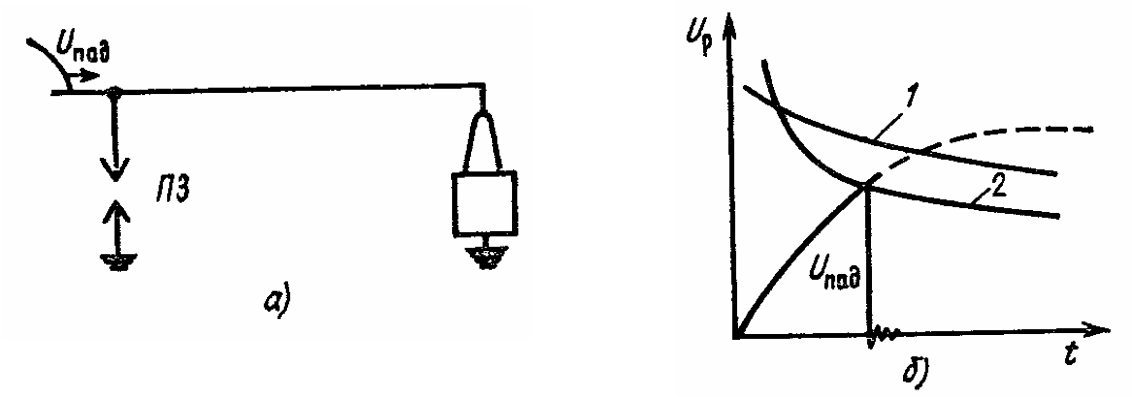


Рис. 1. Принцип действия защитного промежутка

При выполнении этого требования появление опасных для изоляции электроустановок перенапряжений невозможно, так как при набегании импульса напряжения $U_{пад}$ происходит пробой ЗП с последующим резким па-

дением напряжения.

Но вслед за импульсным током через защитный промежуток по ионизированному пути устремляется ток, обусловленный напряжением промышленной частоты, — ***сопровождающий ток***. При этом может не погаснуть и импульсный пробой переходит в устойчивое короткое замыкание, которое вызывает аварийное отключение электроустановки. Чтобы этого избежать, следует обеспечить гашение дуги сопровождающего тока.

Защитные аппараты, обеспечивающие не только защиту изоляции от перенапряжений, но и гашение дуги сопровождающего тока в течение времени меньшего, чем время действия релейной защиты, получили название ***защитных разрядников.***

Переход импульсного тока при пробое ЗП в устойчивую дугу может сопровождаться аварийным отключением, поэтому ЗП желательно устанавливать лишь на тех участках сети, которые оборудованы устройствами автоматического повторного включения (АПВ).

Искровые промежутки являются самым простым и дешевым устройством защиты от перенапряжений. В сетях напряжением 3..35 кВ ЗП могут выполняться в виде рогов, способствующих растягиванию и гашению дуги из-за электродинамических сил и тепловых потоков. В сетях до 35 кВ длина защитного промежутка мала, и для предотвращения замыкания промежутка птицами в заземляющих спусках создаются дополнительные искровые промежутки.

Искровые промежутки обладают целым рядом ***недостатков***, основные из которых следующие:

1) срабатывание искровых промежутков приводит к короткому замыканию, которое должно отключаться выключателями; при переходном процессе среза напряжения могут возникнуть перенапряжения на продольной изоляции трансформаторов, реакторов и электрических машин;

2) большой статистический разброс пробивных напряжений затрудняет координацию изоляции;

3) вольт-секундная характеристика искрового промежутка из-за резкой неоднородности поля имеет подъем в области малых времен, соответствующих грозовым перенапряжениям, и защищаемая изоляция может остаться незащищенной (рис. 1).

Трубчатые разрядники

Принципиальная схема устройства и включения трубчатого разрядника (ТР) показана на рис. 2. Основу разрядника составляет трубка из газогенерирующего материала. Один конец трубки заглушен металлической крышкой, на которой укреплен внутренний стержневой электрод. На открытом конце трубки расположен другой электрод в виде кольца. Промежуток между стержневым и кольцевым электродами называется внутренним, или дугогасящим, промежутком. Трубка отделяется от провода фазы внешним искровым промежутком, иначе газогенерирующий материал трубки постоянно разла-

гался бы под действием токов утечки.

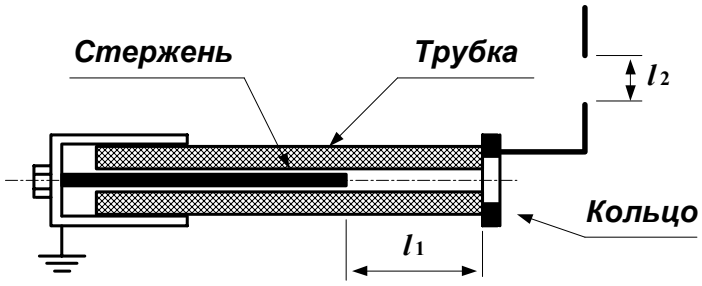


Рис. 2. Устройство трубчатого разрядника

Защитная функция трубчатым разрядником выполняется так же, как и простым искровым промежутком. Под действием высокой температуры канала дуги переменного тока в трубке происходит интенсивное выделение газа. Давление в трубке увеличивается. Газы, устремляясь к открытому концу трубки, создают продольное дутье, в результате чего дуга гасится. Срабатывание разрядника сопровождается выхлопом раскаленных газов и звуком, напоминающим выстрел.

Поскольку работа трубчатого разрядника сопровождается выхлопом сильно ионизированных газов, расположение их на опоре должно быть таким, чтобы выхлопные газы не вызывали междуфазных перекрытий или перекрытий на землю. Основное применение трубчатых разрядников сводится к защите подходов к подстанциям, защите оборудования маломощных подстанций 3-10 кВ.

В соответствии с выполняемыми функциями трубчатый разрядник характеризуется ***двумя группами параметров***. К первой группе относится номинальное напряжение, пробивное напряжение промышленной частоты, импульсное пробивное напряжение и вольт-секундная характеристика. Ко второй группе относятся нижний и верхний пределы отключаемых токов.

В маркировке трубчатых разрядников указываются номинальное напряжение и пределы отключаемых токов. Например, марка РТФ 110/0,8-5 означает: разрядник трубчатый фибробакелитовый на напряжение 110 кВ с пределами отключаемых токов 0,8—5 кА (действующее значение).

Вентильные разрядники

Вентильные разрядники являются другой разновидностью искровых промежутков, отличающихся слабой неоднородностью электрического поля и нелинейным резистором для гашения дуги. Защитная функция вентильным разрядником выполняется так же, как и простым искровым промежутком, но в связи с однородностью электрического поля вольт-секундная характеристика разрядника существенно лучше, чем у трубчатого, и меньше статистический разброс пробивных напряжений.

Отключение возникшего короткого замыкания производится с помощью ***нелинейного резистора***, включенного последовательно с искровым промежутком. Сопротивление этого резистора велико при рабочем напряже-

нии и резко снижается при повышенном напряжении. Нелинейные резисторы выполняются в виде дисков, состоящих из карборундового порошка (SiC) и связующего материала.

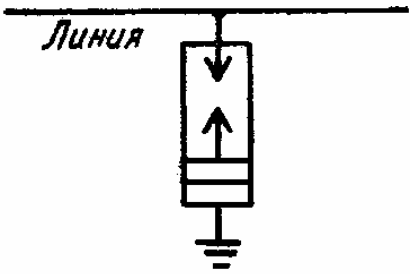


Рис. 3. Схема включения вентильного разрядника

Простейший единичный промежуток вентильного разрядника показан на рис. 4, а. Промежуток составлен двумя латунными электродами, разделенными миканитовой шайбой.

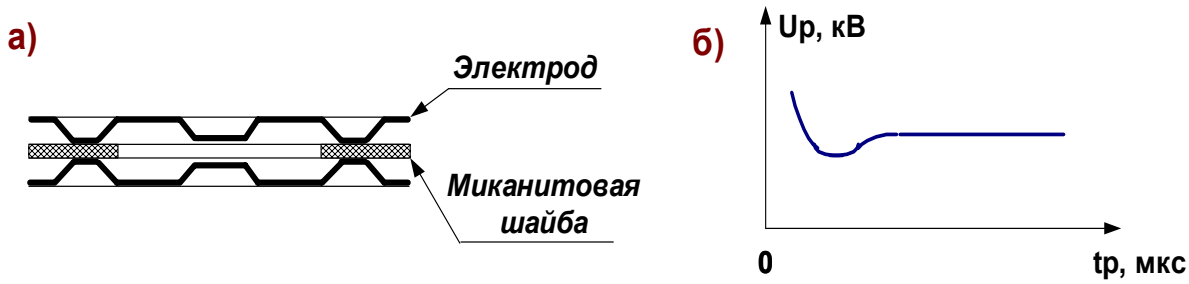


Рис. 4. Единичный искровой промежуток (а) и вид вольт-секундной характеристики разрядника с многократным искровым промежутком (б)

Единичные промежутки включаются последовательно друг с другом для улучшения гашения дуги, которая нестабильна в небольшом промежутке с холодными электродами. У многократного искрового промежутка, однако, происходит неравномерное распределение напряжения на отдельных промежутках, аналогично гирлянде изоляторов, что приводит к снижению пробивного напряжения при малых временах порядка 2-4 мкс (рис. 4, б).

Вентильные разрядники характеризуются:

1) ***номинальным*** напряжением;

2) ***наибольшим*** допустимым длительным напряженим на разряднике;

3) ***пробивным*** напряжением на частоте 50 Гц (обычно действующее значение);

4) ***остающимся*** напряжением на сопротивлении резистора при определенном импульсном токе (от 5 до 14 кА, в зависимости от типа разрядника), называемом ***током координации*** (рис. 5).

5) ***напряжением гашения*** – это наибольшее напряжение промышленной частоты на разряднике, при котором надежно обрывается сопровождающий ток (ток гашения).

6) ***пропускной способностью***, то есть минимальным количеством нор-

мированных импульсов тока, которые разрядник должен выдержать без существенного изменения его свойств. Это количество обычно равно 20.

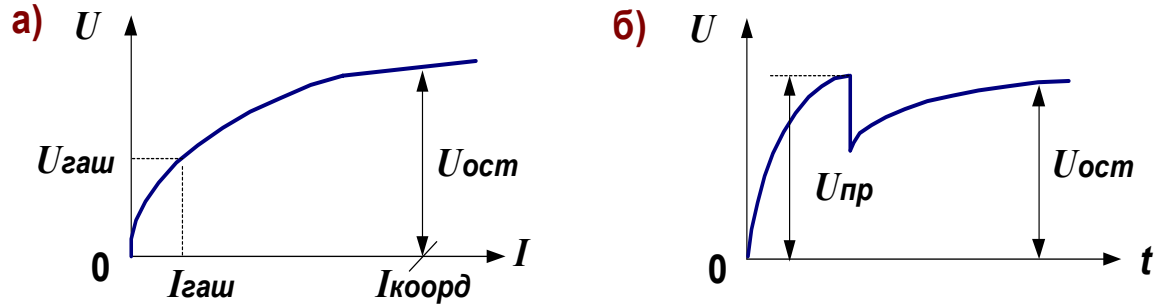


Рис. 5. Вольтамперная характеристика резистора вентильного разрядника (а) и напряжение на вентильном разряднике при его срабатывании (б)

Нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН)

Основным недостатком вентильного разрядника является сравнительно невысокая нелинейность резисторов на основе карбида кремния. Значительно большей нелинейностью обладают резисторы на основе ***окиси цинка***. Выполненные на их базе ОПН позволяют ограничивать коммутационные перенапряжения на уровне (1,65..1,8)$U_ф$, а грозовых – на уровне (2,2..2,4)$U_ф$.

Высоконелинейные оксидно-цинковые резисторы выпускаются в виде дисков диаметром от 28 до 85 мм. ОПН выполняется путем последовательного и параллельного включения таких резисторов. При рабочем напряжении через одну параллельную колонку резисторов протекает ток в доли миллиампера, и необходимость в искровом промежутке отпадает.

Защитная функция ОПН характеризуется величиной остающегося напряжения при определенной величине протекающего тока коммутационного или грозового перенапряжения. Понятия напряжения гашения у ОПН нет, однако есть наибольшее рабочее напряжение ОПН, выше которого может произойти разогрев и разрушение ОПН. Кроме того, ОПН характеризуют величиной номинального напряжения, которая указывается в маркировке ОПН.

Защита изоляции электрооборудования подстанций от прямых ударов молнии

Защита электрооборудования подстанций от прямых ударов молнии осуществляется с помощью стержневых молниеотводов. Молниеприемники устанавливаются на порталах, прожекторных мачтах и крышах зданий. Металлоконструкции порталов и мачт при этом используются в качестве токоотводов, соединяющих молниеприемники с заземлителем.

Заземлители подстанций с целью выравнивания потенциалов по их территории при аварийных замыканиях на землю и обеспечения таким образом электробезопасности персонала выполняются в виде сетки, образуемой горизонтально расположенными в земле полосами, которыми соединяются вертикальные электроды. К заземлителю присоединяются все металлоконструкции и металлические корпуса электрооборудования (баки трансформаторов, масляных выключателей и т. п.). В соответствии с нормами стационарное сопротивление заземления для подстанций 110 кВ и выше не должно превышать R =0,5 Ом.

Подстанционные здания и сооружения защищаются путем заземления металлической кровли или, если крыша неметаллическая, посредством сетки размером 5Х5 м^2 из стальной проволоки диаметром 8 мм, которая располагается на крыше и присоединяется к заземлению

Распространение волн перенапряжений вдоль проводов

Оборудование подстанций имеет гораздо более низкий уровень изоляции по сравнению с изоляцией линий электропередачи и контактной сети. Вместе с тем из-за большой протяженности линий основная доля грозовых перенапряжений возникает именно в них и, распространяясь вдоль проводов линии, достигает подстанции или поста секционирования. Перенапряжение в месте его возникновения может рассматриваться как источник, исходя из которого можно определиться и с перенапряжениями, достигающими оборудования подстанций.

Наиболее распространенным механизмом для анализа процессов в электрических цепях и предсказания их поведения являются законы Кирхгофа в совокупности с законом Ома и производные от них методы (контурных токов, узловых потенциалов, узловых напряжений и другие).

К сожалению, все эти методы не учитывают ***запаздывание распространения электромагнитного поля*** и годятся только для электрически коротких цепей. Кроме того, все элементы электрической цепи рассматриваются квантованно, то есть распределенность элементов никак не учитывается, что не позволяет говорить о распределении потенциала по элементу даже в случае электрически малой его длины.

Максимальная скорость распространения электромагнитного поля в пространстве составляет 300 м/мкс. Цепь будет электрически короткой, если время распространения поля вдоль нее много меньше времени существенно-

го изменения напряжения или тока в цепи. Считается, что для синусоидальных напряжений и токов можно говорить о небольшой длине линии, если время распространения поля вдоль нее не превышает одной десятой периода напряжения.

Для двухпроводной воздушной линии с расстоянием между проводами 3 м, высоте расположения проводов над землей 30 м и длине линии 30 км время распространения поля между проводами составит 0.01 мкс, между проводами и землей - 0.1 мкс, вдоль линии - 100 мкс, так что для электромагнитных процессов между проводами можно говорить о малых расстояниях между проводами до частот 10 Мгц, между проводами и землей - до 1 Мгц, а вдоль проводов - до частот не более 1 кГц, что соответствует частотам высших гармоник электроэнергетических систем. Именно до таких частот можно предсказывать поведение двухпроводной системы с помощью законов Кирхгофа и производных от них методов; далее нужно использовать что-нибудь другое.

Для простейшего анализа процессов можно рассматривать один провод над поверхностью хорошо проводящей плоской земли, поскольку основную опасность для оборудования представляет перенапряжение на изоляции по отношению к земле (рис. 1).

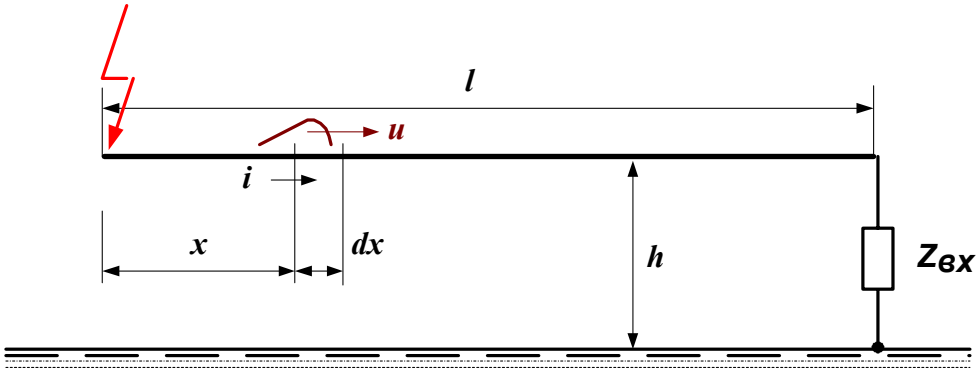


Рис. 1. Распространение волны перенапряжения по проводу линии

Если на некотором расстоянии *x* от начала линии выделить электрически короткий участок *dx*, то можно обойти трудность, связанную с невозможностью применения законов Кирхгофа к длинной линии; на малой длине *dx* при малости высоты *h* законы Кирхгофа вполне применимы.

Схема замещения участка *dx* показана на рис. 2, а, где элемент *dR* отражает потери энергии в проводе на нагрев, *dL* отображает индуктивность провода, емкостный элемент *dC* отображает запас энергии в электрическом поле между проводами, а проводимость *dG* соответствует утечке по изоляции между проводами.

В простейшей постановке резистивными элементами можно пренебречь, считая провода низкоомными, а изоляцию идеальной (рис. 2, б). Ток *i* и напряжение *u* являются функциями координаты и времени, *i=i(x,t), u=u(x,t)*, и при приросте переменной *x* на малую величину *dx* они прирастают на малые величины *di* и *du*.

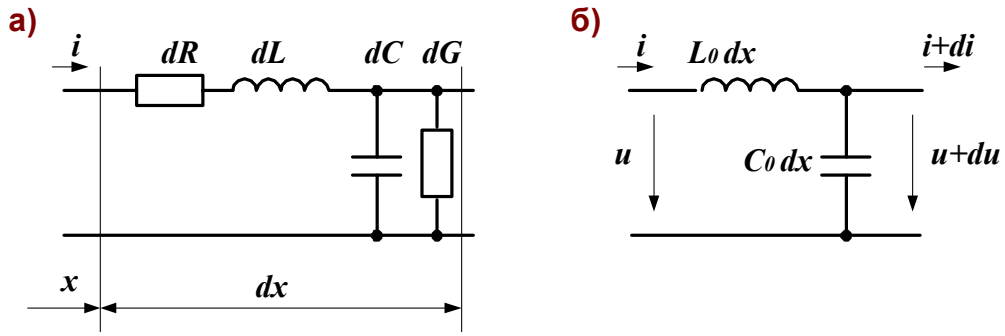


Рис. 2. Схема замещения участка линии длиной *dx*

Можно считать, что параметры схемы замещения пропорциональны длине *dx*, то есть

$$dL = L_0\,dx,\ dC = C_0\,dx,$$

где величины L_0 (Гн/км), C_0 (Ф/км), называемые ***первичными параметрами*** линии, не зависят от координаты *x* в случае однородной линии, то есть такой линии, у которой провод одинаков по всей длине и параллелен поверхности земли. Эти параметры не зависят обыкновенно также и от времени *t*. Смысл параметров следующий: L_0 - это индуктивность линии длиной 1 км, заземленной на конце, а C_0 - емкость изолированной от земли линии длиной 1 км.

Уравнения по законам Кирхгофа для малого участка *dx* по рис. 2, б выглядят следующим образом:

$$u = L\frac{\partial i}{\partial t} + u + du \quad , \quad i = dC\frac{\partial u}{\partial t} + i + di \quad ,$$

что после простейших преобразований приводит к системе дифференциальных уравнений в частных производных, называемых ***телеграфными уравнениями длинной линии***:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L_0\frac{\partial i}{\partial t}\ ; \quad -\frac{\partial i}{\partial x} = C_0\frac{\partial u}{\partial t}\ .$$

Эти уравнения решаются путем дифференцирования первого уравнения по переменной *x*, а второго уравнения – по переменной *t*:

$$-\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_0\frac{\partial^2 i}{\partial t\,\partial x}\ ; \quad -\frac{\partial^2 i}{\partial x\,\partial t} = C_0\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}\ ,$$

откуда после подстановки второго уравнения в первое (для непрерывных функций порядок дифференцирования значения не имеет) получается уравнение

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_0 C_0\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}\text{, где } \quad v^2 = \frac{1}{L_0 C_0}\ .$$

Решением такого уравнения является любая функция, зависящая от суммы или от разности переменных $x \pm vt$:

$$u = u_n(x - vt) + u_o(x + vt)\ ,$$

где слагаемое $u_п(x-vt)$ называется падающей волной напряжения, поскольку значение этой функции при приращении времени на величину Δt остается прежним на увеличенной координате $x_1 = x + v\Delta t$, а слагаемое $u_о(x+vt)$ называется отраженной волной напряжения, поскольку значение этой функции при приращении времени на величину Δt остается прежним на уменьшенной координате $x_1 = x - v\Delta t$.

Из второго уравнения системы телеграфных уравнений при подстановке полученного решения для напряжения получается уравнение для тока в линии:

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \frac{\partial u_п}{\partial t} + C_0 \frac{\partial u_о}{\partial t}.$$

Поскольку дифференцирование падающей волны напряжения по переменной *x* отличается от дифференцирования по переменной *t* только сомножителем *–v*, а для отраженной волны – сомножителем *v*,

$$\frac{\partial u_п}{\partial t} = -v\frac{\partial u_п}{\partial x}, \quad \frac{\partial u_о}{\partial t} = v\frac{\partial u_о}{\partial x},$$

то

$$\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 v \frac{\partial u_п}{\partial x} - C_0 v \frac{\partial u_о}{\partial x} = C_0 v \frac{\partial (u_п - u_о)}{\partial x}.$$

Последнее равенство означает отличие тока от разности волн напряжений только функцией времени, не зависящей от координаты *x*, что физически возможно только для постоянного тока (иначе придется говорить о бесконечно быстром распространении воздействия по линии). Не принимая во внимание постоянные токи, получим

$$i = \frac{1}{Z_B} u_п - \frac{1}{Z_B} u_о = i_п - i_о,$$

где величина

$$Z_B = \frac{1}{C_0 v} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}},$$

связывающая друг с другом падающие и отраженные волны тока и напряжения, называется ***волновым сопротивлением*** линии. Если отраженных волн нет, то

$$u = u_п(x - vt), \quad i = i_п(x - vt) \quad \text{и} \quad i = \frac{u}{Z_B}.$$

Параметры импульсов перенапряжений, набегающих на подстанцию

Распространяющийся по линии импульс напряжения деформируется и затухает. Основной причиной деформации и затухания являются импульсная корона и сопротивление земли, поскольку ток импульса замыкается через землю.

Для образования чехла импульсной короны необходима энергия, которая отбирается на фронте импульса. В результате этого происходит ***удлинение его фронта***. Если импульс короткий или срезанный, то импульсная корона приводит не только к удлинению фронта, но и к понижению амплитуды. В случае полных импульсов влияние импульсной короны сказывается в основном на удлинении фронта и в значительно меньшей степени — на снижении амплитуды.

Снижение амплитуды происходит в основном за счет активных потерь при возврате тока волны по земле и может быть рассчитано по формуле

$$U = U_{\max} e^{-a \cdot \sqrt{x}},$$

где $U_{\max}$ – амплитуда импульса напряжения в месте удара молнии; x – удаление расчетной точки от места удара, км; a – коэффициент, равный 0,07 км$^{-0,5}$ для линий напряжением 110 кВ и выше.

Удлинение фронта (на 1 км) полного импульса под действием импульсной короны можно рассчитать по эмпирической формуле

$$\Delta \tau_{ф} = \left(0{,}5 + \frac{0{,}008 \cdot U_{\max}}{h} \right) \cdot \frac{1}{K},$$

где $U_{\max}$ – амплитуда полного импульса, кВ; h – средняя высота подвеса проводов, м; K – коэффициент, равный соответственно 1,0; 1,1; 1,45; 1,55 при числе проводов в фазе соответственно 1, 2, 3, 4 и более.

Точная оценка надежности защиты электрооборудования подстанций от импульсов, приходящих с линий электропередачи, требует учета всех возможных сочетаний форм и амплитуд импульсов напряжений, образующихся на линии. Практика проектирования и эксплуатации показала, что в инженерных расчетах допустимо применение ***приближенного подхода***, состоящего в следующем: принимается, что в месте удара молнии образуется импульс напряжения бесконечной длительности с вертикальным фронтом и амплитудой, равной $U_{50\%}$ линейной изоляции. Снижением амплитуды импульса пренебрегают, а удлинение фронта волны в результате действия импульсной короны подсчитывают по указанной выше формуле.

Защита подстанций от набегающих импульсов грозовых перенапряжений. Защищенный подход, его назначение и схема

Основными аппаратами защиты электрооборудования подстанций от набегающих импульсов служат вентильные разрядники и ограничители перенапряжений.

Для того чтобы вентильный разрядник обеспечивал защиту оборудования, импульсный ток через разрядник не должен превышать тока координации. Если он превысит ток координации, то напряжение на разряднике окажется выше нормированного, что может представить опасность для изоляции оборудования.

При ударе молнии в провод вблизи подстанции ток через разрядник

может оказаться больше тока координации, поэтому прямые удары молнии в провода линии вблизи подстанции необходимо исключить. Для этого участки линии длиной 1—3 км, примыкающие к подстанциям, во всех случаях защищаются тросовыми молниеотводами. Такие участки линии получили название ***защищенных подходов к подстанциям***.

На рис. 3 показана схема защищенного подхода, когда подходящая к подстанции линия выполнена на ***деревянных опорах***. Трос подвешивается только в пределах защищенного подхода. Так как на деревянных опорах от тросов к заземлителям прокладываются по стойкам токоотводящие спуски, то прочность изоляции опоры относительно земли существенно снижается. В этом случае первая подтросовая опора является местом с ослабленной изоляцией и для того чтобы не ухудшить грозоупорность линии, в начале защищенного подхода на каждой фазе устанавливают трубчатые разрядники РТ1. В конце подхода иногда устанавливают второй комплект трубчатых разрядников РТ2, которые служат для защиты разомкнутого линейного выключателя.

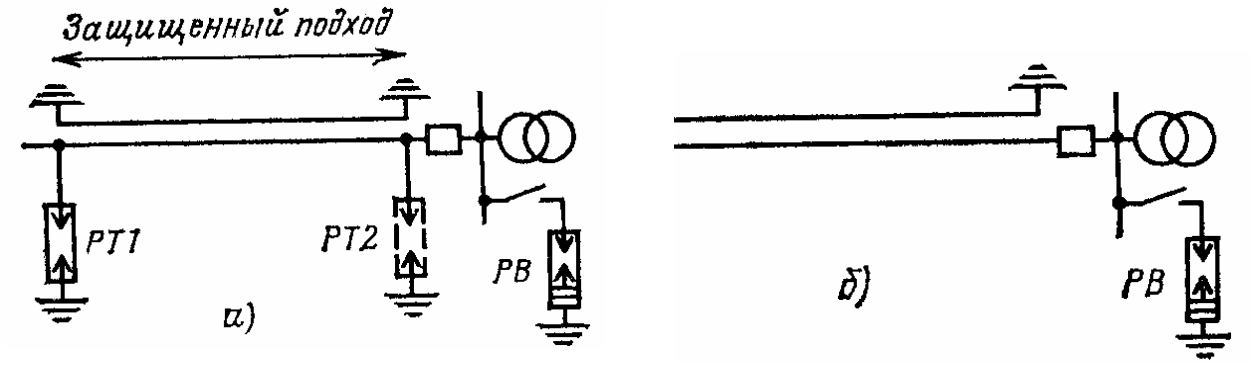


Рис. 3. Защищенный подход к подстанции для воздушной линии:
а — на деревянных опорах; б — на металлических или железобетонных опорах

Если линия выполнена на ***металлических или железобетонных опорах*** и защищена тросами по всей длине, то трубчатые разрядники на подходе не устанавливаются. Однако на примыкающих к подстанции участках линии особенно тщательно выполняются требования молниезащиты: сни-жаются сопротивления заземления опор и уменьшаются углы защиты тросов.

Рассмотрим защитное действие вентильного разрядника (рис. 4). Для простоты считаем, что на разрядник набегает импульс, приходящий по проводу с волновым сопротивлением Z (рис. 4, а).

Эквивалентная схема с сосредоточенными параметрами, приведена на рис. 4, б). Уравнение равновесия напряжений имеет вид

$$2 \cdot U_{пад} = I_p \cdot Z + U_p .$$

Если известна вольт-секундная характеристика искровых промежутков разрядника $U_{пр}(t)$, то совместное решение этого уравнения и графически заданного уравнения вольт-амперной характеристики разрядника $U_{РВ}=f(I_Р)$ позволяет построить напряжение на разряднике $U_{РВ}$ при воздействии на него

импульса $U_{пад}$.

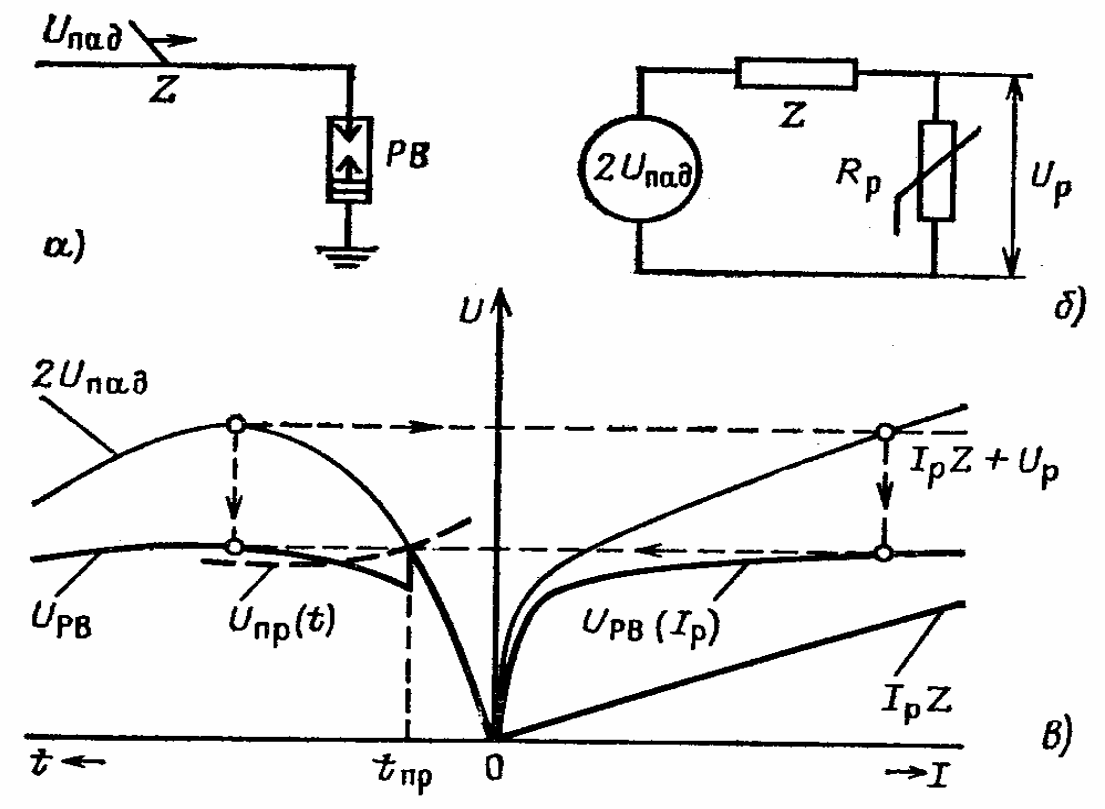


Рис. 4. Защитное действие вентильного разрядника:
а – набегание импульса; б – эквивалентная схема, в – графический расчет напряжения на разряднике

До пробоя искровых промежутков происходит отражение падающего импульса с тем же знаком, поэтому напряжение на разряднике удваивается. После пробоя искровых промежутков подключается нелинейное сопротивление разрядника, в результате чего напряжение $U_{РВ}$ удерживается примерно на уровне $U_{ост}$.

Допустимые напряжения на защищаемой изоляции оборудования

Задача проектирования молниезащиты подстанции заключается в таком размещении вентильных разрядников на территории подстанции, при котором напряжения во всех ее точках не превышают допустимых значений. Так как подстанции всегда защищаются с очень высокой степенью надежности, то в эксплуатации напряжения на изоляции достигают расчетных значений очень редко (не более 2-3 раз в течение времени жизни оборудования).

При изготовлении изоляция проходит испытания полным и срезанным импульсами, причем амплитуда срезанного импульса может превосходить амплитуду полного импульса на 20—25 %. Поэтому принято допустимые напряжения на изоляции ставить в соответствие амплитудам испытательных импульсов.

Допустимое напряжение на трансформаторе по условию работы внут-

ренней изоляции определяется по формуле

$$U_{доп} = 1{,}1(U_{п,и} - 0{,}5 \cdot U_{ном}),$$

где $U_{п,и}$ – испытательное напряжение при полном импульсе для трансформаторов, испытываемых без возбуждения, кВ; $U_{ном}$ – действующее значение номинального напряжения, кВ.

В эксплуатации трансформатор находится под напряжением промышленной частоты, поэтому второе слагаемое является поправкой на возбуждение. Коэффициентом 1,1 учитывается отличие реальной формы грозового импульса от импульса испытательного напряжения, а также ограниченное число перенапряжений в течение срока службы трансформатора.

Рассчитанные таким образом допустимые уровни грозовых перенапряжений на силовых трансформаторах и компенсирующих реакторах приведены в таблице. Числа без скобок относятся к силовым трансформаторам, а числа в скобках – к компенсирующим реакторам.

Номинальное напряжение, кВ	35	110	220	330	500	750
Испытательное напряжение полным импульсом, кВ	200	480	750	1050 (1200)	1550 (1675)	2175 (2300)
Допустимый уровень грозовых перенапряжений, кВ	210	470	705	975 (1140)	1430 (1570)	1980 (2118)

Допустимые грозовые перенапряжения для внешней изоляции (вводов, разъединителей, выключателей, конденсаторов связи) устанавливают исходя также из испытательных напряжений полным и срезанным импульсами.

Допустимые напряжения $U_{доп}$ изоляции должны лежать ниже вольт-секундной характеристики, определяемой уравнением

$$U(t) = A\sqrt{1 + T_0 / t},$$

где t — время, мкс; A и T_0 — постоянные, значения которых находят подстановкой испытательных напряжений полным и срезанным импульсами соответственно при t= 10 мкс и t=*2* мкс.

Эффективность защиты изоляции электрооборудования подстанции

Эффективность защиты подстанции характеризуется следующими показателями.

1. Среднее годовое число перекрытий изоляции подстанции вследствие ***прорывов молнии в зону защиты*** определяется как

$$\beta_1 = n_{уд} P_{пр} P_{пер} \frac{D_г}{100},$$

где $n_{уд}$ — число ударов молнии в подстанцию за 100 грозовых часов (формулу см. ранее); $P_{пр}$ — вероятность прорыва молнии в зону защиты подстанции; $P_{пер}$ — вероятность перекрытия изоляции при ударе молнии в про-

вод (определяется по критическому току); $D_г$ — число грозовых часов в районе расположения подстанции.

2. Среднее годовое число обратных перекрытий изоляции при ***ударах в молниеотводы*** равно

$$\beta_2 = n_{уд}(1 - P_{пр})P_{обр}\frac{D_г}{100}$$

где $P_{обр}$ — вероятность обратного перекрытия при ударе в молниеотвод.

Значение $P_{обр}$ определяется по критическому току $I_{кр}$, при котором становится возможным обратное перекрытие гирлянд изоляторов на порталах с молниеотводами. Критический ток находится из равенства потенциала портала при ударе молнии в установленный на нем молниеприемник и 50%-ного импульсного разрядного напряжения гирлянды

$$I_{кр}R_и + 50l = U_{50\%}$$

где $R_и$ — импульсное сопротивление заземления подстанции; l — высота точки крепления гирлянды на портале.

3. Среднее годовое число перекрытий изоляции подстанции вследствие набегания на нее опасных ***импульсов грозовых перенапряжений*** определяется по формуле

$$\beta_3 = 4 \cdot h_{тр}\left\{P_\alpha + (1 - P_\alpha)\left[\frac{4 \cdot h_{оп}}{l}P_{оп} + (1 - \frac{4 \cdot h_{оп}}{l}) \cdot P_{тр}\right]\right\} \cdot \frac{D_г}{100} \cdot \frac{m \cdot l_{з,п}}{100}$$

где $h_{тр}$ — средняя высота подвеса троса; P_α — вероятность поражения провода, т. е. вероятность прорыва молнии через тросовую защиту; $P_{оп}$ — вероятность перекрытия изоляции при ударе в опору; $P_{тр}$ — вероятность пробоя промежутка трос – провод при ударе молнии в трос в середине пролета; m — число подходящих к подстанции воздушных линий; $l_{з,п}$ — длина защищенного подхода.

4. ***Показатель грозоупорности подстанции***, представляющий собой число лет ее безаварийной работы, определяется как

$$M = \frac{1}{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3}.$$

Расчетные значения M современных подстанций составляют несколько сотен лет, т. е. на порядок превышают расчетные сроки службы электрооборудования подстанций.

Глава 3. ВОЗДЕЙСТВИЕ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ИЗОЛЯЦИЮ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Общая характеристика внутренних перенапряжений

Электрические сети высокого напряжения обладают колебательными свойствами, так как содержат сосредоточенные и распределенные индуктивности и емкости. В нормальном режиме передачи мощности эти колебательные свойства не проявляются. Одной из причин возникновения колебаний электрической и магнитной энергий, запасенных в реактивных элементах сети, являются плановые и аварийные коммутации. Каждая коммутация вызывает переходный процесс, часто сопровождающийся перенапряжениями, которые могут привести к перекрытию изоляции.

Перенапряжения, возникающие при коммутациях, называются ***коммутационными.*** Их максимальные значения зависят от многих факторов, среди которых важную роль играют схема электрической сети, характеристики выключателя.

Коммутационные перенапряжения принято подразделять на следующие виды:

1) ***фазные***, воздействующие на изоляцию токоведущих частей по отношению к земле;

2) ***междуфазные***, воздействующие на изоляцию между токоведущими частями различных фаз;

3) ***междуконтактные,*** возникающие между разомкнутыми контактами коммутационных аппаратов (выключателей, разъединителей).

Коммутационные перенапряжения возникают в результате протекания следующих переходных процессов: при включении разомкнутой линии, при автоматическом повторном включении (АПВ), при отключении конденсаторов и ненагруженных линий, при отключении больших токолв, при отключении малых индуктивных токов, при перемежающихся замыканиях на землю.

Кроме коммутационных в линиях возникают ***установившиеся перенапряжения***. Наиболее частые случаи следующие: повышение напряжения в конце разомкнутой линии, перенапряжения при установившихся КЗ, при неполнофазных режимах, при феррорезонансных явлениях.

При проектировании изоляционных конструкций используют следующие данные:

1) максимальное значение перенапряжения U_{max} ***или кратность*** $k = U_{\max} / U_{раб.наиб}$, т. е. отношение максимального значения перенапряжения к амплитуде соответствующего наибольшего допустимого рабочего напряжения;

2) форму кривой перенапряжения, которая позволяет определить длительность воздействия на изоляцию;

3) состав электрооборудования электрической сети, подверженного

действию данного вида перенапряжения.

Перечисленные характеристики имеют большой ***статистический разброс***, так как их значения зависят от большого числа факторов, в том числе имеющих случайный характер. Поэтому существенное значение для расчета необходимого уровня изоляции имеет то, сколь часто появляются перенапряжения, превосходящие заданную кратность в течение определенного интервала времени (например, в течение года), или ***Т-летний уровень перенапряжений,*** т. е. такая кратность перенапряжений, которая может быть достигнута или превзойдена в среднем 1 раз в Т лет.

Перенапряжения установившегося режима

Повышение напряжения в конце разомкнутой линии за счет емкостного эффекта линии

В режиме синхронизации или внезапного сброса нагрузки к источнику синусоидальной ЭДС оказывается подключенной разомкнутая линия (рис. 1).

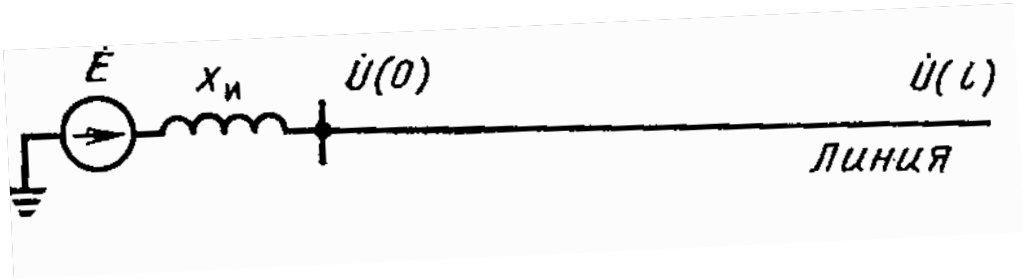


Рис. 1. Включение разомкнутой линии к источнику синусоидальной ЭДС

Так как ток в конце линии $\dot{I}(l) = 0$, то напряжение и ток в начале линии связаны с напряжением в конце следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \dot{U}(0) &= \dot{U}(l) \cdot ch(\dot{\gamma} \cdot l), \\ \dot{I}(0) &= \frac{\dot{U}(l)}{\dot{Z}_c} \cdot sh(\dot{\gamma} \cdot l), \end{aligned} \qquad (1)$$

где $\dot{\gamma}$ — постоянная распространения.

При неучете коронирования проводов

$$\dot{\gamma} = \sqrt{(R' + j\omega L') \cdot j\omega \cdot C'} = j\omega\sqrt{L'C'}\sqrt{1 + \frac{R'}{j\omega L'}},$$

где $\omega = 314$ с$^{-1}$ — частота источника; R', L', C' — сопротивление, индуктивность и емкость линии на единицу длины (чаще всего за единицу длины линии берется 1 км).

Последнее выражение можно упростить, используя формулу приближенного вычисления ($\sqrt{1 + a/b} \approx 1 + a/(2b)$, при $a \lhd\lhd b$), если учесть, что для воздушных линий электропередачи $R' \lhd\lhd j\omega L'$

$$\dot{\gamma} \approx j\omega\sqrt{L'C'} \cdot \sqrt{1+\frac{R'}{j2\omega L'}} = \frac{R'}{2\sqrt{\frac{L'}{C'}}} + j\omega\sqrt{L'C'} = \alpha + j \cdot \beta,$$

где α — коэффициент затухания; $\beta = \omega / c = 1{,}05 \cdot 10^{-3}$ рад/км — коэффициент изменения фазы.

Волновое сопротивление линии

$$\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{(R' + j\omega L')}{j\omega C'}} \approx \sqrt{\frac{L'}{C'}}\left(1 + \frac{R'}{j2\omega L'}\right) = Z_c(1 - j\frac{\alpha}{\beta}).$$

Если схема далека от резонансных условий на частоте источника ω, влияние активного сопротивления R' мало, то уравнения (1) принимают вид

$$\dot{U}(0) = \dot{U}(l) \cdot \cos(\beta \cdot l),$$

$$\dot{I}(0) = j\frac{\dot{U}(l)}{\dot{Z}_c} \cdot \sin(\beta \cdot l).$$

Отношение напряжения в конце линии к напряжению в начале линии называется ***коэффициентом передачи***:

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}(l)}{\dot{U}(0)} = \frac{1}{ch(\gamma \cdot l)} = \frac{1}{ch(\gamma \cdot l) \cdot \cos(\beta \cdot l) + j \cdot sh(\alpha \cdot l) \cdot \sin(\beta \cdot l)}.$$

Поскольку $\alpha \cdot l \lhd\lhd 1$, $ch(\alpha \cdot l) \approx 1$ и $sh(\alpha \cdot l) \approx \alpha \cdot l$, то

$$\dot{K} = \frac{1}{\cos(\beta \cdot l) + j \cdot \frac{\alpha}{\beta} \cdot \beta \cdot l \cdot \sin(\beta \cdot l)}.$$

На основе этого уравнения на рис. 2 построена зависимость 1, которая четко выявляет резонансные свойства схемы.

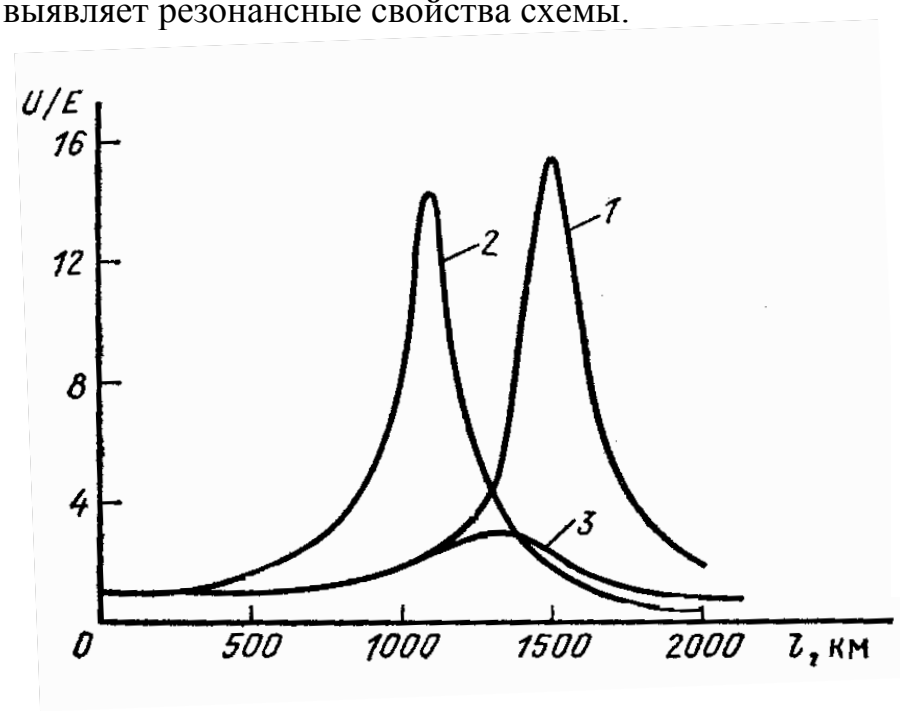


Рис. 2. Резонансные кривые:
1 – индуктивное сопротивление источника $X_u = 0$;
2 – $X_u \neq 0$;
3 – $X_u = 0$, с учетом коронирования

Резонанс наступает при $\beta \cdot l = \pi / 2$, т. е. при $l = 1500$ км, если $f = 50$ Гц.

Линия такой длины имеет период собственных колебаний

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = \frac{4l}{c} = 4\sqrt{L'C'} \cdot l = \frac{4\beta \cdot l}{\omega} = \frac{2\pi}{\omega}$$

и частоту собственных колебаний, равную частоте источника ω.

Напряжение в конце линии при резонансе нужно определять с учетом сопротивления R', и для $\beta \cdot l = \pi / 2$

$$\dot{U}(l) = \frac{\dot{U}(0)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\alpha}{\beta}} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\dot{U}(0)}{\frac{R'}{2\sqrt{\frac{L'}{C'}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{L'C'}}} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\omega \cdot L'}{R'} \cdot \dot{U}(0) = \frac{4}{\pi} \cdot Q \cdot \dot{U}(0),$$

где Q - добротность линии.

В случае, когда источник обладает внутренним сопротивлением X_u, точка резонанса сдвигается в сторону меньших длин (кривая 2 на рис. 2), так как к индуктивности линии добавляется индуктивность источника

Таким образом, в разомкнутой линии большой длины, присоединенной к источнику с внутренним сопротивлением X_u, возможны повышения напряжения из-за прохождения емкостного тока линии через индуктивность источника и индуктивность линии. Этот эффект, названный ***емкостным эффектом***, особенно проявляется в линиях СВН большой длины. Резонанс является частным случаем проявления емкостного эффекта. Он наступает, когда входное сопротивление линии, носящее емкостный характер, равно индуктивному сопротивлению источника, что эквивалентно равенству первой частоты собственных колебаний схемы частоте источника.

Повышение напряжения на линии может привести к появлению короны. Вследствие значительных активных потерь при коронировании резонансная кривая получается менее острой (кривая 3 на рис. 2), чем при отсутствии короны, с максимумом, сдвинутым в сторону меньших длин.

При больших длинах участков линии (более 300 км) и малой мощности связываемых систем на линии устанавливают ***шунтирующие реакторы***, компенсирующие емкостный эффект линии.

Установившиеся перенапряжения при коротких замыканиях

При возникновении на линии однофазного короткого замыкания (КЗ) на неповрежденных фазах установившиеся перенапряжения не превышают $1{,}3U_ф$, что допустимо с учетом кратковременности этого режима. Но, как правило, выключатели на обоих концах линии ***срабатывают неодновременно***, и в течение примерно 1 с может существовать режим одностороннего питания. Этот режим связан со значительными перенапряжениями на неповрежденных фазах, так как на повышение напряжения, обусловленное емкостным эффектом, накладывается дополнительное повышение напряжения за счет несимметрии при однофазном коротком замыкании.

Расчет напряжения в режиме однофазного КЗ можно выполнить с помощью метода симметричных составляющих.

Феррорезонансные перенапряжения

Феррорезонансные перенапряжения возникают в электропередаче, когда в силу различных причин происходит насыщение магнитопроводов электрических машин и трансформаторов.

Различают ***феррорезонанс*** на промышленной частоте ***(гармонический)*** или на высших и низших гармониках ***(негармонический).***

Рассмотрим простейший феррорезонансный контур (рис. 3).

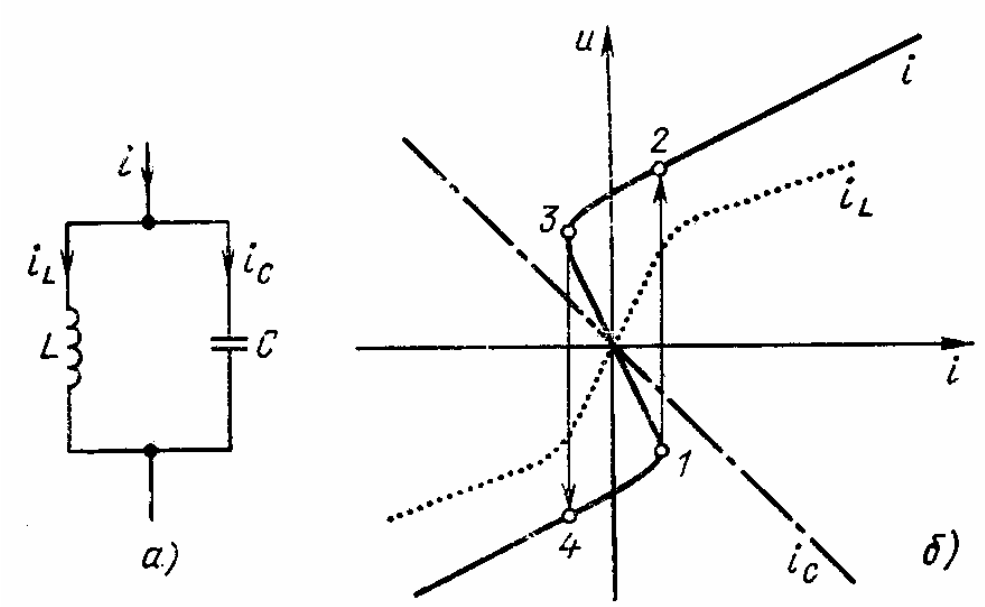


Рис. 3. Феррорезонанс в параллельном контуре

Нелинейная индуктивность L включена параллельно с емкостью С. На рис. 3, б приведены вольт-амперные характеристики участков схемы с частичными токами i_L и I_C, а также результирующая характеристика их параллельного соединения. Если в схеме проходит ток i, то справедлива характеристика, показанная в четвертом квадранте.

Точка 1 соответствует максимально возможному току в квадранте, и дальнейшее увеличение тока возможно только в соответствии с характеристикой в первом квадранте. Поэтому рабочая точка должна скачком перейти из точки 1 в точку 2, при этом приложенное к параллельной цепочке L — C напряжение меняет знак и становится существенно выше по амплитуде. Этот процесс называется ***опрокидыванием***.

При уменьшении тока аналогичный процесс опрокидывания имеет место при переходе от точки 3 к точке 4. Принципиально такие же явления возможны и при последовательном включении L и C и переменном входном напряжении.

В цепях, в которых возможны феррорезонансные колебания, опрокидывание может происходить в результате перенапряжений или неполных коммутаций, например, при отключении одной фазы ненагруженного трансформатора.

Если речь идет о простейшем феррорезонансном контуре как на рис. 3,

то в нем будет иметь место только однократное опрокидывание. Однако если схема содержит, по крайней мере, два феррорезонансных контура, то могут возникнуть стационарные феррорезонансные колебания с соответствующими перенапряжениями. Подобные случаи имеют место в трехфазных цепях.

Коммутационные перенапряжения

Отключение ненагруженного трансформатора

При работе выключателя происходит так называемый «срез» тока, когда он обрывается в выключателе не при нулевом значении, а при значении I_0 (рис. 4, а), которое зависит от амплитуды $I_{\max}$ тока, протекающего через выключатель (рис. 4, б).

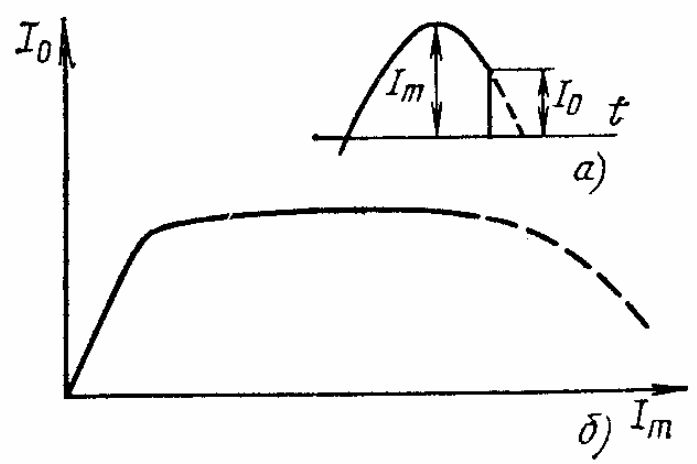


Рис. 4. Зависимость тока среза от амплитуды тока через выключатель

При небольших значениях $I_{\max}$ обрыв тока в выключателе может произойти даже в момент максимума протекающего тока, поэтому в области малых амплитуд ток среза I_0 растет пропорционально $I_{\max}$. Область насыщения соответствует максимальным значениям I_0, определяемым конкретным типом выключателя. При очень больших амплитудах проходящего через выключатель тока явление среза отсутствует из-за образования сильно ионизированного дугового канала.

Рассмотрим срез тока в выключателе схемы рис. 4, а, которая соответствует отключению ненагруженного трансформатора выключателем Q. Емкость *C* в схеме замещения обычно включает в себя входную емкость трансформатора и емкость шин до точки подключения выключателя. Индуктивность L соответствует индуктивности намагничивания трансформатора и может достигать очень больших значений (десятков генри).

В момент обрыва тока мгновенное значение напряжения на емкости равно U_0. В отключаемой части цепи к этому моменту накоплена энергия $LI^2/2$ в магнитном поле и энергия $CU^2/2$ в емкости С. Если не учитывать затухание процесса, то в контуре *LC* возникают незатухающие колебания, которые описываются уравнением

$$u_C(t) = U_0 \cos\omega_1 t + \omega_1 L I_0 \sin\omega_1 t = U_0 \cos\omega_1 t + I_0\sqrt{\frac{L}{C}}\sin\omega_1 t,$$

где $\omega_1 = 1/\sqrt{LC}$ - собственная частота колебаний контура.

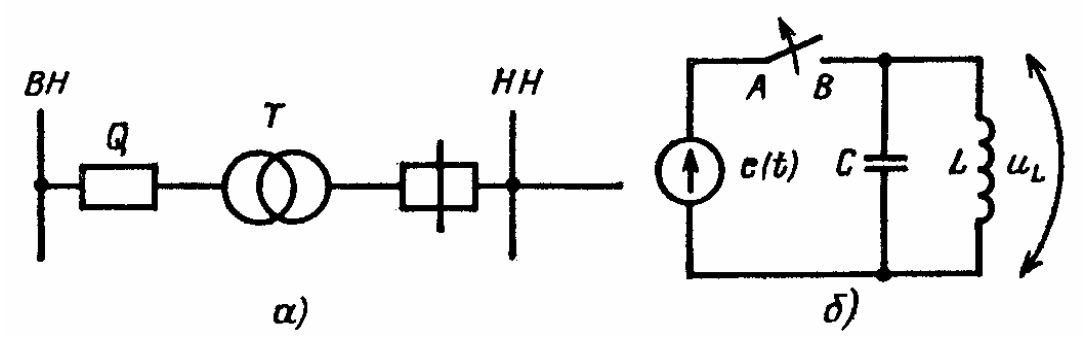


Рис. 5. Отключение ненагруженного трансформатора от шин высокого напряжения

Максимальное напряжение на отключенной цепи можно найти, используя баланс энергии

$$\frac{CU_0^2}{2} + \frac{LI_0^2}{2} = \frac{CU_{\max}^2}{2},\ U_{\max} = \sqrt{U_0^2 + \left(I_0\sqrt{\frac{L}{C}}\right)^2}.$$

Рассчитанное таким образом напряжение может достигать очень больших значений (это так называемые «ожидаемые перенапряжения»). Реальные значения напряжения меньше, так как происходят повторные зажигания дуги в выключателе.

Отключение конденсаторов

До отключения напряжение на батареи конденсаторов

$$\dot{U}_C = \dot{E}\cdot\frac{-jX_C}{-jX_C + jX_L} = \dot{E}\frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2},$$

где $\omega_1 = 1/\sqrt{LC}$ – собственная частота схемы, а L – индуктивность источника. Обычно $\omega_1 \rhd\rhd \omega$, тогда $U_C \approx E$.

Сразу после отключения напряжение на емкости не меняется. Если отключение происходит в момент максимума напряжения, то оно сохраняет свое максимальное значение $U_{C,\max} = -E_m$.

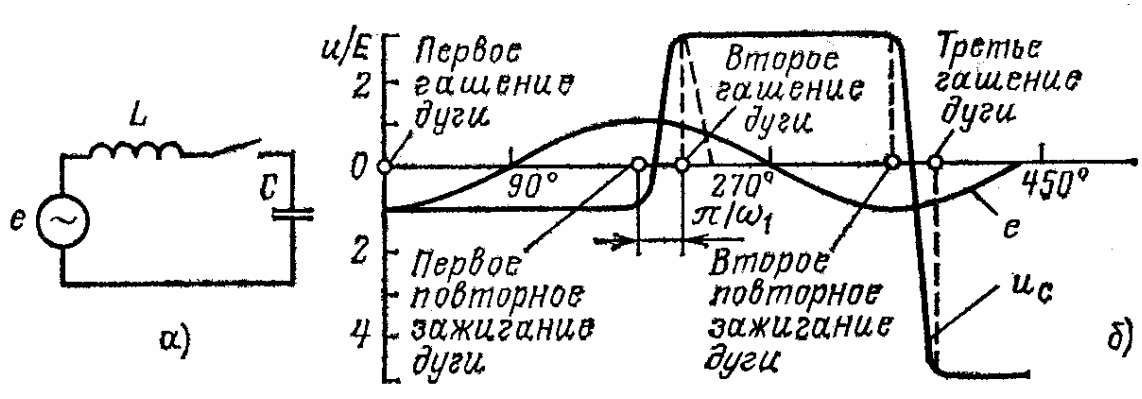


Рис. 6. Напряжение на емкости при повторных зажиганиях дуги

Разность $e(t) - u_C(t) = E_m(1 - \cos\omega t)$ представляет собой восстанавливающееся напряжение на выключателе, которое через полпериода достигает значения $2E_m$.

После обрыва тока электрическая прочность межконтактного промежутка возрастает постепенно в связи с расхождением контактов. Если восстанавливающееся напряжение между контактами окажется выше, чем прочность межконтактного промежутка, то возникает пробой промежутка, т. е. повторное включение цепи. Следующий обрыв тока может произойти при первом прохождении тока через нулевое значение. Затем появление большого восстанавливающегося напряжения может опять вызвать пробой промежутка и т. д., т. е. коммутация отключения может представлять собой серию чередующихся отключений и включений, происходящих до тех пор, пока при полном расхождении контактов дуга окончательно не оборвется.

Если бы повторные зажигания дуги в выключателе продолжались неограниченно долго, то происходило бы непрерывное возрастание перенапряжения.

Отключение ненагруженных линий

Физический процесс при отключении ненагруженных линий имеет тот же характер, что и при отключении сосредоточенных емкостей, однако обладает своими особенностями. В линиях СВН большой длины проявляется емкостный эффект и потому остающееся на линии после отключения напряжение может быть ***больше, чем амплитуда ЭДС источника***.

Кроме того, при повторном зажигании дуги в выключателе возникает ряд свободных составляющих. Происходит увеличение амплитуды первой свободной составляющей по сравнению со случаем простого колебательного контура, а многократные отражения волн от индуктивности источника и от разомкнутого конца линии могут привести к дополнительному увеличению максимального значения перенапряжений.

Включение разомкнутой линии

Возникающий при подключении линии к шинам станции или подстанции переходный процесс можно рассмотреть, пользуясь схемой рис. 7. Разомкнутая линия длиной подключается к источнику синусоидальной ЭДС с внутренней индуктивностью $L_и$.

При этом возникает вынужденная составляющая напряжения $A_{уст}$, соответствует установившемуся значению, и свободные составляющие A_k (k – порядок гармоники вынужденной составляющей). Максимальное напряжение при этом будет в конце линии.

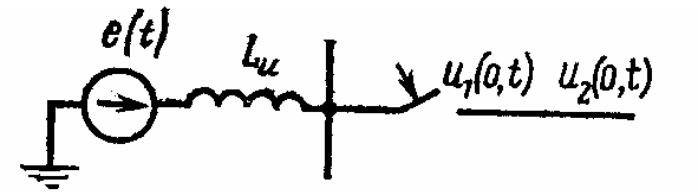


Рис. 7. Подключение разомкнутой линии к источнику

На рис. 8 приведены кривая напряжения в конце линии и ее составляющие. Максимальные значения вынужденной и первых двух свободных составляющих могут совпадать, что и наблюдается в приведенном случае в момент времени $t = \pi / \omega$:

$$U_{\max} \approx A_{уст} + A_1 + A_2 .$$

При этом ударный коэффициент

$$K_{уд} = \frac{U_{\max}}{A_{уст}} \approx \frac{A_{уст} + A_1 + A_2}{A_{уст}} = 1 + \frac{A_1 + A_2}{A_{уст}} \triangleright 2 .$$

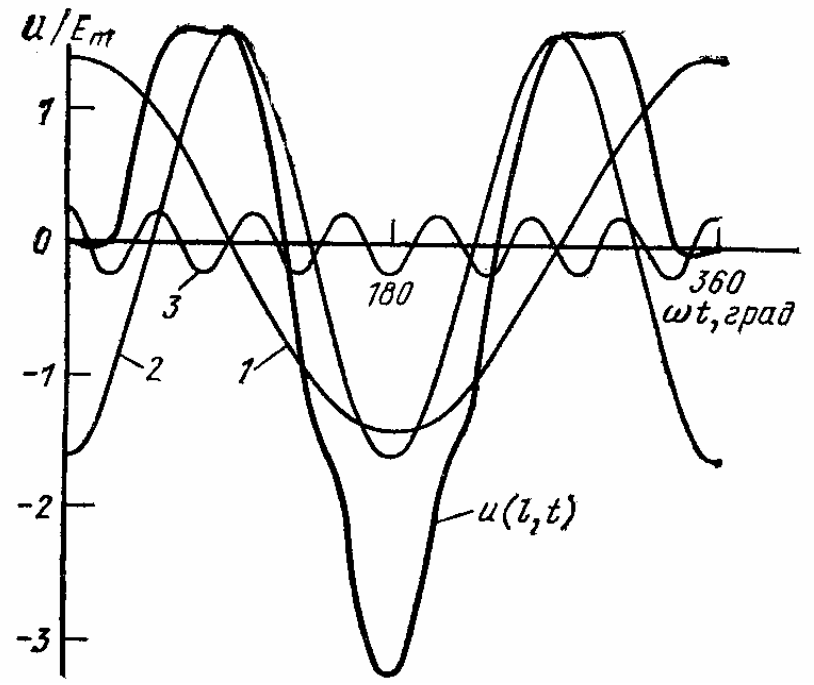


Рис. 8. Напряжение $U(l,t)$ в конце разомкнутой линии и его составляющие
1 – вынужденная составляющая; 2 – первая гармоника свободной составляющей; 3 – вторая гармоника свободной составляющей

Отключение больших токов

При коротком замыкании на линии напряжение в месте КЗ обычно близко к нулю (рис. 9, б). После отключения выключателя Q2 напряжение в конце линии возрастает до установившегося. Поскольку восстановление напряжения происходит в результате переходного колебательного процесса, то его свободные составляющие, наложенные на амплитуду установившегося напряжения, могут привести к появлению перенапряжения.

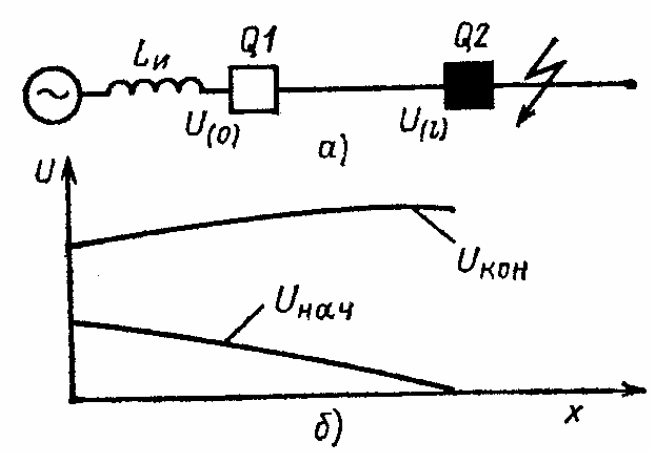


Рис. 9. Отключение тока КЗ
а – схема; б - распределение напряжения до отключения ($U_{нач}$) и после отключения КЗ ($U_{кон}$)

Одностороннее отключение КЗ подобно включению разомкнутой линии. Поэтому амплитуды установившегося напряжения и частоты собственных колебаний в обоих случаях одинаковы. Значения же амплитуд свободных составляющих различны. Различие обусловлено тем, что в случае включения линии ее емкость не заряжена, а в случае отключения КЗ ***емкость линии заряжена*** до некоторого начального значения напряжения. Это обстоятельство уменьшает амплитуду свободных колебаний при отключении КЗ по сравнению с режимом включения линии.

Перенапряжения при автоматическом повторном включении (АПВ)

Использование АПВ основано на том, что большинство замыканий носит дуговой характер. Поэтому при отключении участка линии с КЗ с двух сторон дуга может погаснуть и линия может быть снова включена через время $t_{АПВ}$.

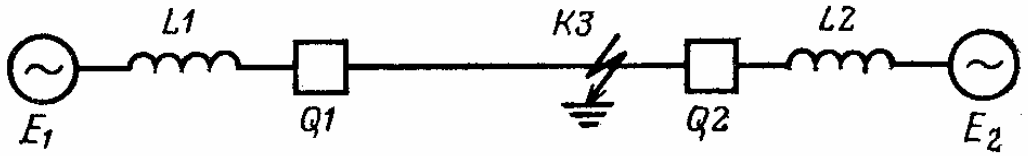


Рис. 10. Схема АПВ

Цикл АПВ можно подразделить на следующие этапы:

1) отключение линии выключателем Q2, ближайшим к месту КЗ, приводящее к кратковременному режиму одностороннего питания линии;

2) отключение неповрежденных фаз линии выключателем Q1;

3) повторное включение разомкнутой линии выключателем Q1;

4) замыкание выключателя Q2 и восстановление нормальной схемы электроснабжения.

После отключения выключателя Q2 напряжения на неповрежденных фазах в начале и в конце линии отличаются друг от друга и от ЭДС источника вследствие емкостного эффекта и КЗ на поврежденной фазе.

После отключения линии выключателем Q1 заряд на поврежденной фазе стекает в землю через дугу, а на неповрежденных фазах происходит процесс выравнивания напряжения. Заряд на неповрежденных фазах линии без реакторов поперечной компенсации медленно стекает в землю через активные проводимости, которые определяются степенью загрязнения поверхности изоляторов и метеорологическими условиями.

Максимальные перенапряжения возникают при повторном включении разомкнутой линии выключателем Q1.

Таким образом, при АПВ после однофазного или двухфазного замыкания переходный процесс отличается от включения ненагруженной линии возможным наличием зарядов на неповрежденных фазах линии.

Перенапряжения при перемежающихся замыканиях на землю

Большинство замыканий на землю в электрических системах сопровождается возникновением дуги. В сети ***с заземленной нейтралью*** ток короткого замыкания на землю может быть весьма большим, представляющим опасность для электрооборудования, и потому релейная защита отключает выключатель. В сети ***с изолированной нейтралью*** или нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор, ток замыкания не представляет опасности для элементов электропередачи и потому может сразу не отключаться. Возникшая при этом дуга может существовать относительно долго.

При изолированной нейтрали через место замыкания на землю проходит емкостный ток (рис. 11). (Поскольку рассматривается короткая линия, то собственную индуктивность линий можно не учитывать, а емкости считать сосредоточенными.)

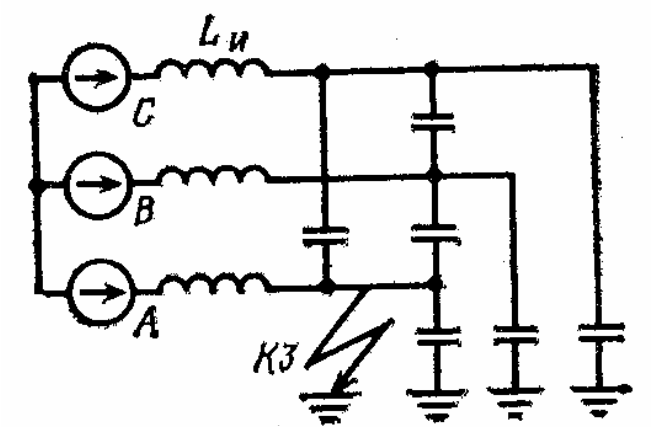


Рис. 11. Схема замещения сети с изолированной нейтралью

В небольших сетях 6—35 кВ ток однофазного замыкания на землю имеет значение нескольких ампер. Наличие замыкания на землю практически

не сказывается на условиях передачи энергии потребителям. При малых токах замыкания наблюдается быстрое самопогасание дуги. Фактором, способствующим гашению открытой дуги в воздухе, является ее удлинение под действием динамических усилий и потоков воздуха.

Увеличение протяженности линий приводит к увеличению емкостного тока до десятков и сотен ампер, что затрудняет условия гашения дуги. Даже включение дугогасящего реактора не мешает процессу быть неустойчивым. Окончательному погасанию дуги предшествует несколько «попыток гашения» при переходе тока через нулевое значение с последующим повторным зажиганием дуги. Такая ***перемежающаяся дуга*** приводит к появлению колебаний, возникающих при каждом обрыве тока и его зажигании. Переходный процесс часто сопровождается появлением перенапряжений, которые возникают аналогично перенапряжениям при отключении ненагруженных линий.

Ограничение внутренних перенапряжений

Защита от внутренних перенапряжений основана на следующих ***принципах:***

1) на ограничении числа режимов, в которых могут возникать опасные перенапряжения, с помощью схемных мероприятий;

2) на ограничении амплитуд установившихся перенапряжений, что приводит также и к снижению перенапряжений переходного процесса;

3) на ограничении амплитуд коммутационных перенапряжений с помощью вентильных разрядников или встроенных в выключатели шунтирующих сопротивлений.

К схемным мероприятиям, способствующим снижению амплитуд коммутационных перенапряжений, следует отнести установку при включении линии пониженных коэффициентов трансформации силовых трансформаторов, подключение линии сначала к более мощным шинам, предварительное до коммутации линии подключение реакторов поперечной компенсации на высшем и среднем (или третичном) напряжениях.

Ограничение амплитуд коммутационных перенапряжений производится либо за счет рассеивания энергии свободных колебаний:

1) в нелинейных сопротивлениях вентильных разрядников, включенных между фазным проводом и землей;

2) с помощью сопротивлений, встроенных в выключатель и подключаемых кратковременно последовательно с линией за время, достаточное для необходимого демпфирования свободных колебаний.

Последнее реализовано ***в выключателях двухступенчатого действия с шунтирующими сопротивлениями.*** Две принципиальные схемы таких выключателей приведены на рис. 11.

При включении сначала замыкаются вспомогательные контакты 2, т. е. цепь включается через резистор. Затем с небольшой выдержкой времени замыкаются главные контакты 1. При отключении сначала первыми размыкаются контакты 1, а потом контакты 2.

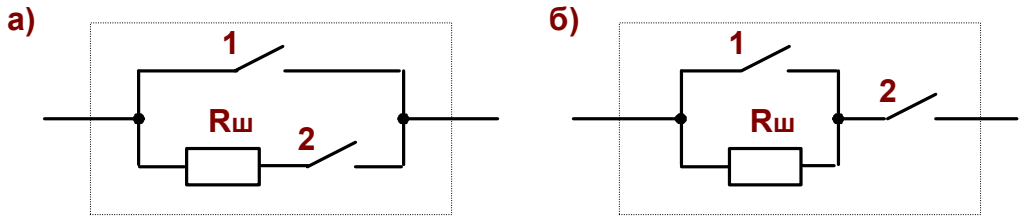


Рис. 11. Схемы выключателя с шунтирующим резистором

Меньшие значения перенапряжений можно также получить подбором благоприятных начальных значений переходного процесса, при которых амплитуды свободных колебаний имеют минимальные значения.

Допустимые значения коммутационных перенапряжений

В таблице приведены так называемые «нормальные уровни коммутационных перенапряжений» для разных классов напряжений, представляющие собой допустимые значения внутренних перенапряжений.

$U_{ном}$, кВ	$U_{доп}/U_ф$	
	Для линейной изоляции	Для подстанционной изоляции
330	2,4	2,2
500	2,2	2,0
750	2,0	1,8
1150	1,7	1,65

Как видно из таблицы, с увеличением номинального напряжения электропередачи допустимый уровень внутренних перенапряжений уменьшается. Это связано с высокой стоимостью высоковольтной изоляции.

Рекомендуемая литература

Основная литература

1 Техника высоких напряжений : Учеб. по направлению 650900 "Электроэнергетика" и специальности "Высоковольт. электроэнергетика и электротехника" И. М. Богатенков, Ю. Н. Бочаров, Н. И. Гумерова [и др.] ; Под общ. ред. Г.С. Кучинского. - СПб. : Энергоатомиздат. С.-Петерб. отд-ние, 2003.

2 125 вопросов и ответов по ЭТМ и ТВН : Учеб. пособие В.В. Егоров, А.А. Смирнов ; Петерб. гос. ун-т путей сообщ. М-ва путей сообщ. Рос. Федерации (ПГУПС - ЛИИЖТ) СПб. : Петерб. гос. ун-т путей сообщ., 2003.

Дополнительная литература

3 Электротехнические материалы и техника высоких напряжений. Руководство к выполнению лабораторных работ № 1-6 для студентов IV курса специальности 100400. Электроснабжение (железнодорожный транспорт) / РГОТУПС; Сост. А. С. Серебряков, Москва, 2000. – 58 с.

4 Шеховцев В. П. Расчет и проектирование схем электроснабжения. Методическое пособие для курсового проектирования. – М.: Форум: Инфра – М, 2003. – 214 с.

5 Перенапряжения и молниезащита : Учеб. пособие для слушателей системы повышения квалификации и переподгот. кадров М-во образования Рос. Федерации. Новосиб. гос. акад. вод. трансп.; Под ред. В. П. Горелова Новосибирск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2002.

6 Изоляция и перенапряжения в системах электроснабжения : Учеб. пособие С. В. Горелов, Л. Н. Татьянченко, С. О. Хомутов; М-во образования Рос. Федерации. Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2002.

7 Базуткин В. В., Ларионов В. П., Пинталь С. Ю. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.

8 Кучинский Г. С., Кизеветтер В. Е., Пинталь Ю. С. Изоляция установок высокого напряжения. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.

9 Чунихин А. А., Жаворонков М. А. Аппараты высокого напряжения: Учеб. пособие для вузов. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.