

Министерство образования Российской Федерации

Дальневосточный государственный технический университет

В.Н. Лифанов

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИЯ И ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

Учебное пособие

Владивосток

2003

УДК 621.3.048.015.3

Лифанов В.Н. Электроизоляция и перенапряжения: / Учеб. пособие.-
Вл-к.: ДВГТУ, 2003. С.12.

Рассмотрены физические явления и характеристики внешней изоляции, грозозащита линий электропередачи, распределительных устройств и электрических машин, координация изоляции электрооборудования и контроль ее разрушающим и неразрушающим методами, даны различные способы контроля качества изоляции.

Для студентов энергетических специальностей.

Утверждено в качестве учебного пособия редакционно-издательским советом университета

Ответственный редактор О. М. Димитрук

Рецензенты: д-р техн. наук П. С. Гордиенко, зам. главного инж. Ю. В. Вяткин

ISBN

Дальневосточный государственный
технический университет, 2003

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие представляет собой конспективное изложение лекционного курса "Электроизоляция и перенапряжения", читаемого для специальностей 1001 "Электрические станции" и 1004 "Электрооборудование промышленных предприятий" на кафедре Электроэнергетики ДВГТУ.

В соответствии с учебным планом специальностей 1001 и 1004 предусматривается предварительное изучение и практическое усвоение студентами основных вопросов физики, электротехнических материалов и теоретических основ электротехники в объеме требований, предъявляемых к изучению и навыку работы специалистов в области техники высоких напряжений. Эти знания позволяют усвоить теоретические разделы и выполнить лабораторные работы по курсу "Электроизоляция и перенапряжения".

Назначение пособия - помочь студенту ориентироваться и в большом материале учебников, которые ему предлагаются для ознакомления в процессе обучения; полно изучить физические явления и процессы в высоковольтных устройствах и изоляционных конструкциях, чтобы грамотно эксплуатировать электрооборудование в области контроля качества изоляции.

Глава 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНЕШНЕЙ ИЗОЛЯЦИИ

1.1. Процессы в газовом разрядном промежутке

Виды разрядов

С увеличением разности потенциалов между электродами в газовом разрядном промежутке теряются электроизоляционные свойства. Процесс разрушения газового диэлектрика называется разрядом, а разность потенциалов при завершении разряда - разрядным напряжением.

В газовом разрядном промежутке различают виды разрядов, которые характерны для разреженных газов ($\delta S < 1$) и газов с большой плотностью ($\delta S > 1$), где δ - плотность газа, Па, S - длина разрядного промежутка, см.

В промежутках с разреженным газом до 2,5 Па выделяют ТЛЕЮЩИЙ разряд. Для его возникновения достаточно малая мощность источника напряжения и большое сопротивление внешней цепи. Основной характеристикой такого разряда является малая плотность тока в канале разряда при большом падении напряжения вблизи катода, что способствует свечению всего газового промежутка. Увеличение светового эффекта возможно при уменьшении внешнего сопротивления, что приводит к росту температуры катода.

При больших плотностях газа (атмосферных и выше) различают коронный, искровой и дуговой разряды.

При небольшой разности потенциалов в резконеоднородном электрическом поле у электрода с малым радиусом кривизны возникает КОРОННЫЙ разряд. Характеристикой его является небольшая величина тока в канале разряда и свечение (ионизация) в области сильного электрического поля разрядного промежутка.

По мере увеличения разности потенциалов возможен переход коронного разряда в ИСКРОВОЙ, с характерным образованием мощного зигзагообразного светящегося канала разряда с высокой температурой и высокой проводимостью. Для поддержания разряда необходим источник большой мощности с малым внешним сопротивлением и относительно высокая проводимость канала разряда.

При источнике напряжения бесконечной мощности по сравнению с мощностью разрядного промежутка искровой разряд переходит в ДУГОВОЙ. Внешнее сопротивление цепи в это время очень мало, а ионизационный процесс (свечение) охватывает не только объем газа разрядного промежутка, но и часть окружающего пространства вокруг промежутка.

Если коронный разряд полностью не нарушает электроизоляционные свойства газового промежутка, то при искровом разряде говорят о начальной стадии разрушения, а при дуговом - о полной стадии разрушения диэлектрических свойств газа и переходе диэлектрика из газового состояния в плазму.

Виды ионизации

Под ионизацией понимают процесс образования в разрядном промежутке положительных или отрицательных ионов при возбуждении нейтральной молекулы свободным электроном, который имеет достаточную энергию для ее возбуждения. В микропроцессах газового разряда возбуждение нейтральной молекулы соответствует отрыву или переходу электрона на удаленные орбиты или обратному переходу на устойчивую орбиту с выделением кванта энергии фотоном. Причем избыток электронов ("прилипание") соответствует появлению отрицательного иона, а дефицит их или отрыв молекулы - образованию положительного иона. В разрядном промежутке будем различать ионизацию в объеме газа и ионизацию на поверхности катода.

Ионизация в объеме газа приводит к образованию положительного иона и свободного электрона, а поверхностная ионизация - к излучению или

эмиссии свободных электронов. Объемная ионизация молекул газа может быть вызвана в результате: соударения свободных электронов с нейтральными молекулами газа или ударной ионизации, когда кинетическая энергия электрона больше или равна энергии ионизации молекулы газа:

$$m v^2 / 2 > W_{и} , \quad (1.1)$$

где m - масса электрона; v - скорость электрона;

фотоионизации в объеме газа, когда энергия электромагнитного излучения фотона равна или больше энергии ионизации молекул газа:

$$h \lambda > W_{и} , \quad (1.2)$$

где h - квантовая постоянная, равная $6,6 \cdot 10^{-34}$ Вт · с; λ - частота излучения, 1/с; в качестве источника излучения фотонов могут быть космические лучи, световые волны в ультрафиолетовой части спектра, а также сами молекулы в канале газового разряда;

термоионизации, когда соударение частиц газа при высокой температуре может привести к возбуждению молекул и по достижении средней кинетической энергии, равной

$$(3/2) k T > W_{и} , \quad (1.3)$$

и при дальнейших столкновениях - к ступенчатой ионизации, где T - температура, К; k - постоянная Больцмана, равная 1,37 Вт/ К.

Эмиссия электронов с поверхности катода приводит к появлению в объеме газа под действием сил электрического поля свободных электронов, а следовательно, и ионизации газового промежутка.

Появление свободного электрона с поверхности катода возможно в процессе:

поверхностной ударной ионизации, когда в электрическом поле в результате бомбардировки поверхности катода положительными ионами образуется свободный электрон;

фотоионизации на поверхности катода под действием космического излучения или световой волны;

термоионизации, когда эмиссия свободных электронов с поверхности катода происходит под действием высокой температуры металла;

автоэлектронной эмиссии, когда в разрядном промежутке у электрода-катода, имеющего радиус кривизны на несколько порядков ниже электрода-анода, напряженность электрического поля достигает 3 - 10 кВ/см и под действием сил электрического поля создаются условия преодоления электронами потенциального барьера и, следовательно, эмиссия электронов в газовый разрядный промежуток.

Рекомбинация

Это процесс обратный процессу ионизации. Возможны явления электронной рекомбинации, когда с положительным ионом взаимодействует электрон и, в результате, появляется нейтральная молекула. Последняя образуется и при взаимодействии положительного иона с отрицательным, когда дефицит электронов на орбите положительного иона заполняется за счет перехода "лишних" электронов у отрицательного иона. В результате рекомбинации выделяется квант энергии в виде фотона, равный ($h \lambda$).

Плазма

Это четвертое агрегатное состояние вещества характерное для промежутков, в которых происходит образование канала разряда при достаточно высокой разности потенциалов на электродах. Особенностью плазмы ионизированного газа в промежутке является ее квазинейтральность, когда наряду с областью пространственного положительного заряда в электрическом поле присутствует область отрицательных зарядов - электроны. Высокая проводимость и температура канала плазмы объясняется соответственно мощным потоком электронов, который удерживается в узком объеме промежутка плотным зарядом положительных ионов. Плазма - это особое состояние вещества, которое, будучи схожим с газом, в то же время обладает и некоторыми

свойствами металла. В магнитогидродинамических (МГД) генераторах получают плазму как низкотемпературную ($10^3 - 10^4$ К), так и высокотемпературную ($10^7 - 10^8$ К).

Коэффициент ударной ионизации

В разрядном промежутке, когда отсутствует электрическое поле, частицы в газе и электроны находятся в хаотическом движении. Под действием радиоактивного излучения веществ земной коры и атмосферы, а также космического излучения постоянно происходит ионизация молекул газа. Средняя величина концентрации ионов у поверхности земли приблизительно сохраняется на 1 см^3 для положительных ионов - 750, а для отрицательных - 650. В нормальных атмосферных условиях даже случайные факторы могут привести к столкновению электронов с нейтральными молекулами (до 10 столкновений в секунду). Согласно кинетической теории газов, электрон пролетает без столкновения путь x с вероятностью $e^{-x/\lambda}$, где λ - средняя длина свободного пробега электрона в разрядном промежутке, а ее обратная величина пропорциональна плотности газа δ :

$$1 / \lambda = A \delta , \quad (1.4)$$

где $1/\lambda$ - среднее число столкновений электрона на единицу длины, $1/\text{см}$; A - коэффициент пропорциональности для различных газов лежит в пределах $(2 - 11) 10^3$.

Если в электрическом поле промежутка напряженностью E электрон может пробежать путь $x_{и}$ до столкновения с молекулой, то $x_{и} = U_{и} / E$, что соответствует пути вероятного акта ионизации при столкновении.

Следовательно, если среднее число столкновений на пути в 1 см умножить на вероятность ионизации при столкновении, то получим число ионизации молекул на единицу длины разрядного промежутка, которое называется коэффициентом ударной ионизации:

$$\alpha = (1/\lambda) \exp (- x_{и} / \lambda) = A \delta \exp (- A \delta U_{и} / E). \quad (1.5)$$

В зависимости (1.5) при постоянной температуре и равномерном электрическом поле наблюдается зависимость

$$x / \delta = F (E / \delta) . \quad (1.6)$$

При нормальных атмосферных условиях ($\delta = 1$) минимальная напряженность равна 23 кВ/см. С ростом E растет коэффициент α .

1.2. Механизм пробоя в малом искровом промежутке

Переход лавинной формы разряда в стримерную в воздушном разрядном промежутке с равномерным электрическим полем условие самостоятельности разряда есть условие возникновения плазменного канала искрового разряда. Процесс развития канала разряда для разряженных газов отличается от такового для газов с давлением, близким к атмосферному.

Для разряженных газов характерен многолавиный характер развития канала разряда, причем с возникновением начальной лавины воссоздаются в промежутке свободные, участвующие в образовании последующих лавин. Последние приводят к образованию еще свободных электронов и таким образом к росту числа ионизаций (по экспоненциальному закону) до заполнения промежутка зарядом из положительных ионов и отрицательных электронов от предыдущих лавин.

Канал разряда достигает плазменного состояния с характерной высокой проводимостью. При этом основную роль в первичных процессах, т.е. в образовании свободных электронов, играет фотоионизация на поверхности катода. Следовательно, на развитие разряда в промежутке с разряженным газом значительное влияние оказывает материал катода.

При атмосферных давлениях 1013 Па, а также несколько выше ($\delta S > 1$) механизм развития разряда носит самостоятельный характер в стримерной форме (рис. 1.1). Электрическое поле разрядного промежутка резко увеличи-

вается в сторону головки первичной лавины, что приводит к появлению фотонов и интенсивной фотоионизации в объеме газа в районе головки лавины. Начинается самостоятельный разряд с образования вторичных лавин, которые ориентируются к головке первичной лавины или в область высокой напряженности. Вторичные электроны втягиваются в первичную лавину, перераспределяют напряженность электрического поля в сторону катода и создают с положительными ионами первичной лавины канал проводящей плазмы, импульсивно внедряемый в глубь промежутка – это есть стример.

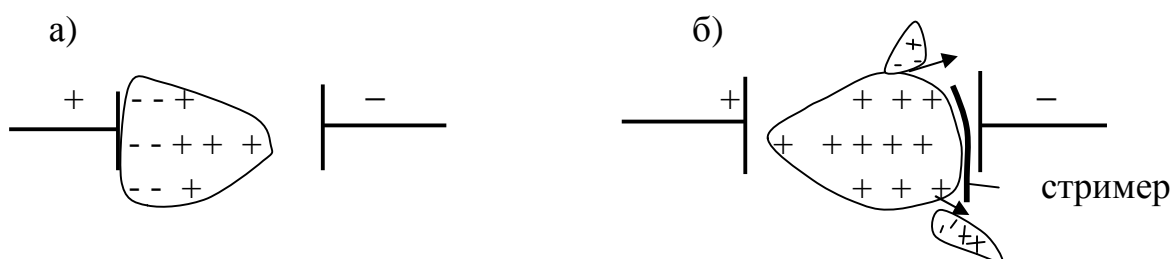


Рис. 1.1. Механизм образования стримера в малом разрядном промежутке:
а) - процесс ионизации; б) - образование первичной лавины и интенсивная фотоионизация в объеме газа

Дальнейшее повышение напряженности в канале разряда приводит к возникновению вторичных лавин по причине фотоионизации в объеме газа и быстрому прорастанию плазменного канала. Растущий канал разряда получил название стримера. По завершению перекрытия промежутка между электродами стример переходит в искровую стадию разряда. Время развития стримера порядка 10^{-8} с, а причиной его образования является фотоионизация в объеме газа. Таким образом, в малых промежутках и в плотных газах разряд протекает в однолавиной форме, переходящей в стримерную.

Коэффициент вторичной ионизации

Лавинный процесс в разрядном промежутке начинается с образования или появления в нем хотя бы одного свободного электрона, который в результате взаимодействия с нейтральной молекулой образует ион и вторичный свободный электрон. Процесс нарастает по экспоненциальному закону:

$$N = \exp(\alpha S). \quad (1.7)$$

Если процесс воссоздания свободных электронов непрерывно растет и не прекращается, то разряд называется НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНЫМ, а электрическое поле является внешним источником зарядов.

Начальный свободный электрон может быть образован за счет ионизационных процессов в самой лавине, например, фотоионизации или термоионизации в объеме газа, тогда разряд называется САМОСТОЯТЕЛЬНЫМ.

Оценим условие самостоятельности разряда в равномерном поле. Если в лавине происходит возбуждение молекул с выделением фотонов, то последние могут вызвать ионизацию в объеме газа или на катоде. Такой процесс оценивается числом вторичных электронов отнесенных к одному акту ионизации - это коэффициент вторичной ионизации - γ . В лавине может происходить $(e^{\alpha S} - 1)$ ионизаций (число ионов), в которых участвует $\gamma \cdot (e^{\alpha S} - 1)$ - вторичные свободные электроны. В этом случае, когда в результате внутренних процессов в лавине воссоздается хотя бы один вторичный электрон, возбуждающий молекулу с актом ионизации, разряд в промежутке поддерживается самостоятельно, даже в отсутствие внешнего ионизатора. Следовательно, условием самостоятельности разряда в промежутке будет неравенство

$$\gamma(e^{\alpha S} - 1) \geq 1. \quad (1.8)$$

Начало вторичных процессов в промежутке определится выражением

$$\alpha S = \ln(1 + (1/\gamma)). \quad (1.9)$$

Для воздуха значение $\alpha S = 24,5$ позволяет рассчитать ту критическую напряженность $E = 35$ кВ/мм, которую необходимо приложить при нормальных атмосферных условиях к разрядному промежутку, чтобы разряд носил самостоятельный характер или свободный электрон образовался при вторичных процессах.

Разряднонапряжений промежутке равномерным электрическим полем Закон Пашена

В промежутке с равномерным электрическим полем условия самостоятельности разряда являются условием пробоя промежутка и образования плазменного канала между двумя электродами. Связь между напряжением и напряженностью выражается зависимостью $E = U_p / S$, а условие самостоятельности разряда в воздухе остается постоянным и подчиняется с достаточной степенью точности, если каждый свободный электрон осуществляет ионизации в промежутке, согласно следующему равенству:

$$\alpha S = \ln(1 + 1/\gamma) = A \delta \exp(-A \delta U_n / U_p / S)$$

откуда $U_p = A U_n (\delta S) / \ln(A S / \ln(1 + 1/\gamma) + \ln(\delta S))$, где, очевидно, $U_p = f(\delta S)$ при постоянных остальных величинах.

Зависимость $U_p = f(\delta S)$ может быть представлена на рис.1.2, где принято расстояние между электродами $S = 1$ см. Самостоятельность разряда возникает при значении $\alpha_{кр} = 20 / S$. В то же время в воздухе $\alpha_{кр}$ на пути в 1 см равно числу столкновений свободного электрона, умноженному на вероятность ионизации при этих столкновениях.

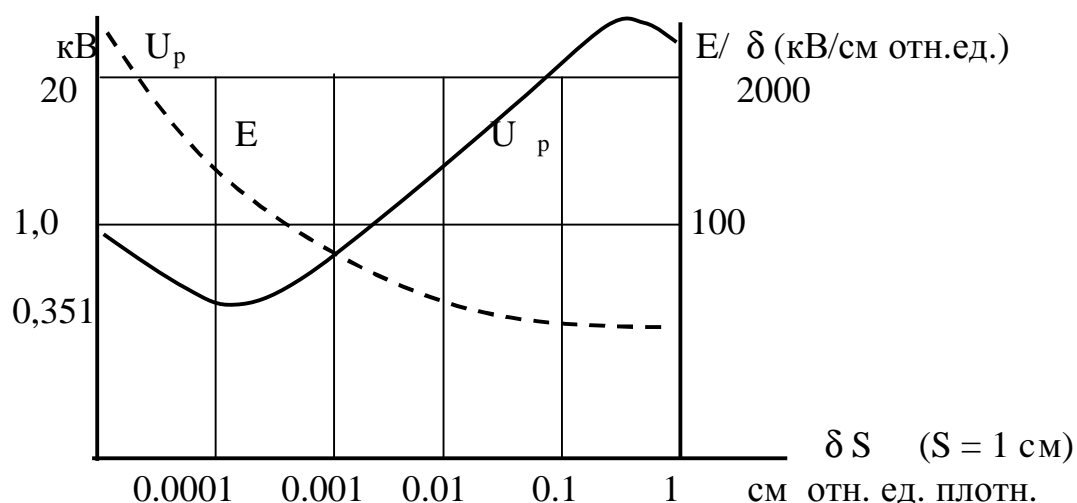


Рис. 1.2. Зависимость разрядного напряжения и напряженности от плотности воздуха при длине промежутка S

Из рисунка 1.2. видно, что с увеличением относительно U_{pmin} величина U_p растет. Это вызвано снижением вероятности ионизации при столкновении, а рост U_p при снижении δ против U_{pmin} вызвано преобладанием эффекта сни-

жения числа столкновений. В том и в другом случаях снижается коэффициент ударной ионизации и для образования канала разряда необходимо увеличивать разность потенциалов между электродами.

Увеличение U_p изоляции при снижении и увеличении плотности газа δ используется в промышленности, например, в кабелях и конденсаторах - сжатый газ, а в вакуумных выключателях и электроннолучевых трубках - разряженный газ.

Математическая зависимость (1.5) экспериментально установлена Пашеном и трактуется как закон: в равномерном электрическом поле при неизменной температуре и постоянстве материала катода разрядное напряжение является функцией произведения плотности газа (или давления) на расстояние между электродами. По закону Пашена U_p остается постоянной в разрядном промежутке, если плотность газа увеличить, а расстояние между электродами уменьшить в n раз.

Весьма затруднителен в определении коэффициент γ , величина которого зависит от давления, температуры, напряженности поля и при низких давлениях даже от материала катода. γ определяют экспериментально и, например, для воздуха он равен 0,02-0,025.

1.3 . Корона и ее характеристики

Лавинная корона

Самостоятельный разряд в лавинном электрическом поле, охватывающий область сильного электрического поля (область электрода с малым радиусом кривизны) носит вид разряда - корона. Различают устойчивое развитие короны, когда это явление возникает в резко неоднородном поле. Здесь появлению короны способствует начальное напряжение короны. Коронный разряд неустойчив и носит статистический характер, когда он возникает в слабо неравномерном электрическом поле. Здесь очень высок разброс про-

бивных напряжений, причем начальное и пробивное напряжение короны могут совпадать. При однородном поле ионизация распространяется вдоль по силовым линиям электрического поля между электродами, поэтому коронный разряд принципиально возникнуть не может и его начальное напряжение в квазиоднородном поле равно пробивному.

Коронное явление у отрицательного стержня может носить лавинный характер и развиваться вглубь промежутка. Тогда электроны выносятся силами электрического поля из области ионизации и захватываются нейтральными молекулами, образуя отрицательные ионы.

Таким образом, вблизи катода существует облако положительных ионов, поддерживающих высокую напряженность на кончике отрицательного стержня, а за областью сильного электрического поля рассеян заряд отрицательных ионов. Лавинная корона отрицательной полярности развивается в виде четко выраженных импульсов Ригеля высокой частоты. У стержня положительной полярности из-за экранирующего действия объемного положительного заряда лавинная корона наблюдается перед пробоем промежутка.

Стримерная корона

Повторные лавины (первичный процесс) в коронном разряде приводят к увеличению концентрации положительных ионов в области электрода стержня. Поэтому первичная лавина (объемный заряд положительных ионов, который покинули электроны) имеет явно выраженную головку с высокой напряженностью, которая способна испускать фотоны в окружающее пространство. Последние создают фотоионизацию в объеме газового промежутка, которая становится причиной образования новых лавин (вторичный процесс) и в дальнейшем самостоятельного разряда в виде стримера в разрядном промежутке. Если этот процесс протекает при небольшой разности потенциалов, то стример развивается и затухает, т.е. у электрода с малым радиусом кривизны возникает стримерная корона. Развитию катодного стриме-

ра вглубь промежутка будет препятствовать отрицательный объемный заряд. Положительная и отрицательная стримерная корона существует до тех пор, пока в ней поддерживается поток электронов, т.е. ток, но после своего развития обязательно затухнуть.

Особенности коронного разряда при постоянном и переменном напряжениях

На проводах ЛЭП переменного тока, особенно СВЧ, корона при рабочем напряжении ведет к потерям энергии и длительным радиопомехам, поэтому ее влияние должно быть ограничено. В то же время при развитии перенапряжения она снижает амплитуду импульсного перенапряжения. На линии коронный разряд ионизирует и в виде чехла симметрично охватывает провод, увеличивая его электродинамическую емкость C_d . Корона на проводе имеет непрерывно развивающиеся и затухающие стримеры, которые вызывают импульсы тока. Последние генерируют высокочастотные колебания (1-100 МГц), которые распространяются вдоль проводов, тросов и опор и излучаются в окружающее пространство. Коронирующая линия создает помехи для радиоприема, телевидения и высокочастотных каналов связи.

При постоянном напряжении характер короны на проводах будет стационарным. При положительном проводе процесс ионизации приводит к интенсивному перемещению электронов к проводу-аноду, а положительных ионов - к проводу-катоду. При отрицательном проводе электроны выносятся из области ионизации, захватываются нейтральными молекулами и образуют отрицательные ионы, которые под действием сил электрического поля смещаются к проводу-аноду, а остающиеся положительные ионы дрейфуют к проводу-катоду. В связи с этим регистрируется поток ионов между электродами, обуславливающий постоянный коронный ток конвекции и I_k . Возникающий вблизи провода объемный заряд одноименной с проводом полярности снижает напряженность поля у провода и тем самым повышает начальное напряжение короны. Корона линии постоянного тока с расположением про-

вода на опорах одной полярности называется униполярной короной, а корона в системе ЛЭП с расположением проводов на опорах разной полярности - биполярной. Коронные потери на биполярной линии с напряжением $2U_n$ выше, чем суммарные потери двух униполярных линий с напряжением U_n . Методика расчета потерь на корону при постоянном напряжении предложена НИИПТ Н.В. Егоровой и Н.Н. Тиходеевым. Потери выражаются в обобщенных координатах - $P, U/U_{нк}$, где U - напряжение полюса; $U_{нк}$ - начальное напряжение короны. Такой расчет параметра провода ЛЭП ведет к увеличению потерь на корону P_k . КПД ЛЭП $\eta = 0,95$ складывается из потерь на нагрев $I^2 R$ и потерь на корону P_k . Потери на корону определяются как $P_k = 2,5 \cdot 10^4 \cdot 4 U_{\phi}^2 (U_{\phi}/U_k)^5$, кВт/км, где для ЛЭП 35 кВ и выше $U_{\phi} / U_k = 0,95-0,96$, а для ЛЭП 220-750 кВ оно лежит в пределах 0,5-1,0.

Чем выше номинальное напряжение ЛЭП, тем больше потери на корону, однако, относительная величина их не зависит от номинального напряжения ЛЭП: P_k/P_n , где $P_n = U_{\phi}^2 / z$, а U_k оказывается в зависимости от D_3 провода или $S = \pi r_3^2$. Для определения среднегодовых потерь энергии на корону сначала находят рабочую емкость C_i всех фаз линии, а также радиус расщепления и эквивалентный радиус r_p и r_3). Затем определяют потери на корону на 1 км линии за 1 год при $h_{хп}$ - хорошей погоде; h_t - тумане; h_d - дожде; h_i - инее, гололеде, изморози; $h_{сн}$ - сухом снеге (интенсивность дождя и мокрого снега $I_g = H_g / h_g$, сухого снега - $I_{сн} = H_{сн} / h_{сн}$). Затем для каждой фазы и вида погоды определяют критические напряжения:

$$U_{ki} = (2 \pi \epsilon \epsilon_0 n r E_k) / k_y C_i, \quad (1.11)$$

где $k_y = E_{max} / E_{cp}$; n - число проводов в фазе.

Затем находят эквивалентную емкость объемного заряда короны, Ф/км:

$$C_3 = (2 \pi \epsilon \epsilon_0) \ln(r_p^2 + 2,5 k_2 C U_k / \delta \epsilon \epsilon_0 \omega) / r_3, \quad (1.12)$$

где k_2 - подвижность ионов (1100 см /кВ с - туман, дождь, снег; 2200 см /кВ с - хорошая погода, иней, гололед, изморозь); C - рабочая емкость фазы.

Средняя мощность потерь выделяется для каждого вида погоды:

$$P_i = 350 \omega (c^2 / (C_3 - C)) (U_k^2 f(U_\phi / U_k)). \quad (1.13)$$

Средняя мощность потерь на корону за год отыскивается как

$$P_{cp} = \Sigma P_i / 8760. \quad (1.14)$$

Среднегодовые потери на корону рассчитывают на одну цепь биполярной ЛЭП или на одну цепь униполярной. Исследования, выполненные в нашей стране и за рубежом показывают, что помехи генерируются в основном положительным полюсом ВЛ. В дождь радиопомехи от ВЛ постоянного напряжения снижаются, в то время как на ЛЭП переменного тока они возрастают. На биполярной ВЛ при ветре возрастают интенсивная рекомбинация заряженных частиц и потери. На униполярных линиях потери от ветра не обнаружено.

Потери электроэнергии на корону при переменном напряжении

Критическое значение напряженности коронного разряда:

$$E = 23,3 m \delta (1 + 0,62 / (r^{0,32} \delta^{0,3})), \text{ кВ/см} \quad (1.15)$$

где m - коэффициент гладкости провода при хорошей погоде - 0,85; при тумане - 0,7; при инее, гололеде, изморози - 0,6; при дожде и снеге зависит от интенсивности осадков - 0,57-0,73; $\delta = (p T_0) / (p_0 T)$; r_3 - эффективный радиус провода.

Для витых проводов ЛЭП, где D проволоки 1 мм, коэффициент заполнения алюминия к стали 0,65-0,7, т.е. на 30-35 % провод заполнен сталью. Витой провод в отличие от цилиндрической чистой поверхности увеличивает напряженность на 30 – 40 %. Повышение напряженности местной короны учитывается коэффициентом шероховатости m . $E = m E_{\text{глад}}$, где $m = 0,85-0,87$, если используются жесткие шины (алюминиевые полые провода, трубы, коробки), то $m = 0,95$. В реальных условиях повышается напряженность вокруг провода за счет повреждения провода (заусениц) и естественных осадков (роса, туман, снег).

Параметры коронирующей линии определяются:

активной проводимостью, которая рассчитывается по формуле

$$Q = 1 \cdot 10^3 (f / 50)^{0.62} (1 - \exp(-3,05 (U_{\max} - U) / U)), 1/\text{МОм м}, \quad (1.16)$$

где U_{\max} - максимальная амплитуда перенапряжения;

и емкостью линии:

$$C = 2,4 (50 / f)^{0.42} ((U_{\max} / U_{\text{нк}}) - 1), \text{ пФ/м}. \quad (1.17)$$

Влияние короны на амплитуду перенапряжений

Коммутационные перенапряжения - это превышение рабочего напряжения, обусловленное переходными процессами от коммутаций на высоковольтных аппаратах и коротких замыканий, которые создают интенсивную внешнюю корону (по всей длине токоведущего участка). Таким образом, вокруг провода образуется область положительного заряда. При этом к рабочей емкости провода при U_n добавляется емкость от дополнительного заряда при ионизации вокруг него. В результате общая емкость проводам растет. С появлением дополнительной емкости (названа она электродинамической C_d) изменяется схема замещения, отмечаются дополнительные активные потери. Увеличение общей емкости провода и, самое главное, наличие C_d , уменьшает крутизну, демпфирует амплитуду перенапряжения и, тем самым, снижает его кратность. На ЛЭП сверхвысокого напряжения (СВН) развивается импульсная корона при внешних (которые выше рабочих на проводе ЛЭП при прямых или индуктированных ударах молнии в провод). Процесс импульсной, его время соизмеримо со временем развития стримера. В 70 % случаев импульсная корона развивается из отрицательного провода со скоростью перемещения электронов - 10^6 см/с. Отрицательный чехол имеет вольткулоновую характеристику (ВКХ), которая может быть выражена зависимостью:

$$q = C_o U (1 + B U), \quad (1.18)$$

где $B = f(r_o)$ - коэффициент, зависящий от радиуса провода; C_o - геометрическая емкость провода.

С увеличением r уменьшается величина q - полного заряда, т.е. увеличивается емкость линии.

Для ВЛ увеличение C_d приводит к уменьшению скорости распределения волны:

$$\vartheta = 1/\sqrt{L C_d} = c, \quad (1.19)$$

где C_d - электродинамическая емкость; c - скорость света.

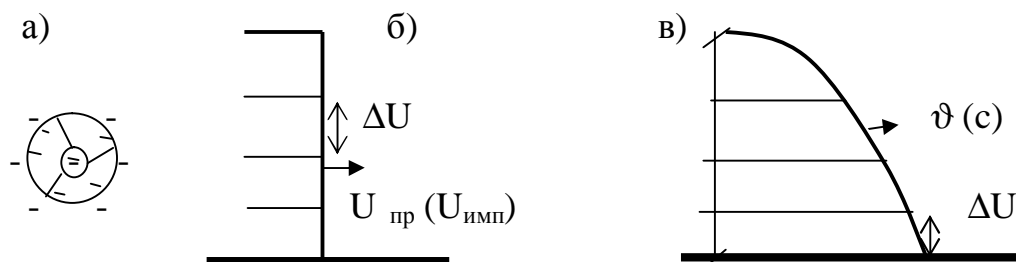


Рис. 1.3. Фактор влияния коронного разряда на проводе

- а) – развитие коронного чехла на проводе; б) – электромагнитная волна перенапряжения на проводе ЛЭП; в) – та же волна при развитии импульсной короны на проводе

На рис. 1.3 б показан пологий фронт волны перенапряжения до 5-10 мкс за несколько десятков километров до подстанции, где снижается и амплитуда волны.

1.4. Особенности разряда в малых промежутках

Разряд в малом промежутке резко неравномерным электрическим полем

В неоднородном поле происходит начальная ионизация с образованием объемного заряда в области сильного электрического поля. Этот объемный заряд положительных ионов оказывает существенное влияние на развитие канала разряда в дальнейшем. В малом промежутке различают коронный и искровой разряды. Рассматривают промежуток стержень - плоскость, промежуток с резко неравномерным полем, в двух случаях: при положительной и отрицательной полярности на стержне. Эти два случая хорошо анализировать при воздействии постоянного напряжения. Воздействие переменного напря-

жения, когда частота 50 Гц меняет полярность на электродах в течение 10^{-2} с, можно считать как воздействие постоянного напряжения, так как время развития стримера (самостоятельный разряд, искровой) во много раз быстрее (10^{-8} с), чем смена полярности на электродах. В промежутке с положительным стержнем и отрицательной плоскостью (рис. 1.4) увеличение разности потенциалов приводит к процессу ионизации в области сильного электрического поля с образованием облака положительных ионов. Такого знака заряды вблизи стержня образуются из-за появления в этой области свободных электронов с большой энергией, если начальные свободные электроны появились в промежутке с поверхности катода при бомбардировке тяжелыми положительными ионами в электрическом поле большой поверхности отрицательной плоскости (катода). В области большой напряженности электрического поля интенсивная ударная ионизация образует облако положительных зарядов с достаточно (во много раз) большим радиусом кривизны, чем поверхность стержня. Поэтому вблизи стержня напряженность поля уменьшается и, следовательно, начальное напряжение (скорость потенциалов между электродами) короны должно увеличиться. Увеличение объемного заряда положительных ионов вблизи положительного стержня может привести в дальнейшем (по мере увеличения разности потенциалов) к отсутствию видимой короны на электроде с малым радиусом кривизны. Вдали от стержня наоборот, напряженность электрического поля возрастает и возможен всплеск ее (точка а), что способствует началу фотоионизации в объеме промежутка с дальнейшим образованием стримера – анода (самостоятельного разряда).

Таким образом, с образованием стримера не требуется увеличение разности потенциалов, чтобы образовался канал разряда. Разряд самостоятельно развивается в стримерной форме и достигает противоположного электрода (положительная плоскость), перерастая в плотный заряд положительных ионов при мощном потоке электронов в виде лавин, уходящих на анод (положительный стержень).

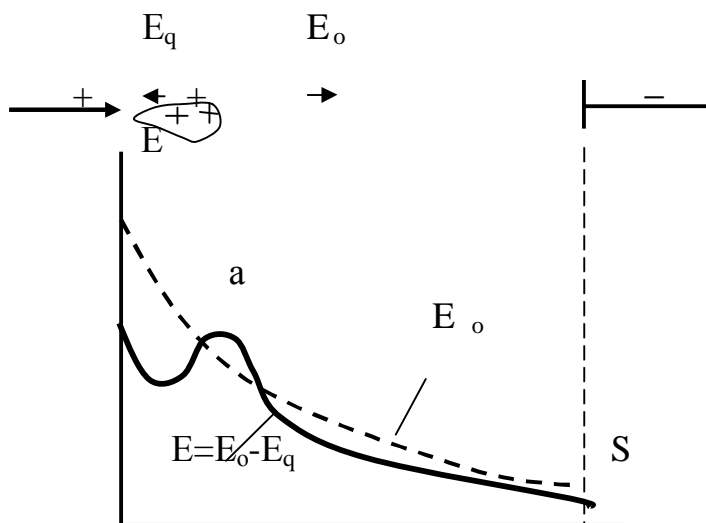


Рис .1.4. Распределение напряженности электрического поля в промежутке положительный стержень - отрицательная плоскость

Таким образом, с образованием стримера не требуется увеличение разности потенциалов, чтобы образовался канал разряда. Разряд самостоятельно развивается в стримерной форме и достигает противоположного электрода (положительная плоскость), перерастая в плотный заряд положительных ионов при мощном потоке электронов в виде лавин, уходящих на анод (положительный стержень). Это плазменное состояние вещества в разрядном промежутке в узком объеме называют искровым разрядом. При отрицательной полярности стержня (рис. 1.5) процесс усложняется, отмечается образование видимой короны на стержне при малой разности потенциалов между стержнем и плоскостью и к формированию катодного стримера при очень большой разнице потенциалов. Небольшая разность потенциалов создает высокую напряженность на кончике стержня и, из-за автоэлектронной эмиссии с катода, начальные свободные электроны. Часть их, попадая в область сильного электрического поля с энергией, близкой к энергии ионизации, получает дополнительную энергию и ионизирует нейтральные молекулы с образованием положительных ионов и дополнительных свободных электронов. Другая часть свободных электронов выносятся силами электрического поля за пределы высокой напряженности и захватывается молекулами кислорода с образованием отрицательных ионов.

Процесс ионизации в области сильного электрического поля приводит к тому, что напряженность на кончике стержня возрастает ($E = E_0 + E_q$) и видимая корона возникает уже при малой разности потенциалов, а развитие стримера в промежутке затруднено по двум причинам: первая – это в области между двумя объемными зарядами происходит процесс рекомбинации и вторая - перемещение стримера от катода оказывается против сил основного электрического поля E_0 (ему как бы приходится пятиться).

Следовательно, для преодоления таких факторов в разрядном промежутке требуется очень большая разность потенциалов и, только увеличивая ее на электродах, добиваются образования искрового канала в таком промежутке с отрицательным стержнем.

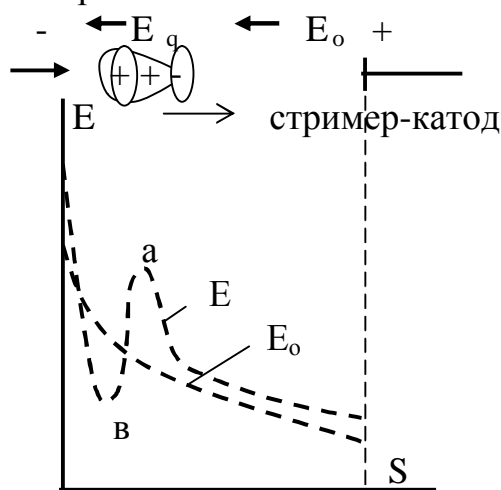


Рис.1.5. Распределение напряженности электрического поля в промежутке с отрицательным стержнем и положительной плоскостью

Барьерный эффект в малом разрядном промежутке

Барьером служит тонкий слой диэлектрика внутри разрядного промежутка между двумя электродами. Он резко увеличивает величину разрядного напряжения между электродами, не изменяя размер промежутка. Чтобы оптимально расположить барьер в промежутке, рассмотрим три его положения. (рис. 1.6.)

1). Барьер в непосредственной близости от стержня, касается его.

Влияние его в этом случае на увеличение разрядного напряжения не оказывается. При положительном и отрицательном стержне в зоне сильного электрического поля (кончик стержня) образуются положительные ионы. Эти ионы создают очень небольшой объемный заряд, который не изменяет напряженность электрического поля промежутка за барьером и величина разности потенциалов определяется промежутком стержень - плоскость. Тем более, что электроны, как очень подвижные частицы, свободно проходят через барьер, а тяжелые положительные или отрицательные ионы, хотя и задерживаются барьером и осаждаются на нем, заряжают незначительную часть поверхности барьера, не искажая картины электрического поля оставшегося промежутка.

2). Барьер в области высокой напряженности эффективно положение

В этом положении он заряжен тем же знаком, что и стержень. Если стержень положительный, то в области сильного поля создается процесс ионизации с образованием мощного объемного заряда положительных ионов, которые и оседают на барьере; если стержень отрицательный, то в основной области сильного электрического поля происходит процесс ионизации в сто-

рону захвата нейтральными молекулами электронов, теряющих свою скорость после эмиссии с поверхности катода. Следовательно, барьер, задерживая отрицательные ионы, заряжается этим же знаком. Заряженный барьер становится электродом плоскости и определяет пробивную способность промежутка, т.е. выравнивает (снижает напряженность) электрическое поле у стержня, теперь пробой начинается с промежутка барьер - плоскость. Для промежутка с однородным полем (барьер - плоскость) требуется большая разность потенциалов.

3). Барьер вблизи плоскости (рис 1.6.) слабого электрического поля

Область ионизации здесь очень слабая, хотя идет в сторону образования ионов того же знака, который в это время на плоскости. При отрицательной плоскости свободные электроны, покидая поверхность катода, попадают в слабое электрическое поле и с большой вероятностью захватываются нейтральными молекулами, образуя слабый отрицательный заряд в области катода. Следовательно, барьер, находясь в области слабого поля, заряжается отрицательным знаком, сокращает разрядный промежуток как электрод и значительно уменьшает разрядное напряжение промежутка, так как увеличится напряженность в промежутке стержень - барьер.

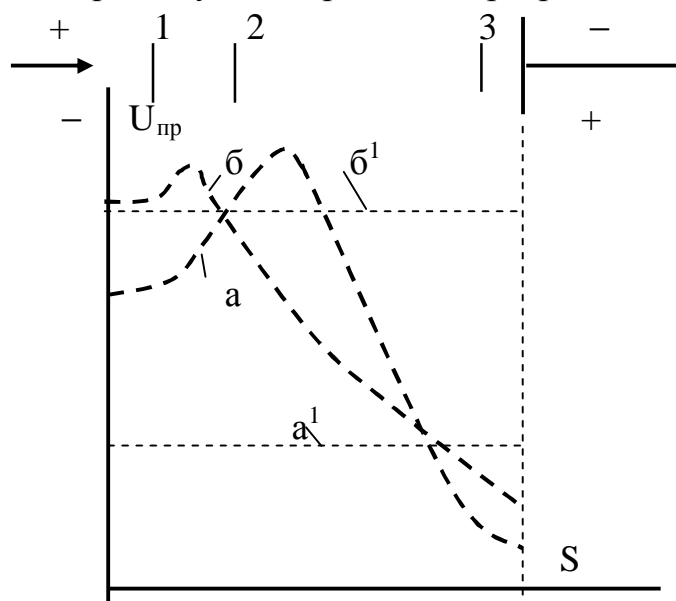


Рис. 1.6. Распределение разрядного напряжения в промежутке стержень - плоскость с барьером при разной полярности на стержне:
 а - при положительном стержне; б - при отрицательном;
 а', б' - разрядные напряжения промежутка без барьера соответственно при положительном и отрицательном стержне

1.5. Механизм развития разряда в длинных воздушных промежутках

Лидерная стадия разряда

В воздушных промежутках длиной от 1 м и более десятков метров разряд приобретает новую форму. Проводимость стримеров уже недостаточна для создания хорошо проводящего канала между электродами и по следу одного из стримеров возникает разряд в новой лидерной стадии. Так как разрядные напряжения промежутков меньше при положительной полярности электрода, с которого начинается ионизационный процесс, то основное внимание уделяется изучению положительного лидера. Процесс начинается с образования мощного коронного чехла у электрода с малым радиусом кривизны. Затем в области короны растет проводимость, обусловленная вторичными процессами (фотоионизация в объеме газа), и образуется канал стримера. Электроны из канала стримера интенсивно перемещаются к аноду. Из-за небольшой общей напряженности разрядного промежутка и малой проводимости канал стримера не внедряется вглубь промежутка, а способствует росту концентрации зарядов и температуры. В области канала стримера повышается напряженность и в дальнейшем интенсивная термоионизация в области объема промежутка способствует увеличению плотности заряженных частиц (положительных ионов), проводимости и тока. В результате канал стримера переходит в состояние хорошо проводящей плазмы - лидера. Концентрация зарядов в лидерном канале достигает 10^{18} ион/см³, ток - сотен ампер, состояние вещества в канале - плазма. Когда лидер достигает конца стримера, наступает пауза. В это время он уподоблен металлическому стержню, выходящему из электрода. Высокая напряженность на конце лидера приведет к образованию коронного чехла, затем стримера и в дальнейшем к новому лидеру и т.д. Такой механизм развития разряда позволяет перекрывать большие расстояния при относительно средней напряженности электрического поля $E_p \approx 1-2$ кВ/см. Это свойство лидерного канала создает трудности при выборе уровня изоляции в ИК промежутка ЛЭП СВН.

В случае образования отрицательного лидера поток электронов направлен от электрода стержень - катод. Канал лидера прорастает от катода, где в области катода падение напряжения поддерживает ударную ионизацию в объеме промежутка и возникающие свободные электроны поступают в канал лидера. Тормозящее действие создается объемным отрицательным зарядом, выносимым лидером в не ионизационную зону. Продвижение отрицательного лидера затрудняется и требуется более высокое напряжение для полного пробоя промежутка.

Главный разряд в длинном промежутке

В момент, когда лидер достигает противоположного электрода, унифицируется новая стадия разряда - главный разряд. Процесс главного разряда начинается с разрядной волны, которая в природе носит название грома. Это явление связано с мощным стеканием заряженных частиц (положительных ионов) с канала лидера, достигающего электрода - земля, потенциал лидера в

этом месте мгновенно достигает нуля, а ток в этот момент $i = q \vartheta$, т.е. оценивается плотностью заряда q (к/м) и скоростью его стекания - ϑ (м/с).

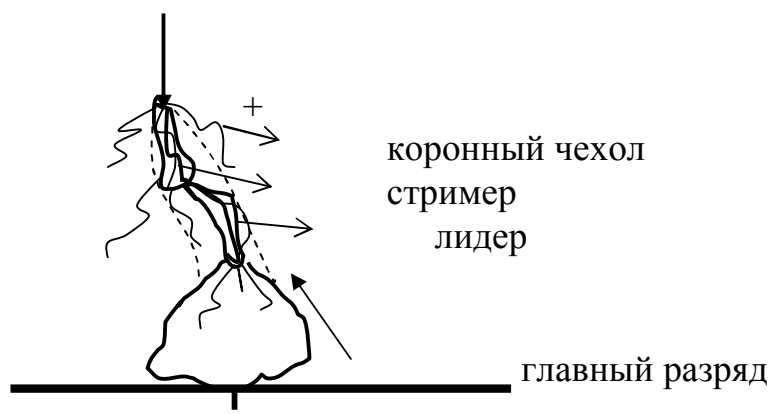


Рис.1.7. Схема перехода лидера в главный разряд

В дальнейшем канал главного разряда продвигается к первому электроду из-за увеличения плотности заряда в канале и скорости перемещения электронов. Заряженные частицы поставляются в канал главного разряда от коронного явления при формировании лидера.

Искра в длинном промежутке

Когда главный разряд достигнет противоположного электрода (первого стержня), процесс переходит в новую стадию, характеризующуюся коротким замыканием электродов через плазменный канал высокой проводимости и температуры - это стадия искры. В электрических сетях высокого напряжения искровой разряд возможен при импульсах коммутационного или атмосферного перенапряжения, характерным для него является пробой изоляционного промежутка длиной от 1 м до десятков метров. Особенностью искры оказывается вольт-амперная характеристика ($E = f(I)$) и удельное активное сопротивление ($R = E / I$). Вместе с образованием канала искры связывают ударную акустическую волну от начальной стадии главного разряда, на слух это воспринимается как треск. Удар молнии приводит к расщеплению опор на ЛЭП, деревьях, высоких бетонных сооружениях.

Существенное значение имеет переход импульсной искры в дуговой разряд, поддерживаемый, например, рабочим напряжением сети. Этот переход определяется энергетическим соотношением в искровом канале, он носит вероятностный характер, определяемый случайностью момента импульсного разряда относительно фазы переменного напряжения и статистическим характером всех процессов искрового разряда. Открытое И.В. Курчатовым явление "пинч-эффект" в канале искры с параметрами по току порядка 10^6 А и сильно разряженным газом, а также характерным сжатием канала искры под действием собственного магнитного поля, где температура канала достигает десятков миллионов градусов по Цельсию, что позволило разработать МГД генераторы ТОКОМАГ-5 и -10, где поддерживается устойчиво высокотемпературная плазма в течение нескольких секунд.

Дуга в длинных промежутках

Это явление ионизационного состояния диэлектрического пространства между электродами при бесконечной мощности источника напряжения в сравнении с мощностью разрядного промежутка. Почти всю длину дуги занимает плазменный столб, в котором плотность зарядов достигает 10^{18} ион/см³. Электрическое поле в столбе дуги E сообщает энергию электронам и ионам, причем в основном воспринимают ее электроны из-за большой подвижности. При столкновениях электроны отдают энергию молекулам, увеличивая их кинетическую энергию, это ведет к увеличению температуры газа. При высоких давлениях (атмосферное) температура лежит в пределах 4000 - 1500 К, это обеспечивает интенсивную термоионизацию в объеме газа. В дальнейшем свободные электроны поступают в дуговой столб за счет термоэлектронной эмиссии от катода, разогретого дугой. Интенсивность свободных электронов с катода зависит от падения напряжения у катода, величина которого составляет всего несколько десятков вольт. Если это напряжение очень мало в сравнении с падением напряжения в плазменном столбе, дугу называют линейной. Энергия в основном выделяется в плазменном столбе, поэтому характеристики длинной дуги и ее устойчивость полностью зависят от процессов в столбе дуги. В установках высокого напряжения дуги в воздухе практически всегда являются длинными. Вольт-амперная характеристика дуги нелинейная, вследствие тепловой инерции дугового столба (рис.1.8).

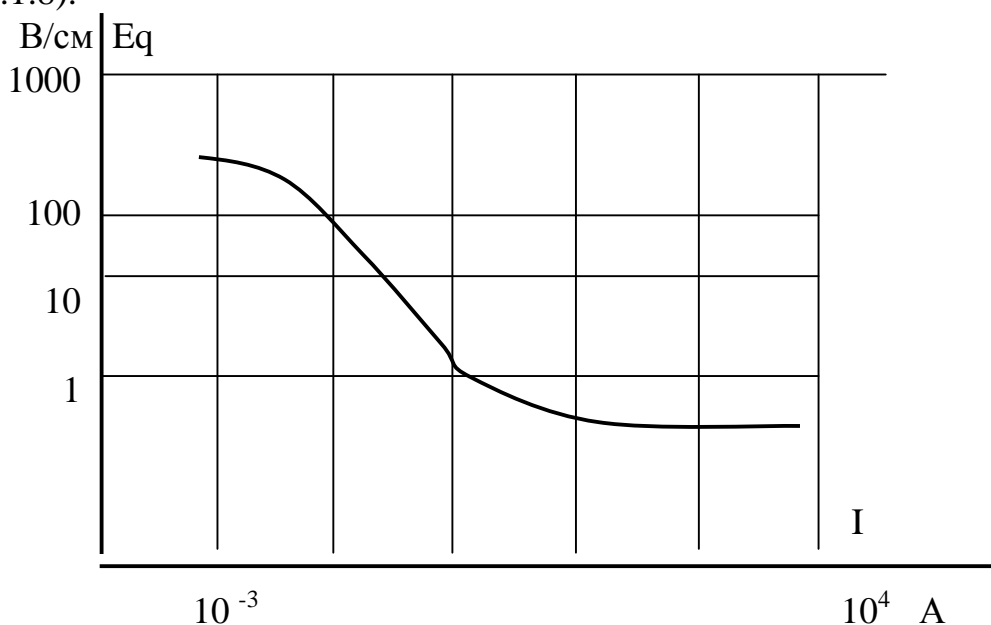


Рис. 1.8. Вольт-амперная характеристика открытой дуги в воздухе (по А.Е. Майкопару)

1.6. Разряд в газе вдоль поверхности твердого диэлектрика

Разряд по сухой поверхности твердого диэлектрика

Разность потенциалов, при которой произойдет пробой между двумя электродами на сухой поверхности твердого диэлектрика (изолятора), называется сухоразрядным напряжением.

Во всех изоляционных конструкциях разряд по поверхности можно различать: в резконеоднородном, в слабо неоднородном и однородном электрических полях.

Механизм развития канала стримера обнаруживается в слое газа, прилегающего к поверхности твердого диэлектрика, поэтому спектрографические данные свидетельствуют об отсутствии лавины диэлектрика. В канал стримера вливаются вторичные лавины, образованные вследствие фотоионизации молекул газа, и развивают их в глубь промежутка. Температура в канале стримера - до 2200 К, а в длинных промежутках при лидерной форме образования канала до 6500 К. При развитии канала стримера поверхность диэлектрика оказывается заряженной. Объемный заряд оседает на поверхности и в зависимости от ее состояния (шероховатости, запыленности и увлажнения), искажает поле разрядного промежутка. Если канал разряда стримера затухает после своего развития, то он называется скользящим или коронным. При переменном напряжении и резко неоднородном электрическом поле в каждый полупериод на поверхности диэлектрика у электрода с малым радиусом кривизны возникают явно выраженные каналы скользящего разряда.

Возможная величина напряжения перекрытия по Теплеру

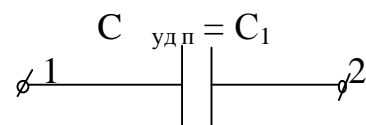
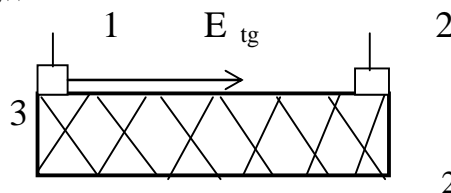
$$U_p = K \sqrt[5]{L_{cp} / C_{удп}^2 (1/\sqrt[20]{dU/dt})}, \quad (1.20.)$$

где $C_{удп} = \epsilon \cdot 10^{-12} / (4 \pi 0,9 d)$, Ф/см² - удельная единичная поверхностная емкость; L_{cp} - расстояние между электродами, длина канала разряда, см; dU/dt - скорость изменения приложенного напряжения, кВ/мкс; K - коэффициент, зависящий от полярности электродов, их конфигурации и формы напряжения (находится по экспериментальным данным); $\epsilon' = \epsilon \epsilon_0$ - абсолютная диэлектрическая постоянная; ϵ - относительная диэлектрическая постоянная (для стекла 7 - 8, для фарфора 5 - 6); $\epsilon_0 = 8,86$ кВ см - для вакуума; d - толщина диэлектрика, см.

При промышленной частоте напряжения появление скользящего разряда или короны на электроде может быть найдено, как

$$U_{cp} = 1,36 \cdot 10^{-4} / C_{удп}^{0,44}, \text{ кВ}_{действ.} \quad (1.21)$$

Для расчета напряжения перекрытия по сухой поверхности изолятора можно рассмотреть следующие схемы. В схемах на рис. 1.9 - 1.10 между электродами при разности потенциалов возникают напряженности электрического поля: E_{tg} - тангенциальная (рис. 1.9); E_{tg} - тангенциальная и E_{np} - нормальная (рис. 1.10); $C_{удп} = C + C$.



а) б)

Рис. 1.9. Схема расположения электродов по поверхности изолятора (а) и двухэлектродная схема замещения для нахождения напряжения (б) (1 и 2 -электроды; 3 - диэлектрик).

В схемах на рис. 1.9 - 1.10 между электродами при разности потенциалов возникают напряженности электрического поля: E_{tg} -тангенциальная (рис. 1.9); E_{tg} –тангенциальная и $E_{нр}$ -нормальная (рис. 1.10); $C_{удп} = C + C$.

Как было отмечено выше, высокая напряженность находится у электродов малого радиуса кривизны и, следовательно, в этой области начинается процесс ионизации или начало развития канала разряда. Снижение напряженности возможно путем устройства барьера в области сильного электрического поля или у электрода с малым радиусом кривизны полностью выносят

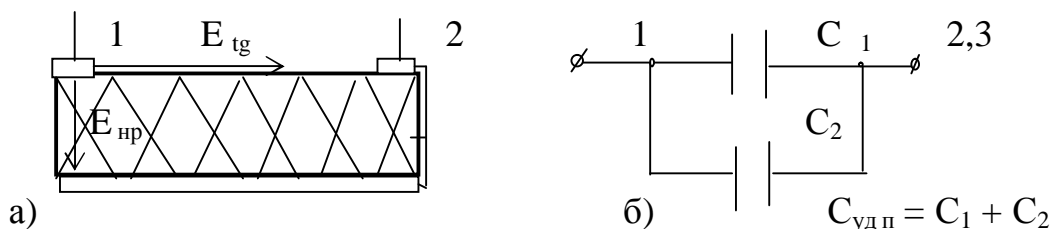


Рис. 1.10. Схема расположение электродов на поверхности изолятора (а) и трехэлектродная схема замещения для исследования напряжения перекрытия (б) (1,2,3 -электроды; 4 -диэлектрик).

развитие канала по воздуху, и силовая дуга, следующая за импульсным перекрытием, не соприкасается и не обжигает поверхность изолятора, исключает также явление короны.

Таковыми устройствами являются ребра (вылеты) по поверхности изолятора. Расположены ребра в области сильного электрического поля или у электрода с малым радиусом кривизны полностью выносят развитие канала по воздуху, и силовая дуга, следующая за импульсным перекрытием, не соприкасается и не обжигает поверхность изолятора, исключает также явление короны.

Мокроразрядное напряжение по поверхности изолятора

Увлажнение поверхности изолятора происходит в результате выпадения дождя, росы или тумана. Сплошная пленка влаги между электродами обуславливает увеличение тока от 5 до 100 мА из-за роста проводимости. В местах наибольшей плотности тока (электрод с малым радиусом кривизны - пестик, штырь, шапочка) выделяется большое количество тепла, что способствует подсушиванию поверхности изолятора и, в дальнейшем, резкому возрастанию падения напряжения на подсушенном участке и его перекрытию. При этом опорная точка дуги с высокой температурой располагается на краю водяной пленки и перемещается по мере ее высыхания (рис. 1.11).

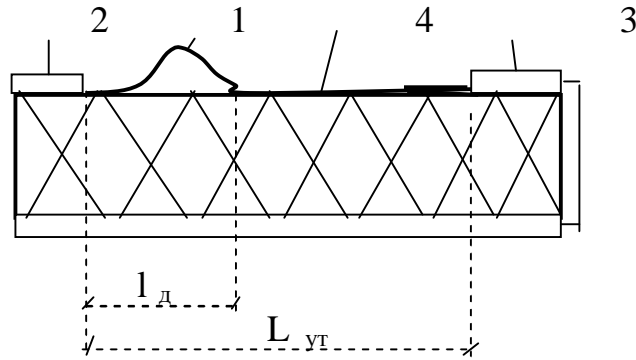


Рис. 1.11. Частичная дужка 1 на увлажненной поверхности изолятора; 2, 3 - электроды; 4 -водяная пленка

Для электрической цепи между электродами 2 - 3 справедливо

$$U_{пр} = l_d E_d(I_{ут}) + I_{ут} R, \quad (1.28)$$

где $U_{пр}$ - напряжение перекрытия между электродами 2 - 3; $E_d(I_{ут})$ - градиент напряжения на дужке в функции тока; l_d - длина дужки или путь утечки; $R = f(L_{ут} - l_d)$ - сопротивление водяной пленки, где $L_{ут}$ -длина пути утечки между электродами 2-3.

Если производная $dI_{ут}/dl_d > 0$, то с увеличением длины l_d дужки подсушенного участка ток в дуге $I_{ут}$ возрастает, опорная точка дуги будет двигаться к противоположному электроду 3 вплоть до полного завершения перекрытия изоляционного промежутка. Если же $dI_{ут}/dl_d < 0$ то дужка оборвется, после чего подсушенный участок увлажнится вновь, затем снова произойдет подсушка, образование дужки и т.д. Это явление носит название перекрывающейся дуги. Перекрытие носит тепловой характер, развивается медленно, наблюдается при длительном приложении к изоляции рабочего напряжения. Согласно Нормам: при дожде интенсивностью в 3 мм/мин и направлении его под углом в 45° к оси изоляции разрядное напряжение по увлажненной поверхности называется мокроразрядным. $U_{мр}$, которое тем ниже, чем меньше сопротивление водяной пленки по пути утечки тока между электродами. Длина разряда при $U_{мр}$ пропорциональна строительной высоте изолятора ($l_{мр} = H_{эф}$). Мокроразрядный градиент $E_{мр} = U_{мр}/H_{эф}$ не зависит от высоты изолятора, а зависит от развитости поверхности и находится в пределах 2,1 - 2,4 кВ/см, а также от отношения длины пути утечки к строительной высоте $l_{эф}/H_{эф}$; его величина зависит от удельной поверхностной проводимости и эквивалентного диаметра изолятора ($\varnothing_{эк} = 1 - 3$ см) позволило создать изолятор стержневой из стеклопластика с гладкой поверхностью или развитой.

Под воздействием коммутационных импульсов перекрытие изолятора проходит через частичную дугу с развитием скользящего разряда по сухой или увлажненной поверхности. Значение коммутационного мокроразрядного напряжения определится

$$U_{мр.к} = k_\tau U_{мр}, \quad (1.23)$$

где $U_{\text{мр}} < U_{\text{ср}}$, а коэффициент импульса $k_{\tau} = 1 + 0,5 (U_{\text{ср}} / U_{\text{мр}} - 1)$ и при длительности импульсов 3 – 5 мкс тем ближе к единице, чем больше продолжительность коммутационных импульсов и чем ближе $U_{\text{мр}}$ к $U_{\text{ср}}$.

Под воздействием импульсов, имеющих гораздо меньшую длительность, чем коммутационные ($\tau_i = 0,1 - 0,15$), канал разряда замыкается через поверхностную емкость изолятора с большим током смещения и высокой скоростью изменения напряжения. Увлажнение и дождь не влияют на величину $U_{\text{ср}}$, а канал разряда как бы приближается (прижимается) к поверхности изолятора по его профилю. Причем, чем выше частота грозового импульса, тем больше превышение емкостной проводимости изолятора по сравнению с активной проводимостью водяной пленки, а влияние ее на распределение напряжения оказывается небольшим.

Оценка $U_{\text{ср}}$ для изоляционной конструкции может быть выполнена по кривым импульсной прочности воздушных промежутков стержень-стержень или стержень-плоскость при воздействии стандартной волны напряжения (1,5/40 мкс) от генератора импульсных напряжений. Сухоразрядное напряжение зависит от атмосферного давления, температуры и влажности, действующих на поверхность изолятора:

$$U_{\text{ср}} = U_{\text{ср.н}} \delta / k, \quad (1.24)$$

где $U_{\text{ср.н}}$ - сухоразрядное напряжение изолятора при нормальных условиях (1013 Па, 20⁰С, 65% влажности или 11 г воды в 1 м³ воздуха); δ - относительная влажность воздуха ($\delta = 0,386 p_0 / (273 + t^{\circ}\text{C})$); k - поправочный коэффициент ($k = (0,15 \delta_1 / 11) + 1,15$); где δ_1 - относительная влажность по психрометру.

Коэффициент δ / k зависит от высоты над уровнем моря и является вероятностной величиной. От высоты над уровнем моря зависит и поправочный коэффициент на давление K_p :

$$K_p = 0,5 (1 + p / 760), \quad (1.25)$$

тогда $U_{\text{мр}} = U_{\text{мр.н}} K_p$ для всех видов изоляторов с некоторым запасом.

На $U_{\text{мр}}$ гирлянд влияет интенсивность дождя и удельная проводимость дождевой воды. По Нормам их интенсивность составляет: 3 мм/мин \pm 20 %, а $\gamma = 100 \cdot 10^{-6} \text{ 1}/(\text{Ом см})$. С уменьшением интенсивности и понижением проводимости $U_{\text{мр}}$ изоляторов повышается, поэтому в эксплуатации это изменение учитывается коэффициентом $K_{\gamma} = 1,1$. При загрязненной поверхности изолятора проводимость слоя загрязнения более высокая, чем пленки дождя, и, следовательно, образование дужек резко увеличивается, а $U_{\text{ср}}$ снижается. Увлажнение приводит к образованию полупроводящего слоя, усиливающего все процессы на поверхности. Это происходит во время туманов, морозящего дождя, таяния снега и гололеда. Особенно такое явление характерно для изоляции во время заносов от котельных, химических, металлургических заводов, брызг морской воды, муссонных ветров, пыли почвы (солончаков) в радиусе от 1 - 5 до 200 – 300 км. Для загрязненной поверхности изолятора нормируется длина пути утечки, связанная с проводимостью загрязненного слоя

(это его толщина и удельная электропроводность). Поэтому должно быть выполнено условие

$$L_{\text{ут.эф}} / U_{\phi} > L_{\text{ут}}, \quad (1.26)$$

где $L_{\text{ут}}$ - минимально допустимая длина пути утечки изолятора; $L_{\text{ут.эф}}$ - эффективная длина пути утечки, которая меньше $L_{\text{ут}}$ на поправочный коэффициент $K_{\text{ут}} < 4,0-5,2$ см/кВ_{действ}); U_{ϕ} - фазное рабочее напряжение на изоляторе.

Для прибрежных морских районов с опасными соляными отложениями и муссонным климатом принимают $L_{\text{ут}} = 4,0 - 5,2$ см/кВ_{действ}.

Меры предотвращения перекрытия по поверхности изолятора:

- очищение атмосферы вокруг мощных ОРУ станции путем устройства золоуловителей и фильтров, повышения высоты дымовых труб, перехода на более чистый вид топлива;

- учет природных явлений, загрязняющих поверхность: морского муссонного климата, ветров с солончаковых почв, влияющих на напряжение перекрытия;

- выполнение конструкции изоляции: устройство капельниц на вылетах, покрытие полупроводящими, кремнийорганическими пастами (глазуровка), устройство ЗРУ и кабельных линий, увеличение числа вылетов и тропикостойких конструкций специальных изоляторов;

- увеличение эффективного пути утечки: числа изоляторов в гирлянде или колонке, устройство новых конструкций;

- профилактические мероприятия под рабочим напряжением: очистка или обмыв, испытание изоляторов с помощью измерительных штанг.

1.7. Электрический пробой твердой изоляции

Одно - и многокомпозиционные изоляционные конструкции

Изоляционный материал, состоящий из одной структуры и имеющий неизменные электроизоляционные свойства, называется однокомпозиционной конструкцией. К таким материалам относятся, в основном, кристаллы (сланца, стекло, фарфор, керамика и т.п.). В технике однокомпозиционные материалы применяются очень редко в чистом виде. Технический диэлектрик - это многокомпозиционный материал. Примером такого материала может служить изоляция для электрической машины. В ее состав входят: изоляционный барьер с высокой электрической прочностью (сланца, мусковиты, флогопиты, стеклоткани, стеклорогожки); механический барьер, подложки (электрокартоны, бумаги, хлопчатобумажные материалы, стеклоленты, стеклоткани, жгуты); связующие или компаунды - склеивающие, пропитывающие (эпоксидные, полиэфирные, формальдегидные битумные и т.д.). Различают изоляцию: ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКУЮ (микалента), которая с повышением температуры размягчается и мигрирует, теряет монолитность, но со сниже-

нием температуры до рабочей, восстанавливает свои электроизоляционные свойства; ТЕРМОРЕАКТИВНУЮ (слюдотерм, монолит, ВЭС), которая с повышением температуры разрушается и теряет свои свойства, не восстанавливающиеся до рабочих.

Электроизоляционные свойства термопластической изоляции достаточно высоки и имеют приемлемый срок службы, однако, остаются дорогостоящими, с невысокими физико-механическими характеристиками. Термореактивная изоляция обладает более высокими электрическими, физико-механическими свойствами и меньше старится, однако, под воздействием, например, коронных явлений, в ней могут развиваться дендриды - это термическая деструкция материала в области сильного электрического поля. Возможны и явления эрозии у электродов в виде науглероженных дорожек, которые резко изменяют проводимость промежутка.

Электрический пробой однокомпозиционной конструкции

Процессы пробоя однокомпонентных изоляционных материалов хорошо изучены. В основе их лежит молекулярно-кинетическая теория, которая исходит из определенных представлений, классических и квантовомеханических представлений, о внутреннем строении вещества и взаимодействии между частицами и квазичастицами. Она опирается на методы теории вероятности и законы молекулярной электродинамики и статистической физики. Строгость и стройность процессов электрического пробоя доказывают следующие теории:

1) теория Хиппена-Каллена (теория ударной ионизации медленными электронами), ее критерием является условие, достаточное для образования лавины электронов в твердом диэлектрике при электрическом поле свободных электронов. Энергия таких электронов достигает энергии ионизации за время нескольких столкновений электронов друг с другом и нейтральных молекул в электрическом поле, а не за промежуток между двумя столкновениями;

2) теория Фрелиха (теория ударной ионизации быстрыми электронами), по которой в отсутствие электрического поля имеется определенная вероятность наличия электронов с энергиями, близкими к энергии ионизации. Именно эти электроны становятся свободными, если попадают в электрическое поле, они ускоряются и приводят к резкому увеличению проводимости - пробую;

3) квантовомеханические теории электрического пробоя:

- **теория электростатической ионизации**, т.е. используется возможность резкого увеличения электронной проводимости твердых диэлектриков вследствие перехода электронов в зону проводимости за счет туннельного эффекта как из нормальной зоны, так и из катода. Здесь ширина запрещенной зоны (потенциальный барьер) обратно пропорциональна напряженности

электрического поля и уменьшается с увеличением наклона уровней (напряженности);

- **теория ударной ионизации**, согласно которой движение электронов при достаточной величине напряженности электрического поля в зоне проводимости с нижнего уровня на верхний или в нормальной зоне с верхнего уровня на нижний и при частичных потерях в ходе взаимодействия с кристаллической решеткой приобретает лавинный характер и далее, при взаимодействии двух электронов на нижнем уровне зоны проводимости или нормальной зоны, один передает энергию другому электрону, достаточную для преодоления потенциального барьера и перехода в другую зону, т.е. способствует росту проводимости или электрическому пробое диэлектрика.

Электрический пробой твердой композиции

Технические свойства диэлектриков в электрическом поле обусловлены временем их эксплуатации (рис. 1.12):

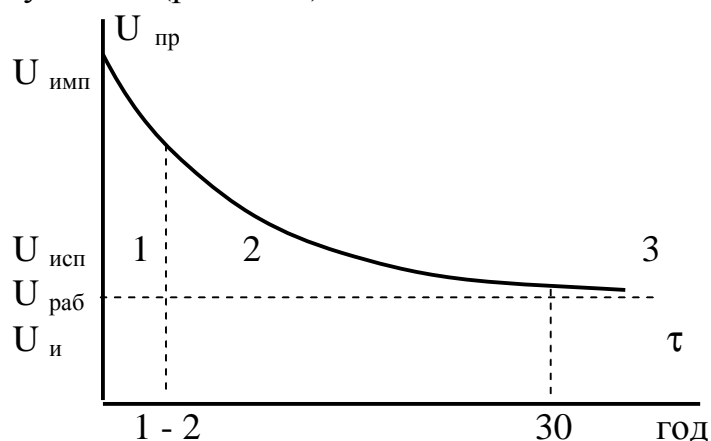


Рис. 1.12. Кривая жизни твердой изоляционной композиции
1 - приработочный период; 2 - рабочий период; 3 - пробой диэлектрика

На изоляцию за время эксплуатации воздействуют:

- электрическое поле рабочего напряжения, повышенного испытательного и перенапряжения;
- тепловой и механические факторы;
- электролитические и другие воздействия (ионизация, корона и т.п.).

Весь комплекс факторов особенно сказывается на изоляции в приработочный период, когда отмечается наибольшее число пробоев изоляции. В рабочий период пробой изоляции - редкое явление, электрическая прочность ее должна проверяться повышенным испытательным напряжением. За весь период эксплуатации возможны следующие пробои изоляции (рис. 1.13.):

импульсный, когда нарушение (разрушение) изоляции происходит в очень короткий период времени (микросекунды) при значительной амплитуде воздействующего напряжения (грозового или коммутационного характера) и без выделения тепла;

электрический, когда амплитуда напряжения остается еще гораздо выше рабочей и время ее воздействия сравнимо с поляризационными явлениями в изоляции. а также отсутствует выделение тепла при пробое;

тепловой пробой характерен явным выделением тепла или разогревом изоляции при амплитудах напряжения не выше испытательного;

комбинированный -это пробой при длительном воздействии рабочего напряжения или частичных разрядов с явным электролитическим процессом и изменением структуры материала.

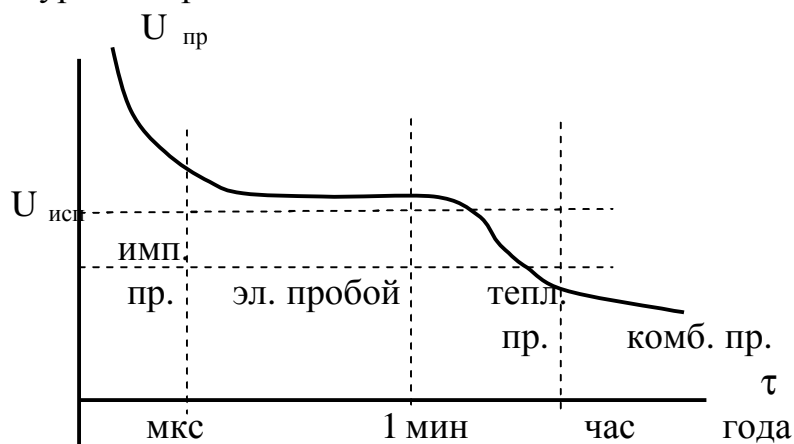


Рис.1.13. Вольт-временная зависимость пробоя технического диэлектрика

В настоящее время для оценки электрической прочности сложной композиции существует, по теории Ю.Н. Вершинина, метод количественного энергетического анализа импульсной электрической прочности, или феноменологическая теория. Метод основан на представлении физических процессов в разрядном промежутке, когда механизм электронно-дырочной проводимости приводит к возникновению области локального (сильного) поля с высокой напряженностью на расстоянии в несколько сот микрон от острия. Последнее искривляет энергетические зоны, создавая условия для туннельного перехода по направлению к острию основных носителей зарядов: электронов - к положительному острию и дырок - к отрицательному. Взаимодействие в процессе ударной ионизации электронов и дырок проводимости с электронами, участвующими в образовании химических связей, приводит к нарушению соответствующих связей и переходу по направлению к острию основных носителей зарядов: электронов - к положительному острию и дырок - к отрицательному. Образование газовой плазмы рассматривается как термодинамический баланс энергии в диэлектрике. Причем критическая составляющая энергоносителей зарядов затрачивается на изменение внутренней энергии в единице объема диэлектрика A_e , в котором возникает начальный участок канала неполного пробоя. Это энергетический критерий пробоя диэлектрика. Импульсная электрическая прочность твердых диэлектриков:

$$U_{пр} = K_n K_p K(\tau, d) A_e^{1,1}, \quad (1.27)$$

где K_n - коэффициент, учитывающий форму поля и полярность импульса; для положительного импульса в системе острие - плоскость $K_n = 1$, для отрицель-

ного электрода стержня $K_{\text{п}} = 1,52$; для - шар-плоскость $K_{\text{п}} = 1,82$; $K_{\text{р}} = 0,75 + 0,5 P$ - коэффициент вероятности пробоя; $K(\tau, d) = 3,55 d^{0,365} \tau^{-0,11}$ - коэффициент, зависящий от толщины диэлектрика (см) и времени воздействия напряжения (мкс); A_e - энергетическая удельная характеристика диэлектрика, ккал/см, индивидуальная для каждого вида, и находится с учетом физических свойств и особенностей молекулярного строения диэлектрика по зависимости

$$A_e = (1,08 \gamma / M) (N_a + n W_{\text{и min}}), \quad (1.28)$$

где 1,08 - коэффициент перехода в плотную газовую плазму; γ - плотность диэлектрика, г/см; M - молекулярный вес; N_a - суммарная энергия связей атомов в молекуле, ккал/моль; n - число атомов, обладающих минимальной энергией ионизации $W_{\text{и min}}$.

Расчетная электрическая прочность по зависимости (1.27) хорошо согласуется с экспериментальными данными для исследуемого материала.

Глава 2. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

2.1. Молния и ее характеристики

Развитие молнии

Молния - это электрический разряд природного характера, который происходит за счет грозовых облаков. Грозы различают на тепловые и фронтальные. Перемещение воздушных потоков с поверхности земли и интенсивная конденсация потока приводит к образованию тепловых грозовых облаков, а встречное движение теплого и холодного воздушных потоков и их интенсивная конденсация, которая смещается вверх над землей - к образованию фронтальных грозовых облаков. Облако считается грозовым, когда в нем произошло разделение зарядов. Причем положительные ионы уносятся потоком воздуха в верхнюю часть облака после того, как замерзшая капля лопается, а отрицательные ионы оказываются в нижней части. Капля конденсата из-за разницы температур и во время перемещения заряжается по внешней поверхности положительным знаком иона, а по внутренней - отрицательным.

Следовательно, основной процесс электризации грозовых облаков приводит к разряду молнии (до 90 %) из отрицательных областей или переносит на землю отрицательный заряд.

По внешнему виду грозовой разряд разделяют на линейный разряд, шаровую молнию и тихий разряд. Наибольший интерес представляют линейные разряды от облака к земле, а также от облака к облаку и в безвоздушное пространство. Первые вызывают наиболее тяжелые грозовые или внешние перенапряжения продолжительностью до 1,33 с, длиной до 3 - 10 км, чаще около 1 км; они многократны, могут быть зигзагообразные, разветвленные,

ленточные и ракетообразные.

Шаровые молнии представляют собой сгусток плазмы электростатического происхождения в ограниченном объеме пространства. Физическая картина явления до сих пор изучается.

Тихие разряды - это коронное явление вокруг возвышающихся над землей предметов (дерево, сооружение, человек и т.д.), находящихся в зоне интенсивной ионизации и имеющих низкую проводимость.

Физическая картина разряда молнии

Исследования отечественных и зарубежных ученых устанавливают много общего между длинным электрическим разрядом и разрядом молнии между облаком и землей. Однако смоделировать полностью разряд молнии невозможно, т.к. не идентичны обкладки конденсаторов генератора импульсных напряжений, система электродов стержень-плоскость, имитирующая облако и землю, электрическая цепь и грозовое облако, которое рассматривают как сочетание расположенных преимущественно по вертикали расположенных преимущественно по вертикали распределенных зарядов обоих знаков в локализованных объемах непроводящего облака.

По стилизованной схеме И.С. Стекольниковца разряд молнии состоит из лидерного или предразрядного процесса, имеющего направление от облака к земле, и главного разряда - от земли к облаку. Анализ фоторазверток и осциллограмм изменения тока молнии и электрического поля во времени устанавливает, что лидерный процесс разряда молнии существует всегда и предшествует главному разряду. У первого импульса разряда молнии лидер развивается медленнее, чем у последующих импульсов, и имеет ветвистый характер, зависящий от местности. Его свечение прерывистое в отличие от непрерывного свечения последующих импульсов. Процесс начинается со стримера, случайно прорастающего ступенями в области коронного чехла (ступе-

ни длиной от 10 до 200 м), поэтому первый лидер имеет вид ступенчатой ветви. Головка стримера, обладающая более интенсивным свечением, служит основой для развития последующих стримеров и ступеней. Зигзагообразность канала молнии физически объясняется ступенчатым характером развития первого импульса, который определяет путь молнии и влияет на место ее удара и на грозоупорность объекта. По ионизированному каналу между облаком и землей развивается главный разряд первого импульса от земли к облаку. Интенсивное стекание заряда лидера в начале развития главного разряда выражается скачком тока и мгновенным сбросом потенциала. Такое изменение физической картины в канале разряда молнии сопровождается акустическим явлением - громом. Скорость развития главного разряда намного больше скорости развития лидера и составляет 20 - 140 км/с, а длительность - от 50 до 100 мкс. Однако ступенчатому лидеру предшествует ионизированный процесс с формированием лидера - пилота, имеющего скорость 200 км/с. После прохождения ступенчатого лидера и главного разряда наступает пауза в несколько сотых долей секунды, затем отмечается процесс формирования следующего лидера и главного разряда. Если лидер сориентировался в высотные сооружения (40 м и более), то после завершения развития первого ступенчатого лидера может отсутствовать главный разряд, однако в последующих стадиях он наблюдается, особенно в горах с плохо проводящей породой.

Параметры разряда молнии

Полярность. Установлено, что независимо от географической широты регистрируются разряды из положительного и отрицательного грозового облака. Однако в большинстве случаев подавляющее число разрядов все же происходит из отрицательной полярности. Так, в 83 % случаев в нашей стране, в 63 % - в США и в 93 % - в Швеции из облака к земле переносится

отрицательный заряд.

Число импульсов. В разряде молнии за время его существования возможно от 2 до 42 импульсов. Если частота их следования составляет 18 - 22 импульсов в 1 с, то человеческий глаз наблюдает разряд молнии в виде мерцания.

Фронт и длительность. **Фронт** - это время нарастания тока молнии до амплитудного значения и параметр, необходимый для оценки помех и перенапряжений в электрических системах. Первые импульсы в 55 % имеют фронт длиннее, чем последующие и лежат в пределах 5 - 20 мкс. Фронты токов молнии в высотные сооружения отличаются меньшими величинами (1 мкс –50 %, 2 мкс –30 %, 5 мкс –10 %).

Длительность - это время, в течение которого амплитуда тока молнии спадает до 50 % значения. В разряде молнии, поражающем высотные сооружения, наблюдается меньшая величина длительности тока молнии (50 % до 30 мкс), в 10 % разрядов - длительность тока до 130 мкс. Для оценки характеристик разрядных устройств рекомендуется определять форму токов молнии, причем в каждой стране свою. Общая длительность разряда молнии до 1,33 с, но в 50 % случаев разряд длится до 0,1 - 0,3 с.

Амплитуда и крутизна. Ток молнии изменяется по экспоненциальному закону, когда он протекает по сопротивлению молниеотвода. Его амплитуду и крутизну отмечают регистраторы во всех грозовых районах мира, чтобы правильно определить средства грозозащиты в электрических системах и на сооружениях. С этой целью даются характеристики (рис. 2.1) вероятностей распределения токов молнии и ее крутизны, возможен расчет токов и крутизны молнии на равнинной поверхности Земли:

$$\text{LgP}(I_m) = - I_m / 60, \text{ кА}; \quad (2.1)$$

$$\text{LgP}(a) = - a / 36, \text{ кА/мкс},$$

где $P(I_m)$ и $P(a)$ – вероятности амплитуды тока и крутизны фронта молнии.

В нашей стране рекомендуются токи молнии до 100 кА, в США этот диапазон ограничен до 65 - 80 кА, причем на ЛЭП их амплитуда выше, чем амплитуда тока молнии, поступающего на электрооборудование распределительных устройств.

Максимальная крутизна тока молнии не превышает 50 кА/мкс. В 78 % случаев она не более 3 кА/мкс. Большим токам соответствуют более длинные фронты волн или большие вероятности появления токов большей крутизны. В диапазоне токов 60 кА и выше фронт волны более 2 мкс, для токов 60 - 20 кА фронт от 1 мкс и выше, для токов менее 20 кА фронты волн менее 1 мкс. Для определения характеристик разрядных устройств и внешней изоляции большое значение имеют сведения о зависимости фронта и крутизны тока молнии от ее амплитуды и крутизны по рис. 2.1.

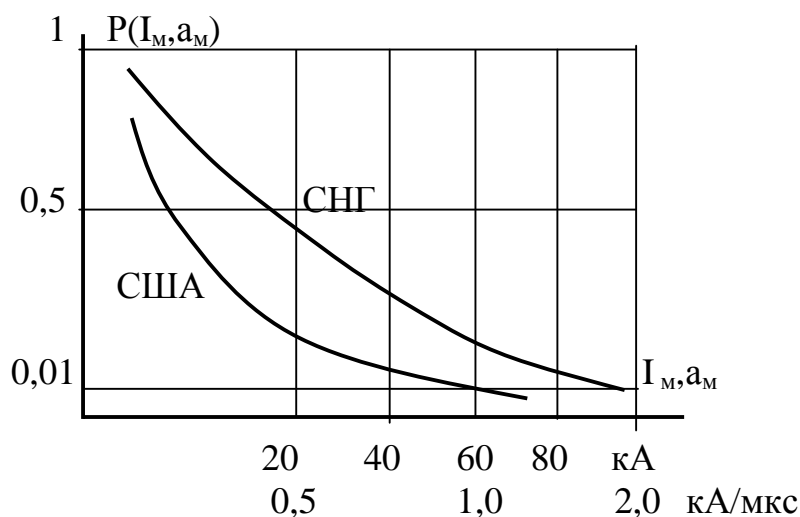


Рис. 2.1. Распределение вероятностей амплитуд и крутизны тока молнии

2.2. Молниеотводы и разрядные устройства

Устройство и назначение молниеотводов

Устройство, воспринимающее прямой удар молнии с целью защиты сооружений и электрического оборудования, называется молниеотводом. Различают стержневые и тросовые молниеотводы, первые выполняют в виде вертикальных стержней (мачт), а вторые - в виде проводов, горизонтально

подвешенных на опорах ЛЭП. В устройство молниеотвода входит: молниеприемник - верхняя часть стержня или провод-трос; спуск - металлическая часть мачты или опора ЛЭП; заземлитель - устройство, выполняемое в земле под молниеотводом для растекания тока молнии в землю.

Стержневые молниеотводы выполняются как трубчатые мачты до 10 м и решетчатые мачты до 40 м, устанавливаемые на конструкциях распределительных устройств и крышах сооружений с надежным заземлителем. Тросовые молниеотводы прокладываются над рабочим проводом в виде стального провода по опорам ЛЭП. Если опоры деревянные, то в качестве спуска используется стальная шина не менее 16 мм, соединяющая трос с заземлителем опоры. Защитное действие опоры проявляется в ориентировании лидера разряда молнии на некоторой высоте. Это зона 100%-ного поражения молниеотвода по рис. 2.2.

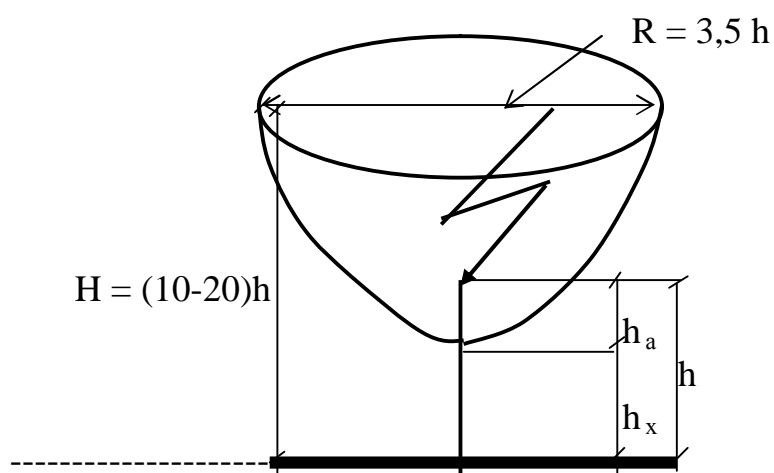


Рис. 2.2. Зона 100% поражаемости молниеотвода
 h - высота молниеотвода; h_a - молниеприемник; h_x - высота защищаемого объекта; R - радиус параболоида зоны ориентирования разряда молнии.

Защитное действие молниеотводов впервые было объяснено в 1753 г. М.В. Ломоносовым и его учениками. Во время лидерной стадии на вершине молниеотвода скапливаются заряды, которые резко увеличивают напряженность электрического поля на пути между лидером и вершиной молниеотво-

да, что предопределяет удар молнии в молниеотвод, а не в объект, который находится поблизости и более низкий.

Зоны защиты стержневых молниеотводов

Зоной защиты называют пространство вокруг молниеотвода, вероятность попадания в которое очень низкая. Зоны защиты определяют на моделях, в которых канал молнии имитируется стержнем, расположенным на высоте H ориентировки молнии, а на стержень подается импульс напряжения от генератора импульсных напряжений (ГИН). В место с наибольшей вероятностью поражения устанавливается стержень-молниеотвод.

1). Зона защиты одиночного молниеотвода. Радиус зоны защиты рассчитывается для рис. 2.3

$$r_x = h_a 1,6 p / (1 + (h_x / h)) \text{ или } r_x = 1,5 (h - h_x / 0,92) \quad (2.2)$$

где коэффициент $p = 1$ для $h < 30$ м и $p = 5,5 / \sqrt{h}$ для $h > 30$ м.

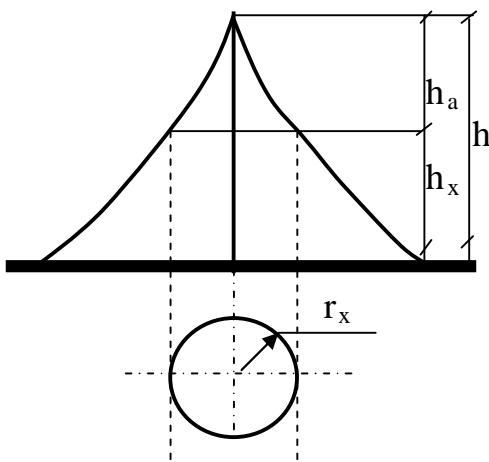


Рис. 2.3. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода

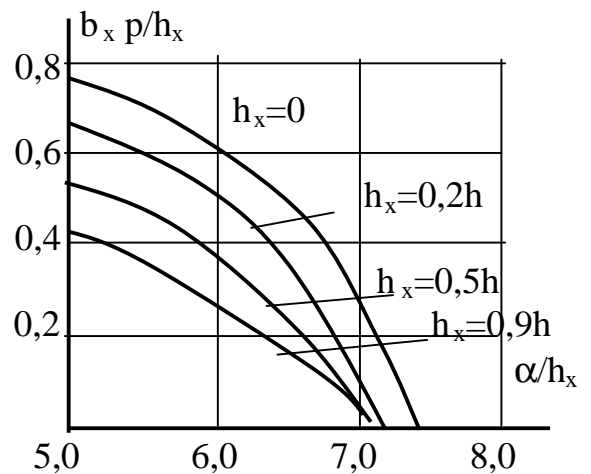


Рис. 2.4. Расчетные кривые для ширины зоны защиты двух молниеотводов

2). Зона защиты двух молниеотводов. Зона защиты для двух молниеотводов одинаковой высоты выполняется по рис. 2.5 а. Если $\alpha = 2 R = 7 h$ - расстояние между молниеотводами, то поверхность между ними не будет поражаться молнией. Объект в точке между молниеотводами на высоте h_0 мо-

жет быть защищен молниеотводами высотой h и установленными на расстоянии

$$\alpha \leq 7 (h - h_o) p \text{ или } h_o = h - \alpha / 7p, \quad (2.3)$$

где $p = 1$ при $h \leq 30$ м ; $p = \sqrt{30/h} = 5,5 \sqrt{h}$ при $h = 30 - 100$ м.

Расчет зоны защиты молниеотводов сводится к построению пространства вблизи их. Радиус зоны защиты r_x на высоте h_x (высота защищаемого высоковольтного оборудования) рассчитывается выражением

$$r_x = (h - h_x) 1,6 p / (1 + h_x / h) = h_a p 1,6 / (1 + h_x / h). \quad (2.4)$$

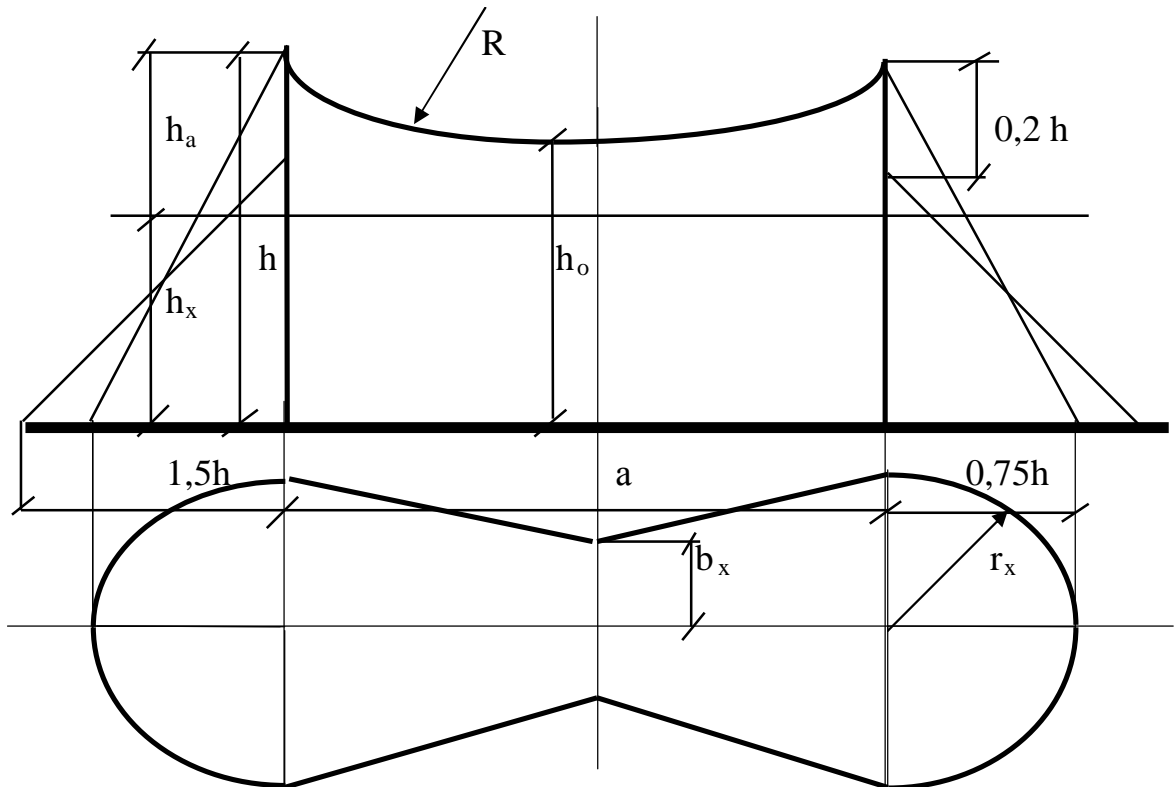


Рис.2.5 а. Зона защиты двух стержневых молниеотводов

Объект в точке между молниеотводами на высоте h_o может быть защищен молниеотводами высотой h и установленными на расстоянии

$$\alpha \leq 7 (h - h_o) p \text{ или } h_o = h - \alpha / 7p, \quad (2.3)$$

где $p = 1$ при $h \leq 30$ м ; $p = \sqrt{30/h} = 5,5 \sqrt{h}$ при $h = 30 - 100$ м.

Расчет зоны защиты молниеотводов сводится к построению простран

ства вблизи их. Радиус зоны защиты r_x на высоте h_x (высота защищаемого высоковольтного оборудования) рассчитывается выражением

$$r_x = (h - h_x) 1,6 p / (1 + h_x / h) = h_a p 1,6 / (1 + h_x / h). \quad (2.4)$$

Ширина защитной зоны b_x для объекта посередине между молниеотводами на высоте h_x может быть найдена по зависимости

$$b_x = 1,5 h_o (1 - h_x / (0,8 h_o)). \quad (2.5)$$

Объекты открытых распределительных устройств станций и подстанций, которые располагаются на большой территории, защищают несколькими молниеотводами. В этом случае внешняя часть зоны защиты определяется как зона защиты двух молниеотводов. Внутренняя часть зоны защиты нескольких молниеотводов не строится. Объект высотой h_x , находящийся внутри треугольника или прямоугольника, образуемого молниеотводами будет защищен в том случае, если диаметр окружности, проходящей через вершины молниеотводов или диагональ прямоугольника, в углах которого находятся молниеотводы, не будет больше по приведенному неравенству на высоте h_x

$$D \leq 8 p (h - h_x). \quad (2.6)$$

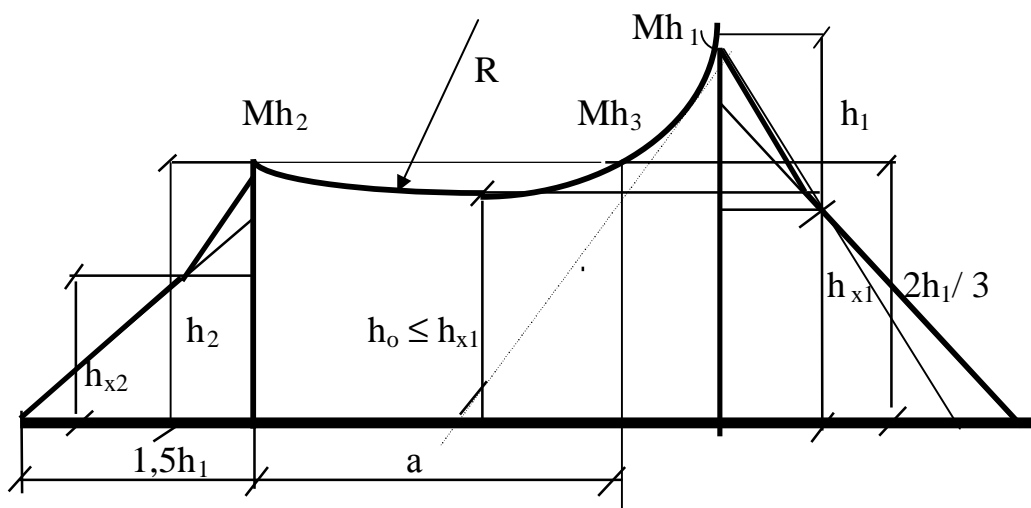


Рис. 2.5б. Зона защиты двух молниеотводов разной высоты

Для двух молниеотводов разной высоты рис. 2.5 б сначала строится зона защиты одного молниеотвода Mh_1 большей высоты, затем через вершину

молниеотвода Mh_2 проводят горизонталь до пересечения с зоной защиты Mh_1 , считая, что вершина некоторого фиктивного молниеотвода Mh_3 совпадает с этой точкой пересечения. Затем для молниеотводов Mh_2 и Mh_3 одинаковой высоты строится зона защиты на расстоянии a . Для одиночного молниеотвода радиус зоны в такой системе находится: $r_x = 1,5 h (h - h_x / (0,8 h))$, если $h_x \leq 2h / 3$, если $h_x \geq 2h / 3$, то $r_x = 0,75 h (1 - h / h_x)$

3). Зоны защиты трех и четырех молниеотводов. Большая территория распродустройства станций и подстанций защищается от ПУМ несколькими молниеотводами. Зона защиты в таком случае по рис. 2.6 строится так же, как зона защиты двух молниеотводов с учетом высоты защищаемого объекта h_x , который должен находиться внутри остроугольного треугольника или прямоугольника с молниеотводами в вершинах. Диаметр окружности, проходит через вершину треугольника или диагональ прямоугольника, должен удовлетворять условию

$$D < 8 p h_0 . \quad (2.6)$$

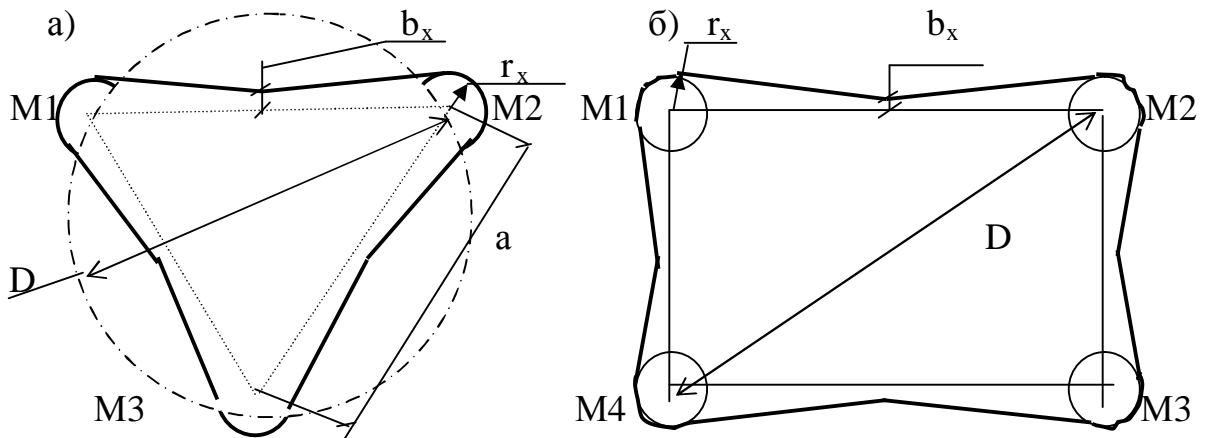


Рис. 2.6. Зоны защиты при трех а) и четырех б) молниеотводах на высоте защищаемого объекта h_x

Зоны защиты двух молниеотводов могут быть описаны формулами: при вероятности прорыва молнии через границу зоны защиты $P_{пр} = 0,005$

$$\begin{aligned}
h_o &= \begin{cases} h_x & \text{при } a < h; \\ h_a - (0.17 + 3 \cdot 10^{-4} L) (a - h) & \text{при } a > h; \end{cases} \\
b_x &= \begin{cases} r_x & \text{при } a < h; \\ r_o (h_o - h_x) / h_o & \text{при } a > h; \end{cases} \quad (2.7)
\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
h_{x\min} &= \begin{cases} h_a & \text{при } a < h; \\ h_a - 0.14 (a - 1.5 h) & \text{при } a > 1.5 h; \end{cases} \\
b_x &= \begin{cases} r_x & \text{при } a < 1.5 h; \\ r_o (h_{x\min} - h_x) / h_{x\min} & \text{при } a > 1.5 h; \end{cases} \quad (2.8)
\end{aligned}$$

где r_o - радиус зоны защиты одиночного молниеотвода на уровне земли ($h_x = 0$).

Если расстояние a превышает $3 h$ при $P_{пр} = 0,005$ или $5 h$ при $P_{пр} = 0,05$, то каждый из молниеотводов рассматривается как одиночный.

Зоны защиты тросовых молниеотводов

Для одного тросового молниеотвода вертикальное сечение зоны защиты строится также, как и для стержневого, а числовые коэффициенты находятся по рис.2.7а. Внешняя зона защиты двух параллельных тросов на ЛЭП по рис. 2.7 б, расположенных на расстоянии α , определяется как для одиночного троса. Дуга окружности проходит через три точки: через два троса и через середину промежутка на высоте

$$h_o = h - a / 4 p. \quad (2.9)$$

Условие защиты среднего провода при горизонтальном расположении проводов и двух тросов в пролете

$$a < 4 p (h - h_x) = 4 p (h_{тр} - h_{пр}) \quad (2.10)$$

осуществляется всегда со значительным запасом.

Экранирующее действие тросов принято характеризовать углом защиты α . Чем меньше α , тем меньше вероятность прорыва молнии сквозь тросовую защиту:

$$\lg P_m = (\alpha h_{\text{оп}} / 90) - 4, \quad (2.11)$$

где $h_{\text{оп}}$ - высота опоры.

Угол защиты одного троса на ЛЭП 35 - 220 кВ $28^\circ - 35^\circ$, а для ЛЭП 500 кВ и выше с двумя тросами не более 23° .

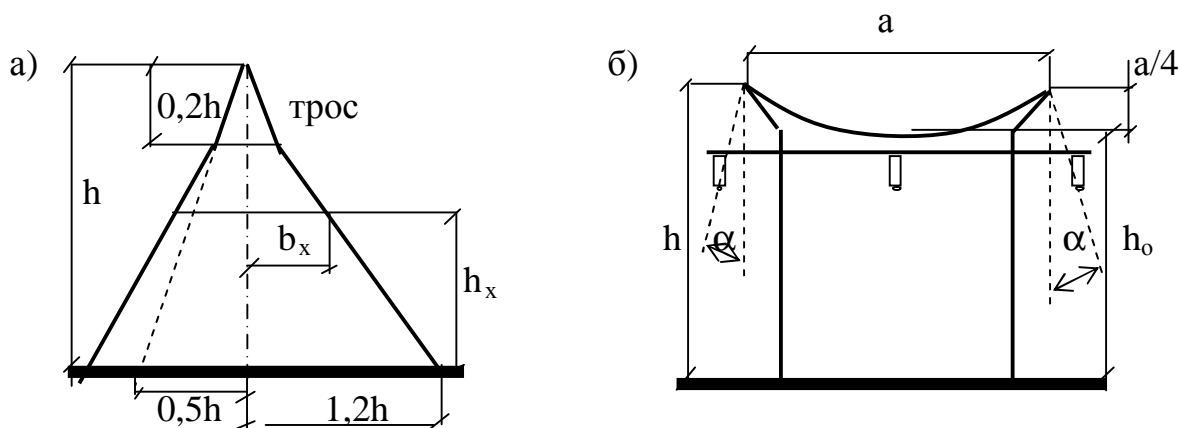


Рис. 2.7. Зоны защиты одного а) и двух б) тросовых молниеотводов

Заземлители и их характеристики

Заземлители на распределительных устройствах представляют собой сложную систему, выполненную из горизонтальных металлических полос, объединяющих вертикальные электроды и образующих распределенную сетку на площади распределительного устройства. На ЛЭП заземлитель опор выполнен на базе железобетонного фундамента.

Основной характеристикой заземлителя является сопротивление земли стекающему току молнии по устройству заземлителя. Сопротивление оценивается геометрическим размером заземлителя и удельным сопротивлением грунта ρ . Для одиночного стержневого молниеотвода или линейной опоры сопротивление заземлителя можно рассчитать по следующим зависимостям:

сопротивление вертикальной трубы или стержня

$$R_B = (\rho / (2 \pi l) \ln(4 l (2 t + l)) / (d (4 t + l))); \quad (2.12)$$

сопротивление горизонтальной полосы

$$R_{гп} = (\rho / (\pi l)) \ln(1,5 l / \sqrt{b t}); \quad (2.13)$$

сопротивление горизонтального фундамента

$$R_{гф} = (1,7 \rho / (2 \pi t)) \ln(4 t / b), \quad (2.14)$$

где l - длина трубы или полосы; t - глубина залегания полосы верхнего конца фундамента; b - ширина полосы или фундамента; d - диаметр трубы или стержня.

Расчетное значение ρ находится по данным измерений, проводимых в исследуемом районе, и определяется как

$$\rho = K \rho_{изм}, \quad (2.15)$$

где $K = 1,4$ - сезонный коэффициент для средней влажности грунта; $K = 2,6$ - то же для грунта переувлажненного; $\rho_{изм}$ - измеренное удельное сопротивление грунта.

Заземлитель, воспринимающий ток молнии, называется сосредоточенным. При прохождении импульсных токов через такой заземлитель возникает зона искрения, что увеличивает эффективный размер заземления и уменьшает его сопротивление. Такое импульсное сопротивление отличается от стационарного, измеренного при переменном напряжении рабочей частоты, на величину импульсного коэффициента $\alpha_{и}$. На границе искровой зоны радиусом r и напряженностью электрического поля

$$E_{пр} = I \rho / (2 \pi r_i l), \quad (2.16)$$

откуда

$$r_i = I \rho / (2 \pi E_{пр} l). \quad (2.17)$$

Импульсное сопротивление заземлителя

$$R_{и} = (\rho / (2 \pi l)) \ln(4 g l E_{пр} / (I^2 \rho)) \quad (2.18)$$

и импульсный коэффициент

$$\alpha_{и} = \ln(4 \pi l E_{пр} / (I^2 \rho)) / \ln(2 l / r) \quad (2.19)$$

связаны со стационарным сопротивлением заземлителя соотношением

$$\alpha_{и} = R_{и} / R. \quad (2.20)$$

Без учета искровых процессов, которые связаны с громоздкими расчетами, для протяженного горизонтального заземлителя импульсный коэффициент находится

$$\alpha_{и} = 1 + (L_0 l / (3 \tau_{ф} R)), \quad (2.21)$$

где $L_0 = 0,2 (\ln(l / r) - 0,31)$ - индуктивность единицы длины горизонтального заземлителя, мкГн/м; $\tau_{ф}$ - длительность фронта тока молнии, мкс.

С учетом импульсного коэффициента использования заземлителя $j_{и}$, учитывающего ухудшение условий растекания тока молнии вследствие взаимного экранирования электродов в количестве n труб или полос, импульсное сопротивление

$$R_{и} = \alpha_{и} R_3 / (j_{и} n). \quad (2.22)$$

Для сетки из вертикальных электродов, соединенных горизонтальными полосами, сопротивление возможно рассчитать по эмпирической формуле

$$R_3 = \rho ((A / \sqrt{S}) + (1 / (l_{\Sigma} + n l))), \quad (2.23)$$

где l_{Σ} - суммарная длина горизонтальных полос; n и l - число и длина вертикальных электродов; S - площадь, занятая заземлителем; ρ - расчетное удельное сопротивление грунта; A - коэффициент, который находится по значению

$1 / \sqrt{S}$	-	0	0,05	0,1	0,2	0,5
A	-	0,44	0,4	0,37	0,33	0,26

Для протяженных заземлителей ($\sqrt{S} = 10$ м) импульсный коэффициент приблизительно можно найти из выражения

$$\alpha = \sqrt{(1500 \sqrt{S}) / ((\rho + 320) (I_m + 45))}, \quad (2.24)$$

где S - площадь, м²; ρ - удельное сопротивление грунта, Ом м; I_m - ток молнии, кА.

Расстояние между заземлителем отдельно стоящего молниеотвода и защищаемым объектом при допустимой напряженности поля в земле $E_{пр} = 300$ кВ/м выразится

$$l_3 = 0,02 R_{и} = 60 R_{и} / 300 > 3 \text{ м.} \quad (2.25)$$

Разрядные устройства

Возникающие перенапряжения в электрических сетях проявляются в виде электромагнитной волны с амплитудой, превышающей рабочее напряжение. Предотвратить появление на изоляции электрооборудования импульсов перенапряжения или ограничить их амплитуду и крутизну могут защитные устройства. Поэтому разрядник устанавливается параллельно защищаемому объекту. Различают разрядники с искровыми промежутками (ИП) - это защитные промежутки, трубчатые разрядники (РТ), вентильные разрядники (РВ) и без искровых промежутков - это нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН).

Вольтсекундная характеристика (ВСХ) для разрядников является основной. Ее параметры ниже ВСХ защищаемой изоляции электрооборудования, чтобы исключить перекрытие или пробой изоляции по рис. 2.8 б - в этом смысл координации.

Разрядники с ИП не только защищают изоляцию от перенапряжения, но и осуществляют гашение дуги сопровождающего его тока, когда по ионизированному пути искрового промежутка устремляется ток, обусловленный напряжением промышленной частоты. Время гашения дуги должно быть меньше, чем время действия релейной защиты, тогда выполняется защитное условие разрядника. Продольное дутье дуги в трубчатых разрядниках и уменьшение сопровождающего тока за счет нелинейных сопротивлений, включенных последовательно ИП, выполняют защитные функции и помогают отличать РТ и РВ от ПЗ. При грозовых импульсах (ток несколько килоам-

пер) идет возрастание нелинейной характеристики рабочего сопротивления, в связи с чем величина сопровождающего тока рабочей частоты незначительна и не требует ИП в разряднике типа ОПН.

1).Защитный промежуток. ПЗ конструктивно выполняет в виде двух стержней, один из которых имеет глухое заземление. Концы стержней электродов расходятся на рис. 2.8 а с целью более быстрого гашения дуги. Время гашения достигает полутора периодов промышленной частоты. Резконеоднородное поле между электродами ПЗ приводит к крутым ВСХ, поэтому для ПЗ характерно быстрое возрастание разрядного напряжения в короткие промежутки времени и нарушение координации изоляции по рис. 2.8 б, когда $U_{пад}$ крутая, то $t_1 > t_2$, и изоляция пробьется прежде, чем ПЗ. Длительное горение дуги между электродами ПЗ часто приводит в сети с глухозаземленной нейтралью в действие релейную защиту. Простота и дешевизна ПЗ определяют его применение в сетях низкого напряжения и для защиты изоляции линий электропередачи при ограничении максимального значения, набегающего на подстанцию импульса напряжения при грозовом разряде.

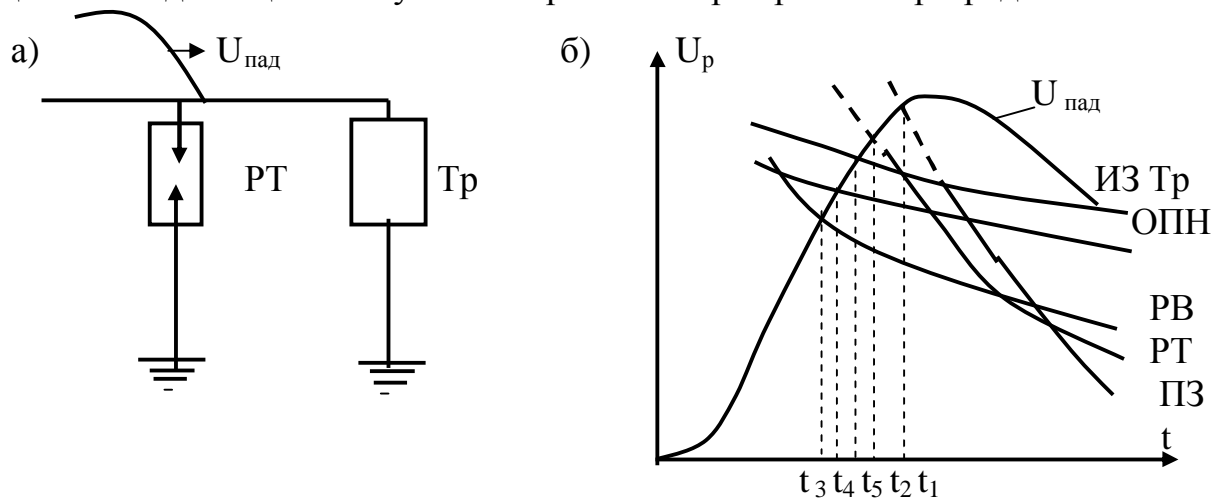


Рис. 2.8. Принцип защиты изоляции устройств от перенапряжения:

- а) - схема включения разрядника;
- б) - координация устройств с амплитудой падающей волны.

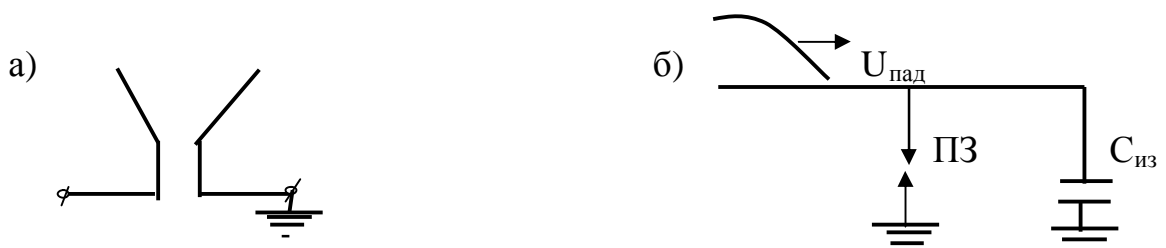


Рис. 2.9. Защитный промежуток а) и его электрическая схема б) в электрической сети

2). Трубчатый разрядник (рис. 2.10). Защитное действие РТ характеризуется ВСХ и сопротивлением его заземлителя. ВСХ зависит от промежутков S_1 и S_2 и имеет вид резко неоднородного электрического поля и определяет напряжение срабатывания разрядника. Сопротивление заземлителя оценивает остающееся после срабатывания РТ импульсное напряжение. Если промежуток S_1 является дугогасящим и не регулируется, то S_2 регулируется и ограничивает газогенерирующий материал трубки, который постоянно разлагается под действием токов утечки. Значение верхнего и нижнего пределов отключаемых токов зависит от размеров внутреннего канала РТ: увеличение диаметра канала, как и уменьшение промежутка S_2 , приводит к увеличению токов отключения. В электрических сетях токи однофазного и трехфазного короткого замыкания должны быть ниже верхнего предела отключаемых токов РТ, а ток замыкания больше нижнего предела.

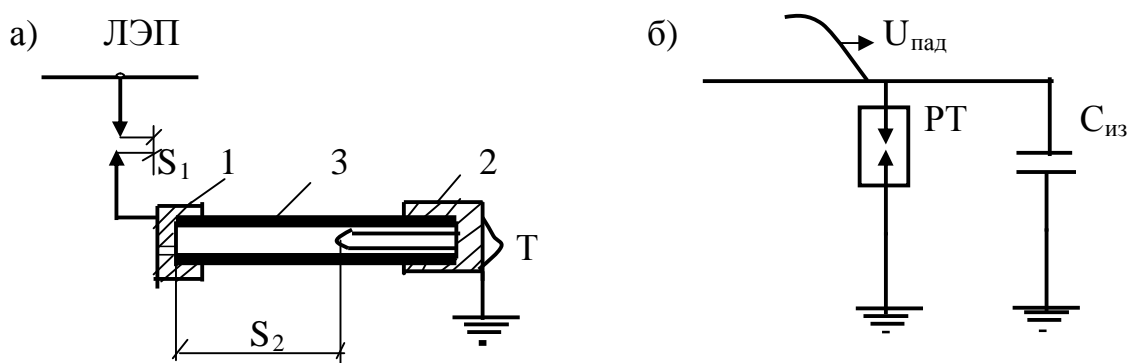


Рис. 2.10. Устройство трубчатого разрядника а) и его обозначение в электрической схеме б)

S_1 и S_2 - внешний и внутренний искровые промежутки; 1 - электрод-кольцо с отверстием для выхлопа газа; 2 - внутренний электрод с заземленной крышкой; 3 - газогенерирующая изоляционная трубка.

Различают РТ типа РТФ с фибробакелитовой трубкой и типа РТВ или РТВУ - с трубкой из винипласта. Первая цифра на РТ означает номинальное напряжение, а цифры после дроби - пределы отключаемых токов (действующее значение), например, РТФ 110/0,8 - 5.

К недостаткам устройств РТ кроме крутой ВСХ относят еще и высокий процент износа газогенерирующей трубки, когда при выгорании ее на 20 – 25 % требуется замена РТ, который, как и ПЗ, устанавливается в основном для грозозащиты подходов на ЛЭП 6 - 10 кВ и в ограниченном количестве комплектов на ЛЭП 35 – 110 кВ.

3). Вентильные разрядники. Схема включения и принцип работы вентильного разрядника РВ приведены на рис. 2.11.

Основные элементы РВ - это многокамерный искровой промежуток и последовательно с ним соединенное нелинейное рабочее сопротивление.

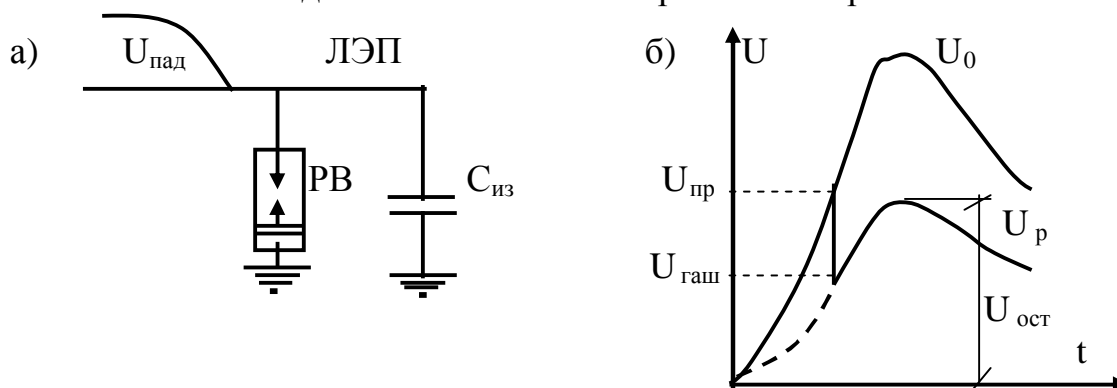


Рис. 2.11. Электрическая схема включения а) и принцип работы б) разрядника

Основные элементы РВ - это многокамерный **искровой промежуток** и последовательно с ним соединенное **нелинейное рабочее сопротивление**. При попадании грозовой волны перенапряжения пробивается искровой промежуток и проходящий через разрядник импульсный ток стекает в землю, создавая падение напряжения на нелинейном сопротивлении. Если импульсный ток меняется существенно, то импульсное пробивное напряжение $U_{пр}$ - незначительно, благодаря крутой вольтамперной характеристике (ВАХ) ма-

териала нелинейного сопротивления. Напряжение, возникающее на сопротивлении при импульсном токе, который называется током координации, является остающимся $U_{ост}$, оно близко к значению $U_{пр}$ и должно быть на 20–30 % ниже пробивного напряжения $U_{пр}$ изоляции. По пути импульсного тока через РВ проходит сопровождающий ток с частотой 50 Гц. При нем сопротивление резко возрастает и сопровождающий ток снижается, что приводит к гашению дуги в искровом промежутке при переходе тока через нулевое значение. Напряжение промышленной частоты на РВ, при котором надежно гаснет дуга, называется напряжением гашения $U_{гаш}$. Перенапряжение после РВ оказывается ограниченным по амплитуде (до $U_{ост}$) и крутизне (более пологий фронт у кривой U_p , чем у кривой U_0). Расчет основных характеристик РВ ведут при однофазном коротком замыкании (КЗ) на землю напряжение гашения можно оценить

$$U_{гаш} = K_3 U_n, \quad (2.26)$$

где U_n - номинальное линейное напряжение сети; K_3 - коэффициент для установок с заземленной нейтралью принимается равен 0,8, а для установок с изолированной нейтралью - 1,1; дугогасящее действие искровых промежутков РВ характеризуется коэффициентом гашения

$$K_{гаш} = U_{пр} / U_{гаш}, \quad (2.27)$$

где $U_{пр}$ - пробивное напряжение промежутков при частоте 50 Гц; защитное действие нелинейных сопротивлений оценивается коэффициентом защиты

$$K_{защ} = U_{ост} / (\sqrt{2} U_{гаш}). \quad (2.28)$$

Искровые промежутки РВ состоят из двух латунных электродов, разделенных миканитовой шайбой. Однородное электрическое поле между электродами создается их профилем. В силу разной диэлектрической проницаемости воздуха и миканита, возникающая ионизация в межэлектродном пространстве приводит к пробое промежутка при коэффициенте импульса, близком к единице. Большое число промежутков, устройство магнитного га-

шения дуги и применение токоограничивающих искровых промежутков приводят к стабильному гашению дуги или быстрому восстановлению электрической прочности изоляции между электродами. Магнитное поле устройств гашения дуги улучшает защитные действия РВ, снижая амплитуду падающей волны перенапряжения.

Нелинейные сопротивления в РВ выполнены из порошка электротехнического корборунда SiC, который спекают в виде дисков. При температуре до 300 °С получают материал вилит, а при температуре обжига свыше 1000 °С изготавливают тервитовые диски. Для вилита важен поверхностный запорный слой, который образуется в результате проникновения молекул окиси кремния в зерно корборунда, удельное сопротивление которого очень высоко (до $10^4 - 10^6$ Ом м). Поскольку удельное сопротивление собственного зерна около 10^2 Ом м, все напряжение прикладывается на запорный слой, сопротивление его в это время падает и определяется собственным сопротивлением корборунда.

В области больших токов, проходящих через РВ при перенапряжениях, нелинейность вилита имеет значение 0,11 - 0,12, а для тервита - 0,15 - 0,25. В области сопровождающих токов нелинейность сопротивлений велика: для вилита - 0,28 - 0,3, для тервита - 0,35 - 0,38. Для РВ вольтамперная характеристика

$$U = A I^\alpha, \quad (2.29)$$

где A - постоянная, равная напряжению на сопротивлении диска при токе в 1 А; α - коэффициент нелинейности.

Предельные импульсные токи для любых дисков порядка 5 - 14 кА. Поскольку токи молнии выше, то пропускная способность РВ нормируется путем испытания повышенным напряжением этих устройств.

Все РВ делятся на четыре группы: первая имеет наибольшее остающееся напряжение, остальные используются для малоответственной изоляции электрооборудования. По типам РВ различают:

РВП (подстанционный), РВД (облегченный для сельских сетей); IV группа;

РВС (станционный), самый распространенный; III группа;

РВМ (с магнитным гашением дуги), машинный; II группа;

РВМГ (магнитный, грозовой) с увеличенной пропускной способностью; II группа;

РВТ (токоограничивающий) и РВРД (с растягивающейся дугой) из термитовых дисков с меньшим защитным действием; I группа, высокая пропускная способность позволяет использовать их для ограничения внутренних перенапряжений;

РВМК (комбинированные) для ограничения всех видов перенапряжений, с термитовыми дисками, с ограничением токов молнии до 10 кА и более.

4). Нелинейные ограничители перенапряжений. Невысокая нелинейность корборунда в РВ, а также усложнение его конструкции для снижения защитного действия, заставили создать разрядники на основе окиси цинка со значительной нелинейностью - нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН), которые имеют малые габариты, большую пропускную способность и глубокое ограничение всех видов перенапряжений, даже междуфазных. Защитное действие ОПН при коммутационных перенапряжениях составляет $(1,65 - 1,8) U_{\phi}$, при ограничении грозовых перенапряжений в сетях 110 кВ - $(2,2 - 2,4) U_{\phi}$, а в линиях 750 кВ - $2 U_{\phi}$.

ОПН комплектуется из дисков диаметром 28-38 мм и высотой 8 мм, которые составляют параллельно соединенные колонки. Торцы дисков металлизированы, чтобы обеспечить контакт между дисками. Число параллельных колонок резисторов ОПН в зависимости от пропускной способности из-

меняется от четырех при 110 кВ до 30 при 750 кВ. Коэффициент нелинейности резисторов в ОПН, когда ограничиваются коммутационные перенапряжения, равен 0,03 - 0,05. Когда ограничиваются грозовые перенапряжения при токах молнии до 10 кА, он достигает 0,07 - 0,1. Такая высокая нелинейность обусловлена прохождением при рабочем напряжении или резонансных перенапряжениях через нелинейные сопротивления тока порядка долей миллиампера на одну параллельную колонку, что позволяет исключить искровой промежуток и подключить ОПН непосредственно в сеть. Отсутствие понятия напряжение гашения однако не исключает нарушения тепловой устойчивости аппарата при длительных резонансных перенапряжениях и больших токах, поэтому для ОПН установлены допустимые длительности приложения повышенных напряжений, координированные с действием релейной защиты.

2.3. Волновой процесс на электрооборудовании

Электромагнитная волна на линии без потерь

Волновой процесс на ЛЭП создается при любом электромагнитном возмущении - это включение и отключение линии, короткое замыкание или обрыв фазы, поражение ЛЭП грозовым разрядом. Место возмущения вызывает распространение электромагнитной волны в обе стороны по проводам ЛЭП. В реальных ЛЭП волновой процесс при высоких напряжениях сопровождается потерями энергии на нагрев проводников и корону. Однако их значениями часто пренебрегают, что существенно упрощает расчет и фактически не искажает картины максимальных расчетных значений перенапряжений. Такая расчетная ЛЭП называется линией без потерь. Дифференциальными уравнениями волновой процесс на ЛЭП без потерь выражается

$$- dU / dx = L_0 di / dt; \quad - di / dx = C_0 dU / dt, \quad (2.30)$$

где L_0 и C_0 - индуктивность и емкость линии на единицу длины.

Решением этих уравнений являются волновые функции напряжения и тока:

$$u = u^+ + u^- = F^+(x - \vartheta t) + F^-(x + \vartheta t); \quad (2.29)$$

$$i = i^+ - i^- = (1 / Z) F(x + \vartheta t),$$

где $Z = \sqrt{Z_0 / C_0}$ - волновое сопротивление линии без потерь; $\vartheta = 1 / \sqrt{L_0 C_0} = c / \sqrt{\epsilon' \mu'}$ - скорость распространения волны, где c - скорость света, равная 300 м/мкс; ϵ' и μ' - соответственно электрическая и магнитная проницаемости (для воздушной линии $\epsilon' = \mu' = 1$ и $\vartheta = c$; для кабельной линии $\epsilon' = 4$, $\mu' = 1$ и $\vartheta = c / 2 = 150$ м/мкс);

$u^+ = F^+(x - \vartheta t)$ - прямая или падающая волна;

$u^- = F^-(x + \vartheta t)$ - обратная или отраженная волна;

$(x - \vartheta t)$ и $(x + \vartheta t)$ - функции волн в пространственных координатах в заданный момент времени t , которые позволяют осуществлять переход от изображения волны в функции линейной координаты к изображению волны в функции пространственной координаты через произведение аргумента волны t на скорость волны ϑ ;

i^+ и i^- - соответственно ток падающей и отраженной волн;

u и i - напряжение и ток преломленной волны в рассматриваемой узловой точке. Узловая точка на ЛЭП или в электрической цепи - это место перехода одного значения волнового сопротивления в другое, например, воздушная линия - кабельная линия, воздушная линия с тросом - воздушная линия без троса, воздушная линия - ошиновка распреустройства - силовой трансформатор и т.д.

Для однопроводной воздушной линии волновое сопротивление определяется

$$Z = \sqrt{Z_0 / C_0} = 60 \ln(2 h / r) = 1.38 \lg(2 h / r), \quad (2.32)$$

где h - средняя высота подвеса провода над землей; r - радиус провода, для расщепленных проводов - r_3 ; для воздушной ЛЭП без расщепления проводов

$Z = 550 - 450 \text{ Ом}$; для линии с расщепленными проводами $Z = 350 - 400 \text{ Ом}$; для кабельной линии в силу их большой удельной емкости и малой удельной индуктивности $Z = 5 - 20 \text{ Ом}$, поэтому в кабельной линии ток волны намного выше, чем в воздушной линии при одном и том же напряжении.

Индуктивность и емкость линии конечной длины l находятся из уравнения

$$L = L_0 l = Z l / \vartheta; \quad C = C_0 l = l / (Z \vartheta). \quad (2.33)$$

Типовыми формами волн, которыми можно воспользоваться в расчетах, являются: прямоугольная волна типа $u_o(t) = U_o$; косоугольная - типа $u(t) = a t_\phi$, где a - крутизна волны, t_ϕ - фронт волны; экспоненциальная - типа $u(t) = U_o e^{\alpha t}$. Путем наложения этих элементарных волн можно образовать можно прямоугольную волну длиной t_q косоугольную с фронтом длиной t_ϕ или апериодический импульс $u(t) = U_o (e^{-\alpha t} - e^{\alpha t})$. При воздействии на расчетную схему единичной волны $U_o = 1$ искомое преломленное напряжение (ток) называется переходной функцией $h(t)$. Используя ее значение, с помощью интеграла Дюамеля можно найти искомое преломленное напряжение $u(t)$ при воздействии на схему волны $u_o(t)$ произвольной формы.

Преломление и отражение волн в узловой точке линии

Падающая электромагнитная волна по рис. 2.12 а движется в линии с волновым сопротивлением $Z_{л}$ и набегаёт на узловую точку А, к которой подключена нагрузка $Z_{н}$, в общем случае состоящая из любой комбинации сопротивлений r, L, C . Вследствие изменения соотношения между напряжением и током от падающей волны в узловой точке появляется отраженная и преломленная волна. В точке А справедливы уравнения $u = u^+ + u^-$; $i = i^+ + i^-$. Если во втором уравнении провести умножение правой и левой части на $Z_{л}$ и полученное равенство напряжений $i Z_{л} = u^+ + u^-$ сложить с первым, то получим уравнение

$$u + i Z_{\text{л}} = 2 u^+, \quad (2.34)$$

которое справедливо для любой точки линии, в том числе и для узловой точки, к которой подключена нагрузка $Z_{\text{н}}$ с напряжением u и током i . Этому (2.34) уравнению соответствует схема замещения Петерсена по рис. 2.12 б, в которой на заданный источник напряжения $u_0 = 2 U^+$ включают последовательно соединенные линейное сопротивление $Z_{\text{л}}$ и нагрузку $Z_{\text{н}}$ и вычисляют u и i в ветви схемы с $Z_{\text{н}}$

как параметры преломленной волны.

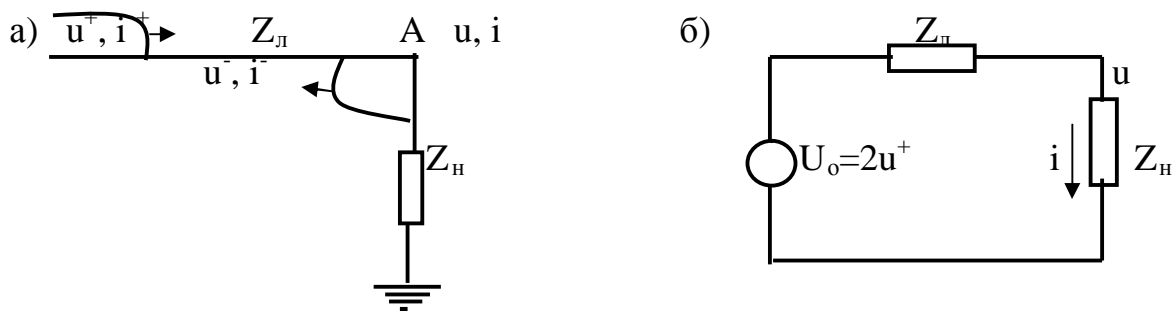


Рис. 2.12. Схема линии с распределенными а) и сосредоточенными б) параметрами

Значение расчетной схемы по рис. 2.12 б состоит в том, что цепь с распределенными параметрами по рис. 2.12 а замещается цепью с сосредоточенными параметрами, для которой известен метод расчета переходных процессов. Например, при расчете схемы операторным методом представляют воздействующую волну U_0 ее изображением, а сопротивление нагрузки $Z_{\text{н}}$ в линейной цепи сопротивлением $Z_{\text{н}}(p)$ в операторной форме или операторными сопротивлениями r , pL , $1/pC$.

Связь набегающей волны U^+ с преломленной U и отраженной U^- волнами можно выразить через коэффициенты преломления α и отражения β :

$$U = \alpha U^+; \quad U^- = \beta U^+, \quad (2.35)$$

где $\alpha = 2 Z_{\text{н}} / (Z_{\text{н}} + Z_{\text{л}})$; $\beta = (Z_{\text{н}} - Z_{\text{л}}) / (Z_{\text{н}} + Z_{\text{л}})$ при условии $\alpha - \beta = 1$.

Если $Z_{\text{н}}$ активное сопротивление, то α и β действительные числа и волна в точке А принимает вещественное расчетное значение.

Если $Z_n = \infty$, т.е. линия на конце разомкнута или работает в режиме холостого хода, то $\alpha = 2$ и $\beta = 1$. Тогда в узловой точке А волна напряжения отражается с сохранением знака, а волна тока - с обратным знаком. В точке возмущения, откуда распространяется падающая волна, результирующая волна напряжения удваивается, а волна тока спадает до нуля.

Если $Z_n = 0$, т.е. линия на конце замкнута или работает на короткое замыкание, то $\alpha = 0$ и $\beta = -1$. Тогда в узловой точке А волна напряжения отражается с обратным знаком, а ток - с сохранением знака. При этом в точке возмущения результирующая волна напряжения спадет до нуля, а волна тока удваивается.

Волновой процесс в обмотке трансформатора

1). Схема замещения обмотки трансформатора. Для анализа волновых процессов в обмотке трансформаторов при воздействии на них волны перенапряжения используют схемы замещения. Обмотка представлена в виде элементов катушки или витка, для которых составляется простейшая схема замещения из последовательно-параллельно соединенных индуктивностей и емкостей. Причем учитываются емкости собственные катушек или витка ΔK и между обмоткой и землей ΔC , где ΔC - суммарная емкость витка (катушки) относительно корпуса трансформатора, между низковольтной обмоткой и его магнитопроводом. Индуктивность ΔL включает как самоиндукцию витка (катушки), так и взаимоиндукцию его с другими элементами обмотки. Постоянные параметры обмотки L_0, C_0, K_0 в схеме замещения по рис. 2.13 отнесены к единичной ее длине:

$$L_0 = \Delta L n, \quad C_0 = \Delta C n, \quad K_0 = \Delta K / n, \quad (2.36)$$

где n - число элементов на единицу длины обмотки.

Вся обмотка имеет параметры:

$$L = L_0 l, \quad C = C_0 l, \quad K = K_0 / l, \quad (2.37)$$

где l - длина обмотки от ввода до нейтрали.

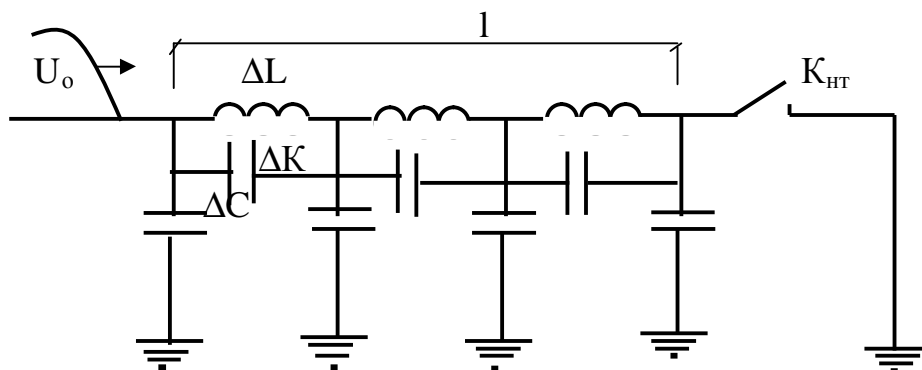


Рис. 2.13. Схема замещения обмотки трансформатора.

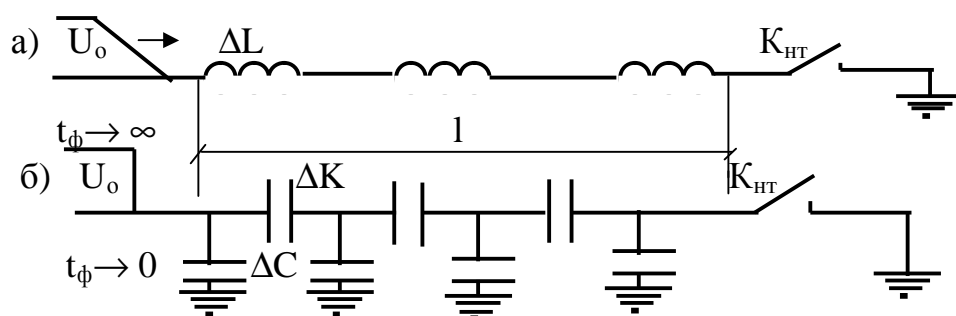


Рис. 2.14. Схемы замещения для переходных процессов в обмотке трансформатора.

При воздействии на обмотку трансформатора электромагнитных волн перенапряжения с длинным фронтом (пологих) или низкой частоты в схему замещения для расчета можно включать только индуктивность, исключив емкости, т.к. емкостные сопротивления в это время велики и распределение напряжения в переходном процессе в основном определяется индуктивными сопротивлениями по рис. 2.14 а.

Если на обмотку трансформатора попадает волна с коротким фронтом (крутая) или высокой частоты, то индуктивные сопротивления велики и напряжения в обмотке трансформатора распределяются по емкостным сопротивлениям по рис. 2.14 б. Такие упрощения не искажают основной картины переходного процесса в расчетах.

2). Расчет распределения напряжения в обмотке трансформатора при набегании крутой (прямоугольной) волны. На расчетной схеме рис. 2.14 б амплитуда падающей прямоугольной волны U_0 . Волна высокой крутизны, проникая в обмотку трансформатора, дает распределение напряжений по емкостным сопротивлениям ΔC и ΔK , по индуктивности ΔL . В результате получают экстремальные расчетные значения напряжений. Определим характер начального распределения напряжения. Емкость относительно корпуса трансформатора на элементе длины обмотки dx будет равна $C_0 dx$, а межвитковая емкость K_0 / dx . На последовательно соединенных сопротивлениях ожидается приращение напряжения dq при общем заряде q :

$$q = (K_0 / dx) dq \quad (2.38)$$

На параллельно соединенных сопротивлениях ожидается приращение заряда dq при общем напряжении U :

$$dq = C_0 dx U. \quad (2.39)$$

Дифференцируя уравнения (2.38) по x и решая совместно с уравнением (2.39), получим неполное дифференциальное уравнение второго порядка

$$(d^2U / dx^2) - (C_0 / K_0) U = 0, \quad (2.40)$$

характеристическое уравнение которого $\alpha^2 = C_0 / K_0$ имеет корни, равные

$$\alpha_{1,2} = \pm \sqrt{C_0 / K_0}. \quad (2.41)$$

Общим решением уравнения (2.40) будет выражение

$$U = A e^{\alpha x} + B e^{-\alpha x}, \quad (2.42)$$

где постоянные A и B находятся из начальных условий: при $X = 0$ (в начале обмотки) $A + B = U_0$; при $X = 1$ (в конце обмотки) $A e^{\alpha x} + B e^{-\alpha x} = U_{нт}$, где $U_{нт}$ – напряжение нейтрали, если нейтраль заземлена, то $U_{нт} = 0$, если изолирована, то $U_{нт} = 0$ или не определена, поскольку αx величина небольшая, то из (2.42) следует, что $A = 0$, а $B = U_0$.

Поэтому кривая первоначального распределения напряжения по об

мотке однофазного трансформатора определяется формулой

$$U_{\text{нач}} = U_0 e^{-\alpha x} = U_0 e^{-\alpha \frac{x}{l}}, \quad (2.43)$$

где $\alpha l = \sqrt{C_0 l n / K_0 / \ln} = \sqrt{C / K} = 5 - 20$ - коэффициент, зависящий только от основных параметров обмотки: чем больше αl , тем круче изменение напряжения вдоль обмотки трансформатора; чем меньше αl , тем более полого распределение первоначального напряжения и ближе его распределение к установившемуся распределению напряжения $U_{\text{уст}}$.

Рассмотрим переходный процесс при заземленной и изолированной нейтрали обмотки однофазного трансформатора по схеме рис. 2.14 б.

При глухо заземленной нейтрали установившееся распределение напряжения $U_{\text{уст}}$ по обмотке имеет вид прямой (рис. 2.15 а), проходящей через точки $U = U_0$ при $x = 0$ и $U = 0$ при $x = l$, а начальное напряжение распределяется в виде экспоненты по (2.43). Начальное ($U_{\text{нач}}$) и установившееся ($U_{\text{уст}}$) распределенные напряжения создают разность напряжения или свободную составляющую напряжения $U_{\text{св}}$, приходящуюся на потери в меди обмотки и вихревые токи в магнитопроводе:

$$U_{\text{св}} = U_{\text{нач}} - U_{\text{уст}}. \quad (2.44)$$

Свободная составляющая напряжения $U_{\text{св}}$ может быть представлена в виде гармонических колебаний (стоячих волн) напряжений высших гармоник вдоль обмотки, каждая из которых колеблется с присущей ей частотой. Амплитуда гармоники тригонометрического ряда для обмотки трансформатора с заземленной нейтралью выразится

$$A_k = (1 / k \pi) U_0 / (1 + (K / C) (k \pi)^2), \quad (2.45)$$

где k - натуральный ряд чисел и номер гармоники.

При заземленной нейтрали потенциалы начала и конца обмотки фиксированы соответственно U_0 и 0 , так что свободная составляющая напряжения $U_{\text{св}}$ имеет в этих точках узлы, поэтому вдоль обмотки укладываются целые числа

полуволин натурального ряда гармоник по рис. 2.15 а.

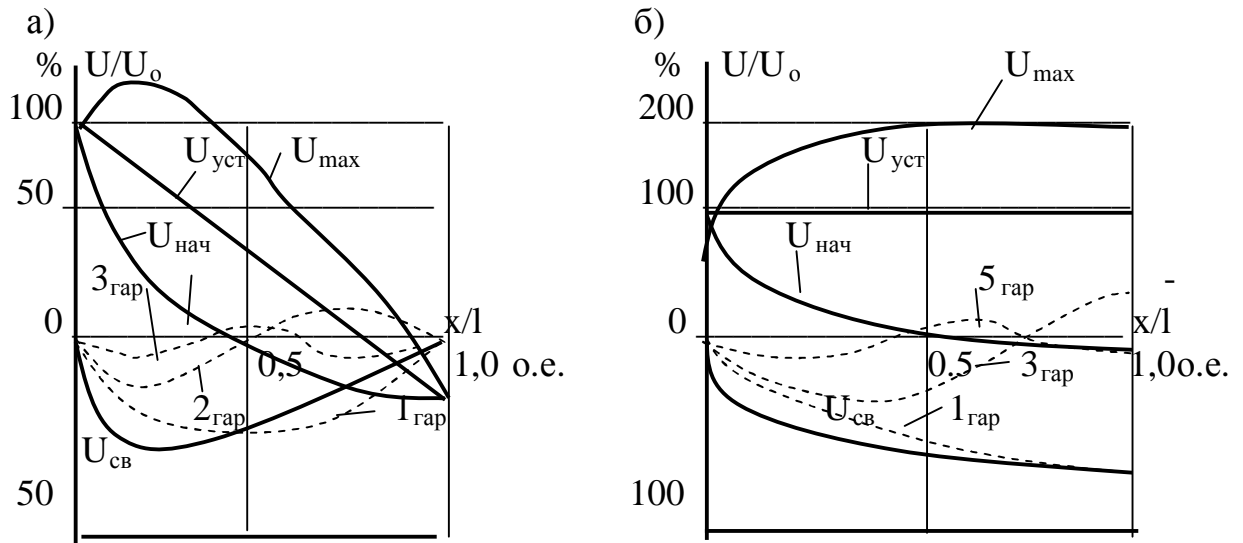


Рис. 2.15. Распределение напряжений в обмотке однофазного трансформатора при глухо заземленной а) и изолированной б) нейтрали

Наложением ординат гармоник или суммой ординат распределенной свободной составляющей напряжения $U_{св}$ и кривой $U_{уст}$ получим максимальное распределение перенапряжений вдоль обмотки однофазного трансформатора

$$U_{max} = |U_{св}| + |U_{уст}|. \quad (2.46)$$

По распределению U_{max} оказывается, что на первые номера катушек обмотки однофазного трансформатора с глухо заземленной нейтралью и при попадании крутой волны на ввод воздействует напряжение U_{max} , равное $1,25 U_0$ амплитуды падающей волны. Следовательно, изоляцию этих номеров катушек надо усиливать, чтобы она выдержала неравномерность распределенного U_{max} .

При изолированной нейтрали по рис. 2.15 б установившееся напряжение $U_{уст}$ вдоль обмотки равно приложенному напряжению крутой волны U_0 и кривая установившегося напряжения изобразится прямой линией, параллельно оси абсцисс. Разность между начальным и $U_{уст}$ распределенным напряже-

нием вдоль обмотки дает кривую свободной составляющей напряжения $U_{св}$, которая может быть разложена на

гармоники высшего порядка с расчетной амплитудой

$$A_k = 4 / ((2k - 1) \pi) (U_0 / (1 + (K / C) ((2k - 1) \pi / 2)^2)), \quad (2.47)$$

где k - натуральный ряд чисел; а $(2k - 1)$ - номер гармоники.

При изолированной нейтрали по рис. 2.15 б фиксированный потенциал, т.е. узел свободной составляющей, находится лишь в начале обмотки, а на ее конце расположена пучность, поэтому вдоль обмотки с изолированной нейтралью укладывается нечетное число четвертей волн или нечетные гармоники распределенного свободного напряжения. Кривая огибающая максимальные напряжения с подъемом напряжения в конце обмотки, принимает форму падающей волны, поэтому при конструировании изоляции обмоток однофазных трансформаторов с изолированной нейтралью необходимо усилить изоляцию в конце обмотки.

3). Распределение напряжения в трехфазных трансформаторах.

Экстремальные значения распределенных напряжений отмечаются в случае симметричного набегания волн перенапряжений с одинаковой амплитудой по всем трем фазам трехфазного трансформатора, обмотки которого соединены звездой. Переходный процесс в каждой фазе может рассматриваться изолированно от других фаз по рис. 2.16 а, а линейные концы двух других фаз справедливо заземлить, т.к. они подключены к малым волновым сопротивлениям обходящих линий и сохраняет практически нулевой потенциал. Попадание волны на одну фазу трансформатора с обмоткой, соединенной в звезду с изолированной нейтралью, оказывает распределение напряжений в переходном режиме по рис. 2.16 б аналогично тому, которое было в обмотке однофазного трансформатора с глухо заземленной нейтралью по рис. 2.16 а с характерными выводами относительно выполнения изоляции первых номе-

ров катушки каждой фазы с учетом воздействия $(2/3) U_0$ напряжения падающей волны на изоляции нейтрали катушки трансформатора. Если волна падает по трем фазам обмотки трансформатора, соединенной в треугольник, то распределение напряжения в одной фазе можно получить методом наложения распределенного напряжения от попадания волны на фазу со стороны линии А, а затем со стороны линии В по рис. 2.17.

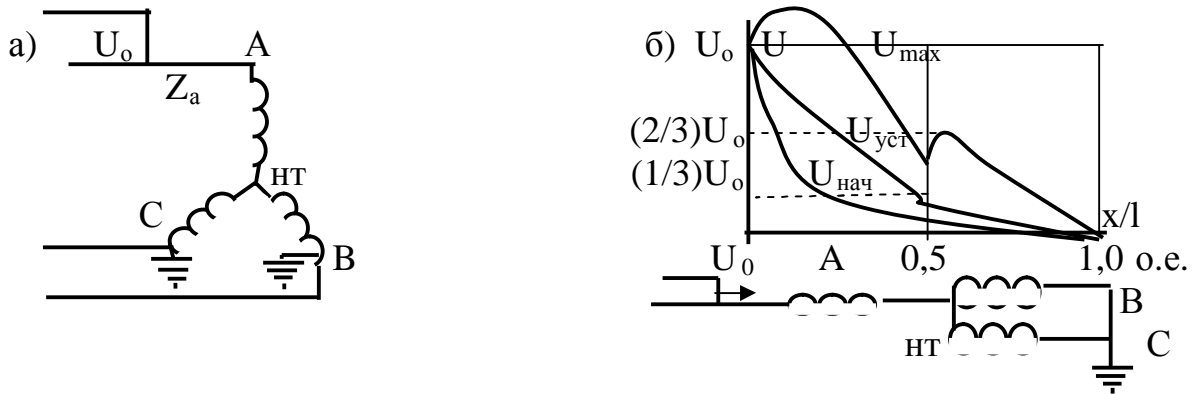


Рис. 2.16. Расчет переходных процессов в обмотке трехфазного трансформатора, соединенной в звезду

а) - исходная схема; б) - распределение напряжений вдоль обмотки и схема замещения.

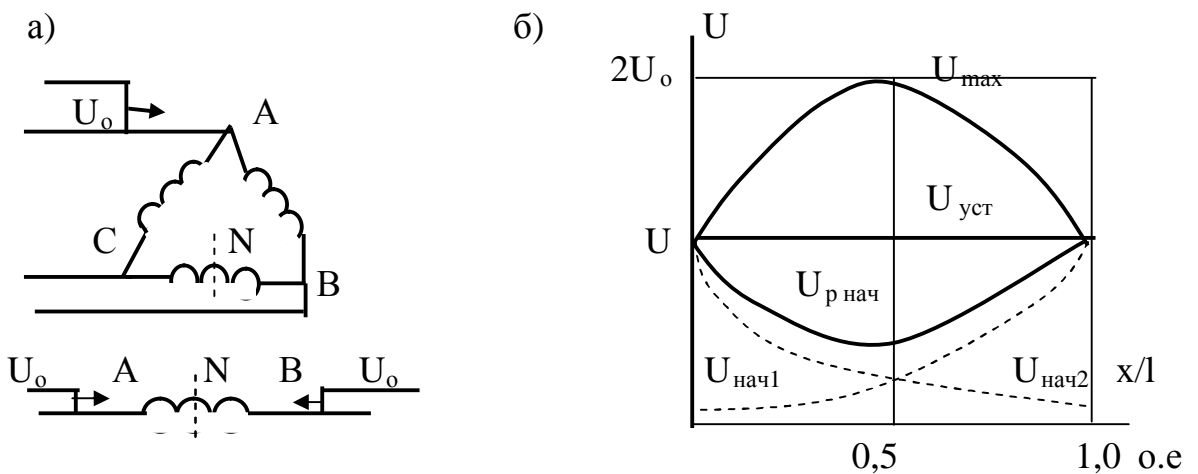


Рис. 2.17. Расчет переходных процессов в обмотке трехфазного трансформатора, соединенной в схему треугольник.

а) - исходная и расчетная схемы; б) - распределение напряжений вдоль обмотки.

В переходном режиме здесь максимальное напряжение возникает в се

редине обмотки каждой фазы до величины $2U_0$ амплитуды падающей волны, что учитывается при проектировании изоляции обмоток трансформатора.

4). Переходные процессы в обмотках автотрансформаторов. Когда волна перенапряжений попадает на ввод А по рис. 2.18 а обмотки высокого напряжения ВН при разомкнутом выводе В обмотки среднего напряжения СН, то колебания развиваются также, как в однофазном трансформаторе с заземленной нейтралью по рис. 2.15 а. Когда волна набегаёт на ввод В обмотки среднего напряжения при разомкнутом выводе А обмотки ВН, то распределения напряжений $U_{нач2}$ и $U_{уст2}$ вдоль обмотки СН аналогичны распределению однофазного трансформатора с заземленной нейтралью, а в разомкнутой обмотке ВН приложенное напряжение будет стремиться создать одинаковое напряжение U_0 , которое отмечалось в однофазном трансформаторе с изолированной нейтралью. Поскольку обмотки ВН и СН индуктивно связаны друг с другом, то в обмотке ВН наводится напряжение до $K_T U_0$, где K_T - коэффициент трансформации. В результате колебательных процессов напряжение на вводе В теоретически может достигнуть значения $2U_0$ и выше, практически измерено до $3U_0$, что вызвано затуханием свободных колебаний. Защита от столь высоких перенапряжений осуществляется с помощью разрядников, приключенных к обмоткам автотрансформатора со стороны ВН, СН и НН (низкого напряжения).

Внутренняя защита трансформаторов.

Конструкция обмоток трансформатора и специальные устройства могут существенно снизить распределенное максимальное перенапряжение, воздействующее на продольную и главную изоляцию обмоток. Для зависимости (2.43) значение емкостного градиента напряжения

$$E_c = \alpha U_0 e^{-\alpha x} dx. \quad (2.47)$$

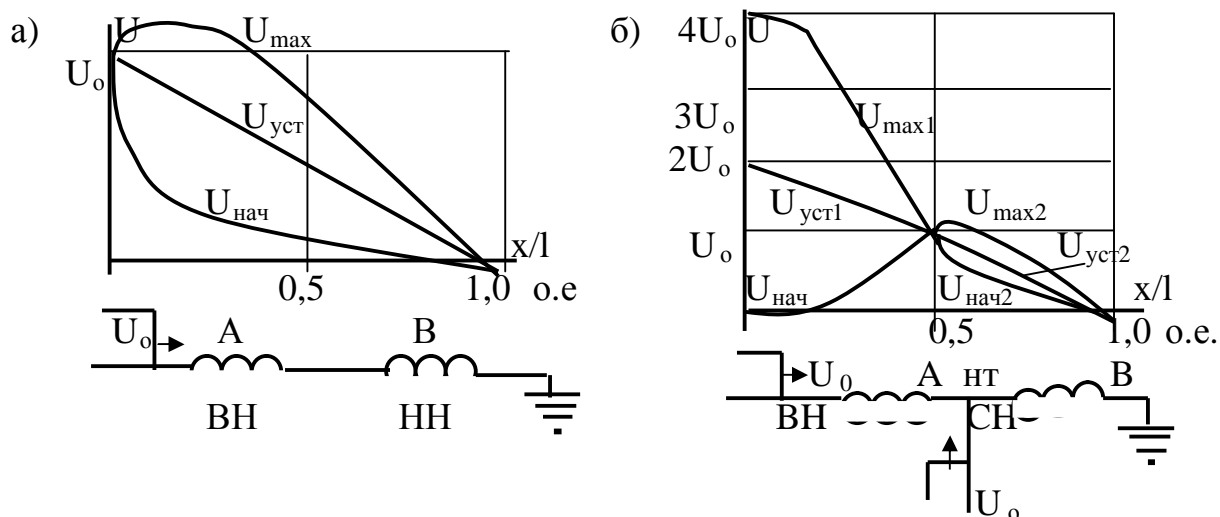


Рис. 2.18. Расчет переходных процессов в обмотке автотрансформатора
 а) - при попадании волны на ввод обмотки высокого напряжения;
 б) - то же на ввод обмотки среднего напряжения.

Причем в точке $x = 0$ градиент имеет максимальное значение и по абсолютной величине равен

$$E_{c0} = \alpha U_0 dx = \alpha l (U_0 / l) dx, \quad (2.48)$$

где U_0 / l - градиент при спаде потенциала от ввода обмотки до нейтрали.

Емкостный градиент, имеющий максимальное значение, пропорционален коэффициенту αl , который по выражению (2.41) оказывается в зависимости от основных параметров обмотки трансформатора, где число элементов в обмотке $n = 1$:

$$\alpha l = \sqrt{C_0 l / K_0 / l} = \sqrt{C / K} = 5 - 20. \quad (2.49)$$

Максимальное напряжение, воздействующие на продольную изоляцию трансформатора, может быть снижено путем выравнивания кривой первоначального распределения напряжения. Перенапряжение, воздействующие на главную изоляцию, связано с колебанием свободной составляющей напряжения. Снижение ее возможно путем уменьшения амплитуды свободной составляющей. Согласно выражению (2.44)

принужденная составляющая $U_{уст}$ имеет неизменную форму. Поэтому вы

равнивая кривую первоначального распределения $U_{\text{нач}}$, т.е. приближая $U_{\text{нач}}$ к $U_{\text{уст}}$, можно снизить или исключить $U_{\text{св}}$. Такое возможно, если в выражении (2.49) $C \rightarrow 0$, а $K \rightarrow \infty$

Мероприятия для внутренней защиты трансформаторов:

а) **экранирующие кольца.** Максимальные градиенты напряжения, которые падают на первые номера катушек обмотки, изоляцию их витков и межкатушечную изоляцию усиливают, т.е. увеличивают расстояние между катушками, что ведет к уменьшению емкости K_0 в начале обмотки. Устройство емкостного или экранирующего кольца, присоединенное к началу обмотки по рис. 2.19 а выполняет ту же функцию, что и усиление изоляции первых номеров катушек. Электрическое поле на первых номерах катушек при таком исполнении выравнивается и снижается градиент напряжения. Изоляция кольца должна выдержать величину падающего перенапряжения на ввод обмотки трансформатора, а изоляция по номерам всех катушек выполняется на одном уровне;

б) **компенсационные экраны.** Компенсация токов, стекающим по емкостям C_0 главной изоляции, приводит к выравниванию кривой $U_{\text{нач}}$. Это осуществляется с помощью специального металлического экрана (щита), окружающего обмотку ВН, и присоединения его к линейному вводу трансформатора по рис. 2.19 б. Такой ток, подтекающий по частичным емкостям C_k , компенсирует ток, стекающий по емкостям C_0 .

Поэтому ток в емкостях K_0 постоянен, а кривая $U_{\text{нач}}$ оказывается распределенной по обмотке в виде прямой зависимости

$$U_{\text{нач}} = U_0 (1 - x / l) \quad (2.50)$$

и в трансформаторе с заземленной нейтралью совпадают распределенные напряжения $U_{\text{нач}}$ и $U_{\text{уст}}$ и в обмотке колебания $U_{\text{св}}$ не возникают.

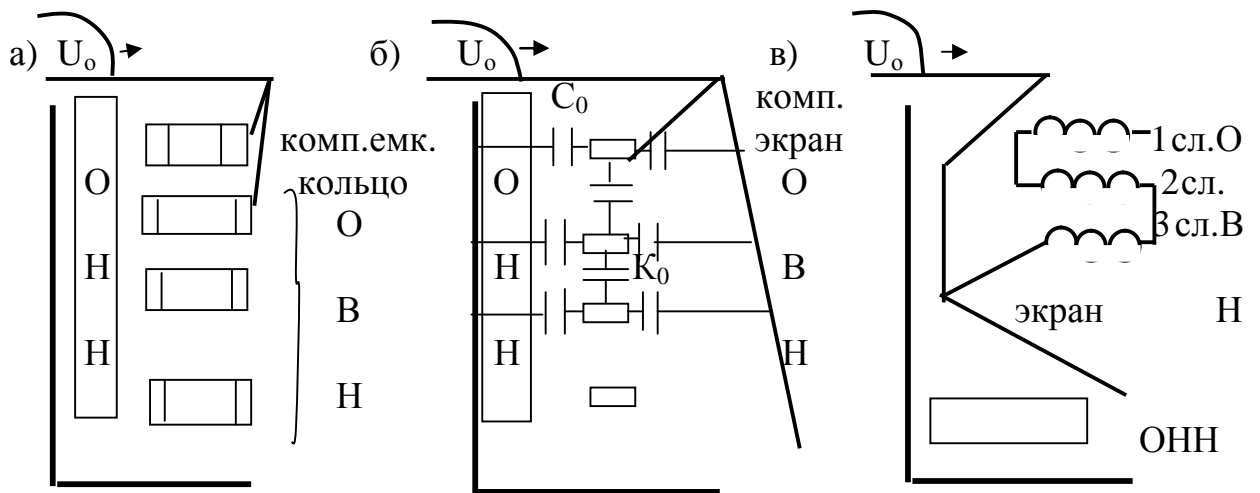


Рис. 2.19. Устройство емкостного кольца а), компенсационного экрана б) и слоевых обмоток в) в трансформаторах высокого напряжения

Наклон экрана в обмотке ВН должен соответствовать выражению

$$C_k = C_o (1 - x) / x \quad (2.51)$$

и будет равномерное распределение максимального напряжения по обмотке ВН.

Емкостная компенсация в обмотках трансформаторов на 110-220 кВ снижает E_c почти вдвое;

в) петлевые обмотки. Их применение приводит к резкому увеличению продольных емкостей K_0 . Это соединение обмоток удаляет первые по порядковому номеру витки и приближает к вводу обмотки периферийные витки, тем самым с увеличением емкости K_0 весьма равномерно распределяется напряжение $U_{нач}$, а следовательно, будет отсутствовать $U_{св}$. Петлевые обмотки получили в настоящее время распространение в трансформаторах высшего класса напряжения;

г) слоевые обмотки. Особенностью их является большая емкость K_0 между слоями обмоток и малая емкость слоев изоляции на землю C_0 , за исключением первого и последнего слоев. Такие обмотки укладываются в отечественных трансформаторах до 35 кВ включительно с изолированной ней

тралью. Эти обмотки имеют экран и приведены на рис. 2.19 в.

Распределение максимального напряжения U_{\max} в таких обмотках значительно отличается от первоначального распределения $U_{\text{нач}}$. Использование таких обмоток в силовых трансформаторах с заземленной нейтралью существенно экономит изоляцию, т. к. главная изоляция слоя включает в себя изоляцию всех слоев обмотки, а испытательные трансформаторы высокого напряжения выполняются исключительно со слоевыми обмотками.

Распространение волн в обмотках вращающихся машин

Максимальное распределенное напряжение в обмотке электрических машин возникает вследствие попадания электромагнитных волн при грозовой деятельности или коммутационных импульсов во время дугового замыкания на землю или несинхронного включения или отключения генератора в сети.

Вращающиеся машины включаются на воздушную сеть не только через трансформатор, но и непосредственно, т.е. без трансформатора связи. В обоих случаях опасным для изоляции обмотки машины и главной, и межвитковой является появление волны перенапряжения на вводе большой амплитуды с крутым фронтом. Максимальные напряжения возникают в обмотке машины, работающей с изолированной нейтралью. В этом случае образуются отраженные волны, которые накладываются на напряжение падающей волны и поднимают его почти во всех точках обмотки. Волновые процессы в обмотках машин могут быть уподоблены волновым процессам в проводе линии электропередачи с некоторым волновым сопротивлением, т.к. межвитковая емкость в обмотке машин мала и уменьшается со снижением числа витков в катушке. Величины волновых сопротивлений в обмотке машин колеблются в широких пределах (от 200 до 1000 Ом). Индуктивность обмотки пропорциональна квадрату числа витков, а волновое сопротивление - первой степени числа витков, причем волновое сопротивление зависит от номиналь

ного напряжения машины и ее мощности. В машинах более высоких напряжений толщина слоя изоляции больше, что ведет к уменьшению емкости машины и, следовательно, к увеличению волнового сопротивления. Увеличение мощности машины влечет за собой увеличение размеров проводников обмотки, что требует больших размеров паза. В этом случае возрастает емкость, снижается индуктивность обмотки и, следовательно, снижается волновое сопротивление.

Скорость распространения электромагнитной волны в обмотках машин неравномерна. Значительно меньшую скорость волна имеет в пазовой части обмотки (большая индуктивность) и большую - в лобовой части. Средняя скорость распространения волны в обмотке машины равна около $1/5$ скорости света в воздухе, причем в начале обмотки она выше среднего значения и в пазу доходит до $1/2$ скорости света.

При изолированной нейтрали максимальное распределенное напряжение на обмотке машины достигает 170 % напряжения падающей волны.

При заземленной нейтрали U_{\max} во всех точках обмотки не превышает амплитуды падающей волны, а включение в нейтраль сопротивления до 200 Ом снижает на обмотке максимальное распределенное напряжение до 80 % амплитуды падающей волны.

2.4. Грозозащита линий, распределительных устройств и электрических машин

Общие принципы грозозащиты ЛЭП

Поражение молнией проводов сети - это возникновение перенапряжения от прямого удара молнии (ПУМ). Если такое перенапряжение зафиксировано вблизи провода, то оно называется индуктированным. От ПУМ в трос, опору или провод на ЛЭП возможны перекрытия изоляции любого класса напряже-

ния. Следовательно, интенсивность грозовой деятельности в районе, где проходит трасса линий, окажет основное влияние на выбор против грозовой защиты. Опыт эксплуатации ЛЭП в заданном районе - лучший показатель необходимости против грозовой защиты. На линиях с металлическими (железобетонными) опорами принимается чаще всего тросовая защита. На линиях с деревянными опорами тросовая защита выполняется только на участке линии от распределительного устройства на протяжении 0,3-3 км. Этот участок линии с тросом называется подходом. В сетях с изолированной нейтралью или заземленной через дугогасящую катушку и небольшие точки замыкания. однофазные импульсные перекрытия не приводят к возникновению устойчивой дуги, поэтому на ЛЭП 35 кВ и ниже отказываются от тросовой защиты, оставляя ее только на подходах. При этом полагают, что грозовой разряд вызывает однофазное перекрытие изоляции на опоре. Однако если снизить сопротивление заземлителя опор, можно предотвратить обратное перекрытие с опоры на соседние фазы и, тем самым, исключить двухфазное (трехфазное) короткое замыкание на землю. Дугогасящая катушка успешно гасит однофазное перекрытие. Эффективным средством против грозовой защиты служит автомат повторного включения АПВ, которыми оборудуются все линии напряжением 35 кВ и выше. Причем в сетях с заземленной нейтралью и большими токами замыкания на землю на линиях устанавливаются ОАПВ, а в сетях с изолированной нейтралью - АПВ двукратного действия. ОАПВ используются из-за больших динамических усилий, возникающих в обмотках трансформаторов при коротких замыканиях, от чего нарушается прочность бандажных устройств обмоток трансформаторов, а сочетание АПВ с другими мерами против грозовой защиты удерживает число автоматических выключений ЛЭП на минимальном уровне.

Грозозащита ЛЭП 110 кВ и выше

ЛЭП 110 кВ и выше выполняются на металлических и железобетонных опорах и работают в системах с глухо заземленной нейтралью. Их изоляция по экономическим соображениям имеет низкий уровень грозовой упорности (порядка 20 - 40 кА). Поэтому в грозовых районах страны такие ЛЭП оснащаются тросом по всей длине. Одноцепные и двухцепные ЛЭП на башенных опорах более экономичны, чем линии на П-образных опорах. Однако первые ЛЭП обладают меньшим защитным уровнем, т.к. имеют большую высоту и больший защитный угол $\alpha = 28 - 30^\circ$, поэтому возрастает вероятность прорыва молнии сквозь тросовую защиту по сравнению с ЛЭП на П-образных опорах, где уложены два троса и меньший угол защиты $\alpha = 25 - 20^\circ$. В тоже время на первых ЛЭП увеличивается индуктивность троса в пролете и уменьшается коэффициент связи между тросом и проводом, поэтому можно ожидать высокую вероятность обратного перекрытия с опоры на провод при ПУМ в трос или вблизи опоры. Правила устройства электроустановок ПУЭ нормирует сопротивление заземлителя опор R_3 в зависимости от удельного сопротивления грунта. Под тросами на заземлителе опор рекомендуется $R_3 < 10 \text{ Ом}$.

На линиях с грозовой деятельностью менее 20 ч. или гололедных районах трос укладывается только на подходах $L_{\text{п}}$ ЛЭП к распределительным устройствам и выполняется грозозащита трубчатыми разрядниками изоляции конечных опор от волн перенапряжений, набегающих с линии без троса. Схемы грозозащиты приведены на рис. 2.21.

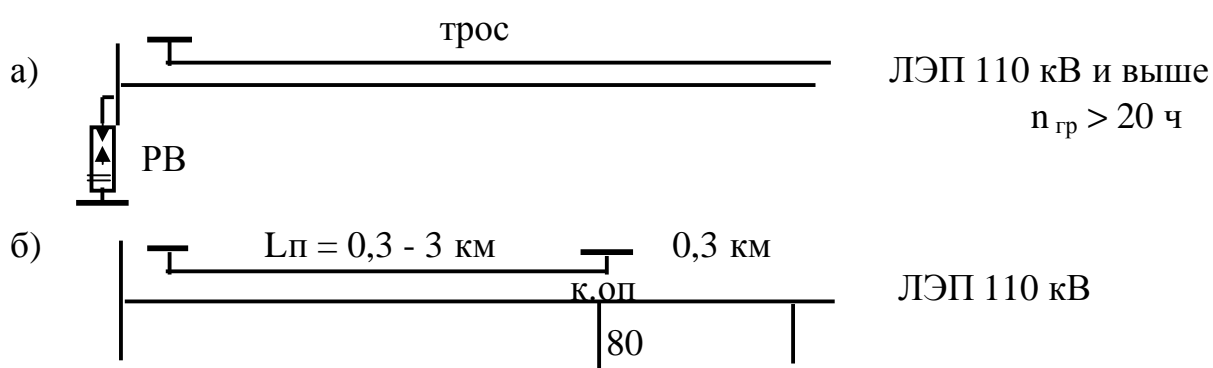




Рис. 2.20. Схема грозозащиты ЛЭП 110 кВ и выше
а) - с тросом по всей длине; б - с тросом на подходе

Грозозащита ЛЭП 35 - 220 кВ на деревянных опорах

Обычно ЛЭП 35 - 220 кВ на П-образных деревянных опорах по рис. 2.21 выполняется в труднодоступной для доставки металлических опор местности, а изготовление деревянных опор обходится дешевле. Изоляция на таких опорах между фазами по дереву составляет 3 м на опорах 35 кВ, 4 м - на 110 кВ, 5,25 м - на 220 кВ. Высокая грозоупорность таких ЛЭП до 60 кА разрешает укладывать трос только на подходах к распреустройствам, исключение составляют линии 220 кВ, обеспечивающие питание потребителей первой категории, где он проходит по всей линии. Аналогично трос укладывается на ЛЭП 110 и 220 кВ в районах с большой грозовой деятельностью и питающих ответственные потребители. Места линий с ослабленной изоляцией (отдельные металлические опоры (от.оп.), анкерные, опоры перехода или пересечения, концевые опоры участков с тросом) защищаются трубчатым разрядником.

Грозозащита ЛЭП 35 кВ на металлических и железобетонных опорах

На ЛЭП 35 кВ уровень грозоупорной изоляции высок, до 40 кА, т.к. они работают в системах с изолированной нейтралью, где токи короткого замыкания невысоки. Поэтому трос укладывается только на подходе к распреустройству. На линии без троса ПУМ обычно поражает верхние провода, которые экранируют нижние, и по этой причине происходит перекрытие фазы на землю

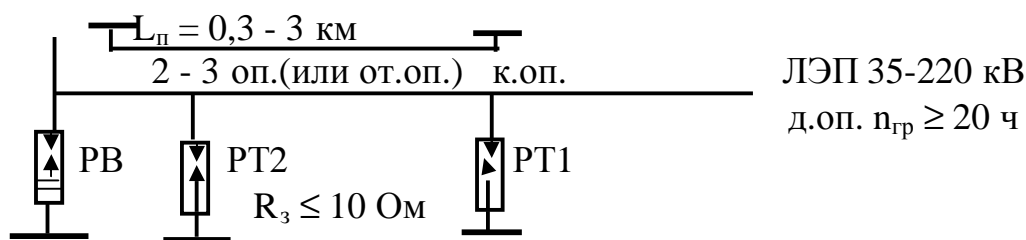


Рис. 2.21. Схема грозозащиты ЛЭП 35 - 220 кВ на деревянных опорах. В сетях 35 кВ с изолированной нейтралью дуга замыкания на землю обычно гаснет в течении нескольких периодов, поэтому поражение ПУМ провода и перекрытие фазной изоляции на опоре не влечет за собой отключение линии, кроме тех случаев, когда длительное горение дуги приводит к возникновению междуфазных коротких замыканий (явление набросов).

Грозоупорность ЛЭП 35 кВ не превышает 40 кА при $R_з < 10$ Ом заземлителя опор согласно ПЭУ. Более высокий уровень изоляции достигается путем снижения импульсных сопротивлений заземления опор до 4 - 5 Ом.

Число лет безаварийной работы изоляции подстанции

$$M = 100 / ((L_п \sum_1^s n_{пр}) n_{гр}), \quad (2.52)$$

где $M = 100 - 1000$ лет на одно перекрытие, если к распрестройству подключено S линий с удельным числом перекрытий $n_{пр}$ на 100 км длины линии и грозových дней в году $n_{гр}$ в районе. Причем, $M = 100$ характерно для подхода, работающего на потребитель неответственной нагрузки, например, до 35 кВ включительно, а $M = 1000$ - для подхода, работающего в больших энергосистемах, например, 110 - 220 кВ, где стремятся к высокому уровню грозоупорности путем снижения импульсного сопротивления заземления опор, длина опасной зоны $L_п$ подхода не превышает 1 - 3 км.

На схеме грозозащиты по рис. 2.21 РТ1 ограничивает амплитуду и крутизну набегающей волны перенапряжения и тем самым защищает изоляцию концевой опоры. После среза волны перенапряжения она вновь возрастает за счет

падения напряжения от импульсного тока на сопротивлении заземлителя и индуктивности спуска РТ1.

Снизить этот всплеск напряжения можно за счет уменьшения R_3 или выполнения его строго по ПУЭ $R_3 < 10$ Ом. Если невозможно выполнить заземлитель РТ1 по ПУЭ, то устанавливают на 2-3 опоре линии от входного портала распреустройства второй комплект разрядника РТ2, который сработает надежно под действием высокого напряжения на заземлении РТ1. Ток в заземлителе РТ2 ограничивается индуктивностью участка линии между РТ2 и РТ1. Таким образом, амплитуда набегающей волны с линии без троса не возрастает на изоляции распреустройства при увеличении R_3 РТ1. Установка РТ2 на первой и даже второй опоре может не сработать из-за подпора напряжения.

Грозозащита ЛЭП 3-10 кВ

Эти линии, как правило, выполняются на деревянных или железобетонных опорах и работают в системах с компенсированной или изолированной нейтралью. Малые токи замыкания на землю в этих системах и высокий уровень грозоупорности изоляции до 20 кА позволяют полностью исключить использование троса на линии. Повышение уровня грозоупорности возможно путем применения деревянных траверс. Ослабленная изоляция отдельных участков линии (отдельно стоящие металлические опоры, опоры пересечений, переходов, анкерные) для защиты от ПУМ нуждается в установке стержневых молниеотводов на опорах и предполагает ограничение волн перенапряжений, набегающих по линии, трубчатыми разрядниками. Последние используют для защиты кабельных муфт при переходе воздушной линии в кабельную.

Заземление грозозащитных тросов через искровые промежутки

На линиях 110 кВ и выше, проходящих в труднодоступных районах, грозозащитные троса подвешивают на линейный изолятор, который шунтируют

искровым промежутком ИП. Такая конструкция крепления троса, изолированного через ИП с опорой, выполнена для того, чтобы трос помимо основного назначения можно было бы использовать для электроснабжения монтерских пунктов (емкостный отбор), для питания электроэнергией выездных ремонтных бригад, плавки гололеда на тросе, питания релейной защиты и связи. На ЛЭП, где тросы изолируются только для снижения потерь, участки тросов заземляются только с одного конца. При таком заземлении составляющая напряжения промышленной частоты создает емкостный ток, протекающий вслед за импульсным пробоем ИП и снижается до нуля, а индуцируемая в это время магнитная составляющая на изолированном конце троса, хотя и повышается в двое, но в рабочем симметричном режиме не превышает нескольких киловольт. Такое низкое напряжение поддерживает неустойчивую дугу на ИП и она легко гаснет.

В неполнофазном режиме напряжение на тросе повысится за счет несимметрии рабочих напряжений и токов в фазах и может длительно поддерживать дугу в ИП. В таком случае глухое заземление тросов, осуществляемое через индуктивное сопротивление, поддерживает напряжение на тросах на заданном уровне на период работы линии в неполнофазном режиме.

Общие принципы грозозащиты подстанций

Уровень изоляции оборудования подстанций и распределительных устройств по экономическим соображениям ниже уровня изоляции линий. На изоляцию оборудования может воздействовать или полная импульсная волна при ПУМ в провод ЛЭП, или срезанная волна после перекрытия изоляции линии, или крутая волна при ПУМ в опору (трос) с последующим перекрытием линейной изоляции, или индуцированные импульсы напряжения при ударе молнии вблизи провода линии. Все волны перенапряжения грозового характера

будут опасны не только высокой амплитудой, но и различной формой, фронтом и длительностью.

Распространяющаяся по линии импульсная волна напряжения деформируется и затухает из-за образующейся импульсной короны и сопротивления земли. На образование чехла короны затрачивается энергия, появление электродинамической емкости сглаживает фронт, а короткий или срезанный импульс в это время снижает амплитуду волны. Снижение амплитуды и удлинение фронта полной волны перенапряжения за счет активных потерь можно оценить по зависимостям

$$U_0 = U_{\max} \exp(-\alpha \sqrt{x}); \quad \Delta\tau_{\text{ф}} = (0,5 + (0,008 U_{\max}) / h) (1 / K), \quad (2.53)$$

где U_{\max} - амплитуда импульса напряжения в месте удара молнии, кВ;

x - удаление расчетной точки от места ПУМ, км; α - коэффициент, равный $0,07^{0,5}$ км для ЛЭП 110 кВ и выше; h - средняя высота подвеса проводов, м; K - коэффициент, равный 1,0; 1,1; 1,45; 1,55 при числе проводов в фазе соответственно 1, 2, 3, 4 и более.

Ограничение волн перенапряжения, поступающих на изоляцию оборудования, осуществляется вентильными разрядниками, мало ответственную или высокого уровня грозоупорности изоляцию можно защитить трубчатыми разрядниками. Место установки этих устройств выбирается с учетом возможных сочетаний форм и амплитуд импульсов перенапряжений. Кроме ограничения набегающих волн перенапряжений на электрооборудовании со стороны ЛЭП устраивается грозозащита изоляции открытых распределительных устройств станций и подстанций от ПУМ.

Грозозащита подстанций от набегающих волн (перенапряжений)

При ПУМ в провод линии без троса, при обратных перекрытиях с троса или опоры на провод прорыва молнии мимо троса на провод ЛЭП с тросом возникает электромагнитная падающая волна, набегающая на электрооборудо-

вание распределительных устройств или подстанцию. Максимальная амплитуда этой волны перенапряжения оценивается величиной перекрытия линейной изоляции опор. В то же время заземление опор может снизить амплитуду волны. Набегающие волны ограничиваются вентильными разрядниками, у которых пологие вольт-секундные характеристики скоординированы с прочностью защищаемой изоляции. РВ ограничивают токи на уровне 5 - 14 кА и уменьшают крутизну волны. Если волна приходит к РВ, преодолев значительное расстояние, то ток проходящий через разрядник определяется как

$$i_p = (2U^+ + U_p) / Z \quad (2.54)$$

или с некоторым приближением и запасом $i_p = 2 U^+ / Z$. Для ЛЭП 110 кВ на металлических опорах, когда $U^+ = U_{50\%} = 700$ кВ, $I_p = (2 \cdot 700) / 400 = 3,5$ кА, что допустимо. Если волна перенапряжения образовалась в непосредственной близости от РВ, например, когда ПУМ произошел у ближайшей опоры с последующим перекрытием на сопротивление заземления пораженной опоры R_3 , то на РВ быстро установится напряжение U_p , тогда ток через разрядник равен

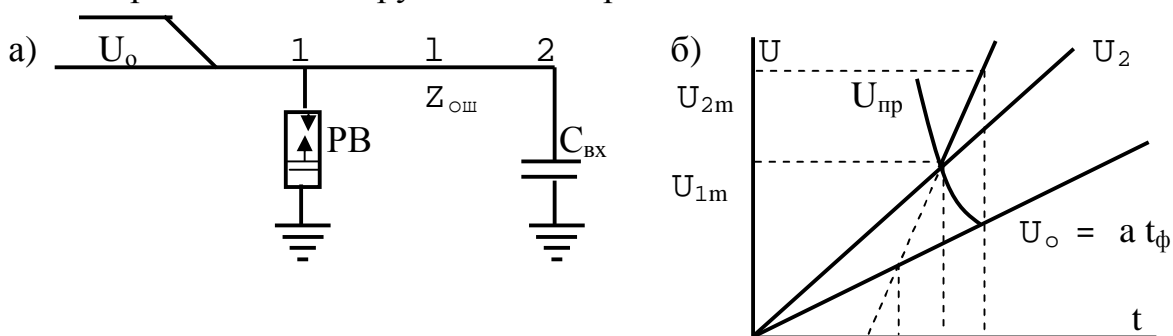
$$i_p = i_m - U_p / R_3 \quad (2.55)$$

При больших токах остающееся напряжение на РВС-110 $U_{ост} = 400$ кВ, если $R_3 = 10$ Ом. Максимальное значение тока молнии $I_{max} = 100$ кА, тогда ток через разрядник пройдет недопустимо большой, равный по (2.55) $I_p = 100 - (400 / 10) = 60$ кА. Поэтому близкие к РВ ПУМ в шины РУ особенно опасны и при больших номинальных напряжениях. При удалении ПУМ от шин РУ подстанций на 1 - 3 км максимум тока через разрядник достигается после многократных отражений от узловых - это в пределах точек: место возмущения и место присоединения разрядника за время, соизмеримое с длительностью волны, к моменту максимума тока мгновенное значение тока молнии падает. Ток через разрядник уменьшается с увеличением расстояния между ПУМ и шиной РУ подстанции. Таким образом, чтобы ограничить ток через

РВ или обеспечить успешную работу его, необходимо исключить ПУМ в провод ЛЭП вблизи оборудования РУ подстанции или уменьшают вероятность таких ударов. С этой целью участок линии длиной 1 - 3 км, примыкающий к РУ подстанции (подход), защищают тросовым молниеотводом. При грозозащите ЛЭП тросом по всей длине особенно тщательно следят за тем, чтобы сопротивление заземления опор было низким, а угол защиты небольшим. Защищенный проход ограничивает попадание на подстанцию волн с большой крутизной. РВ устанавливается в основном на шинах, у трансформаторов и в узловых точках ошиновки. Часть аппаратов и оборудование, удаленные на некоторое расстояние от разрядника по ошиновке, должны иметь расчетную зону защиты с учетом крутизны волны и длины ошиновки от защищаемого объекта до РВ.

Принцип выбора места установки разрядника для защиты изоляции оборудования

Защитная функция разрядника по рис. 2.22 а рассматривается, когда он находится на некотором расстоянии от изоляции оборудования по ошиновке, у которой волновое сопротивление $Z_{\text{ош}}$. Так как грозовые импульсы имеют крутой фронт и малую длительность, то для анализа перенапряжений в расчетную схему по рис. 2.22 а вводится изоляция оборудования входной емкостью $C_{\text{вх}}$. Изменение напряжения на емкости и срабатывание РВ от падающей электромагнитной волны перенапряжения позволяют оценить превышение напряжения на оборудовании по рис. 2.22 б



$$1/\vartheta \quad 2l/\vartheta \quad t_p \quad t_p + l/\vartheta$$

Рис. 2.22. Расчетная схема а) и оценка максимального напряжения на оборудовании, удаленном от вентильного разрядника б)

При расчетах набегающую волну представляют с косоугольным фронтом t_ϕ и крутизной $a = U_0/t_\phi$. С целью упрощения анализа и получения экстремального значения перенапряжения принимают $C_{вх} = 0$, тогда через время, равное $\tau = l/\vartheta$, в точку 2 придет волна U_0 и отразится от нее с тем же знаком, что и у падающей волны U_0 . В точке 1 отраженная волна через время τ наложится на падающий импульс. Под действием суммарного напряжения в момент t_p , в соответствии с ВСХ $U_{пр}$, произойдет пробой искровых промежутков РВ и напряжение в точке 1 снизится. Поэтому до пробоя на РВ напряжение на нем выразится как

$$U_{1m} = a t_p + a (t_p - (2 l / \vartheta)), \quad (2.56)$$

а напряжение в точке 2 повышается в течении времени τ и достигнет

$$U_{2m} = 2 a t_p. \quad (2.57)$$

Лишь только после этого напряжение в точке 2 начнет снижаться, т.к. в это время подключаются нелинейное сопротивление РВ и расчетные сопротивления ошиновки с соответствующими коэффициентами преломления и отражения в точке 1. Разница напряжений на защищаемом объекте и разряднике составит

$$\Delta U = U_{2m} - U_{1m} = 2 a l / \vartheta = 2 a \tau. \quad (2.58)$$

Таким образом, на защищаемом оборудовании максимальное напряжение U_{2m} тем больше, чем дальше удалено оборудование от разрядника и выше крутизна фронта падающей волны. ΔU называют интервалом координации изоляции и снижают его за счет приближения места установки РВ к защищаемому объекту и снижения крутизны набегающего импульса. Причем при заданном расстоянии l между РВ и изоляцией необходимо ограничение дли-

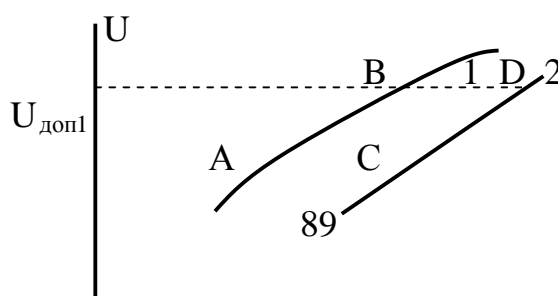
ны фронта импульса t_f или ограничение крутизны волны a и, наоборот, при заданной крутизне a необходимо ограничение расстояния l , когда U_{1m} и U_{2m} не выходят за пределы кривой выдерживаемого напряжения (электрическая прочность) изоляции или вольт - амперной ее характеристики. Таким образом, РВ имеет определенную зону защиты, зависящую от характеристик РВ и изоляции и параметров набегающей волны перенапряжения.

Оценка длины защищенного подхода к подстанции

Длину защищенного подхода к РУ подстанций нужно оценить, исходя из допустимой (критической) крутизны набегающей волны перенапряжения, полученной на анализаторе молниезащиты. На анализаторе экспериментально снимают значения максимального перенапряжения в различных точках РУ подстанции в зависимости от крутизны набегающего импульса: на ошиновке трансформатора и на максимально удаленном от разрядника разъединителе. За расчетный импульс берется косоугольная волна напряжения с амплитудой, равной 50 % импульсного разрядного напряжения линейной изоляции. Зависимости таких напряжений приведены на рис. 2.26.

Абсциссы точек А и В дают значения критической крутизны $a_{кр}$, превышение которой представляет опасность для соответствующей изоляции т.к. напряжение превышает допустимое значение. Поэтому А и В - критическая крутизна для внутренней и внешней изоляции трансформатора; С и Д - для внутренней и внешней изоляции

аппаратов вблизи линейного разъединителя. Вероятность повреждения изоляции оборудования подстанции равна вероятности прихода на подстанцию волны перенапряжения с крутизной $a > A_{кр}$.



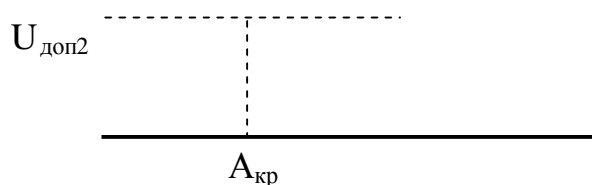


Рис. 2.23. Оценка критической крутизны набегающего импульса
 1- импульсное напряжение на ошиновке трансформатора; 2 - то же
 на удаленном разъединителе; $U_{доп1}$ - допустимое напряжение
 на внутренней изоляции; $U_{доп2}$ - то же на внешней

Длина защищенного подхода оценивается

$$L_{п} > U_{50\%} / A_{кр} \Delta\tau_{ф}, \quad (2.59)$$

где $U_{50\%}$ - импульсное разрядное напряжение линейной изоляции, кВ;

$\Delta\tau_{ф}$ – удлинение фронта полного импульса под действием короны, рассчитанное по формуле

$$\Delta\tau_{ф} = (0,5 + 0,008 U_{max} / h)(1 / K), \quad (2.60)$$

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

Грозозащита изоляции подстанций различного номинального напряжения

Эффективность грозозащиты подстанций оценивается показателем грозоупорности изоляции, представляющем собой число лет безаварийной работы:

$$M = 1 / (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3) = 100 - 1000 \text{ лет}, \quad (2.61)$$

где $\beta_1 = n_{уд} P_{пр} P_{пу} n_{гр} / 100$ - среднее число перекрытий изоляции подстанции из-за прорыва молнии сквозь тросовую защиту; $n_{уд}$ - число ударов молнии за 100 грозовых часов, определяемое как $6,7 (A + 7H) (B + 7H) 10^{-6}$, где A - длина, B - ширина, H - высота подстанции, м; $P_{пр}$ - вероятность прорыва молнии, равная 0,05 или 0,005; $P_{пер}$ - вероятность перекрытия изоляции при

ПУМ, оценивается по критическому току из соотношения $I_{кр} = 2 U_{50\%} / Z$;

$n_{гр}$ - число грозových часов в районе подстанции;

$\beta_2 = n_{уд} (1 - P_{пр}) P_{обр} n_{гр} / 100$ - число обратных перекрытий изоляции при

ПУМ в молниеотвод, где $P_{обр}$ - вероятность обратного перекрытия при ударе молнии в молниеотвод определяется по критическому току $I_{кр} =$

$(U_{50\%} - 50 l) / R_{и}$, когда возможно обратное перекрытие гирлянды изоляторов, где $R_{и}$ - импульсное сопротивление заземления подстанции, а l - высота точки крепления гирлянды на портале при 50 % -ном импульсном разрядном напряжении гирлянды;

$\beta_3 = 4 h_{тр}(P_{\alpha} + (1 - P_d) (4 h_{оп} P_{оп} / l) + (1 - 4 h_{оп} / l) P_{тр}) (n_{гр} / 100) (s l_n / 100)$ - среднее годовое число перекрытий изоляции от набегающих волн, где l_n - длина защитного подхода к подстанции; s - число подходящих линий к подстанции.

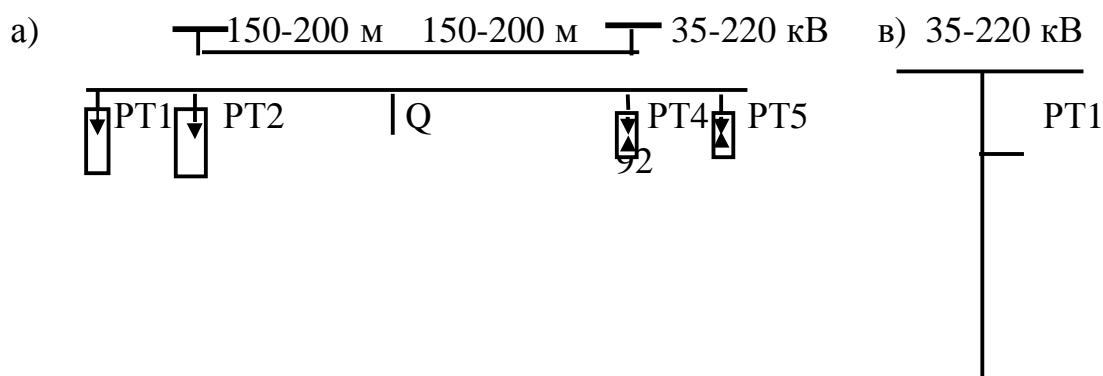
Грозозащита подстанций до 220 кВ зависит от уровня изоляции оборудования, который соотносится с характеристикой разрядника РВС. Место установки РВС может быть выбрано до коммутационного аппарата при трансформаторе, если он с высоким уровнем изоляции, и после коммутационного аппарата, если на разрядник возлагается задача ограничения коммутационного перенапряжения. В этих случаях трансформаторы и реакторы на напряжение 330 - 750 кВ приключаются к шинам без коммутирующих устройств, чтобы не усложнялась работа разрядника. Для подстанций 220 кВ устанавливают один комплект разрядников на фазу шин, для подстанций 330 - 500 кВ рекомендуют уже два комплекта, с напряжением 750 кВ и выше - три комплекта, чтобы эффективно снизить ток через каждый разрядник и остающееся напряжения после них.

На линиях сверхвысокого напряжения СВН в отличие от ЛЭП до 220 кВ применяют комбинированные вентильные разрядники РВМК или ограничители перенапряжения ОПН для снижения амплитуды и крутизны коммутационного перенапряжения. Если уровень внутреннего перенапряжения невелик,

то разрядник РВМК и ОПН можно заменить на разрядники РВМГ от грозового перенапряжения. При возникновении такого перенапряжения на вводах трансформаторов с изолированной или разземленной нейтралью (с целью снижения токов короткого замыкания) в его обмотках развиваются колебания, которые могут быть опасны для изоляции нейтрали. Для защиты ее изоляции включается вентильный разрядник типа РВС с номинальным напряжением на класс ниже, чем класс напряжения трансформатора.

Подстанции на отпайках, выполняемые как комплектные с напряжением 35 - 220 кВ, имеют оборудование на расстоянии от РВ до 10 м и не требуют ограничения крутизны набегающего импульса. Однако, чтобы на вентильных разрядниках не допустить близких ПУМ, которые приводят к повреждению последних, необходимо при отсутствии троса на линии с деревянными опорами, например, либо ограничить грозовой импульс при движении к подстанции двумя комплектами трубчатых разрядников по рис. 2.24 а, которые отводят значительную часть тока молнии в землю, либо ближайšie к подстанции пролеты защитить тросом с установкой ограниченного числа комплектов разрядников. Если трос есть по всей длине линии, то отпайка также защищена им по всей длине и установка трубчатых разрядников не требуется по рис. 2.24 б и в.

Распредустройства 3 - 10 кВ и подходящие к ним ЛЭП редко поражаются молнией, имеют большую грозоупорность, хорошо экранированы, поэтому дополнительный комплект разрядника РТ1, установленный на линии в пределах 150 - 300 м по рис. 2.24 в, не защищает изоляцию электрооборудования. Индуктивность этого участка линии вызовет подъем напряжения по ходу волны перенапряжения, что повысит надежность срабатывания разрядника РТ2.



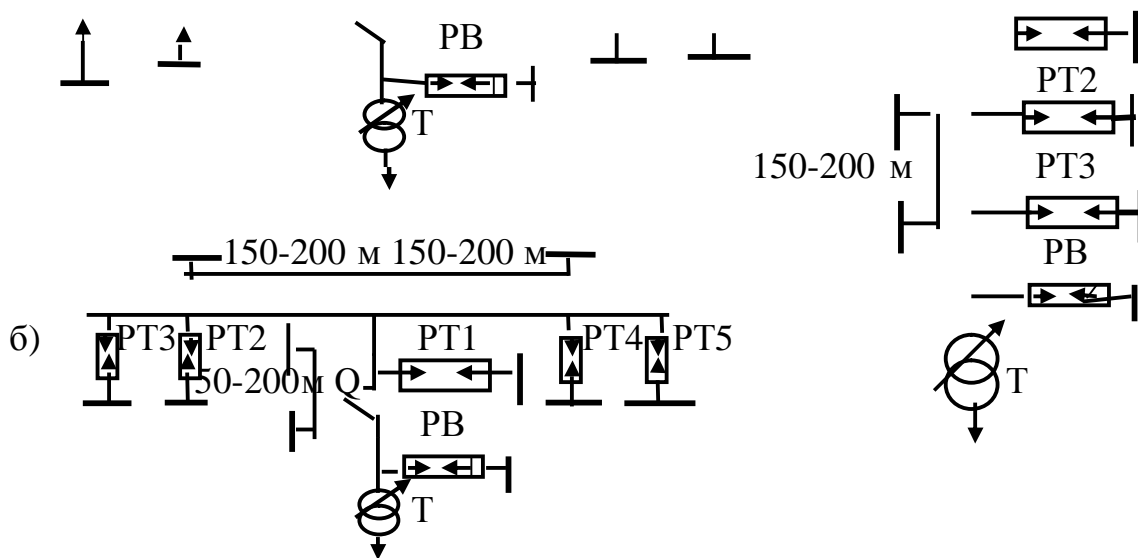


Рис. 2.24. Схемы грозозащиты комплектных подстанций на отпайках
а) – расстояние (отпайка) от трансформатора до линии 5-10 м,
б) - то же 50-200 м, в) - то же более 200 м

Грозозащита изоляции электрических машин

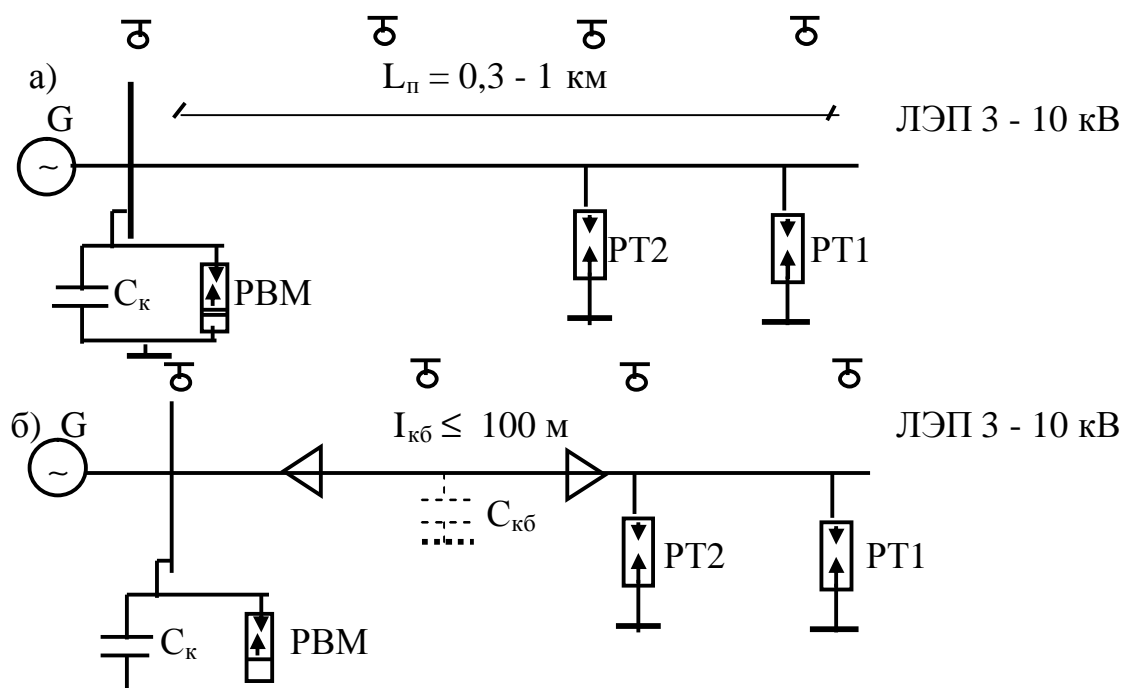
Изоляция электрических машин имеет низкую грозоупорность, но достаточную электрическую прочность, в несколько раз превышающую рабочее напряжение. Коэффициент импульса имеет значение 1,3 - 1,6 для новой изоляции и порядка 0,7 - 1 для изоляции бывшей в эксплуатации. Ограничение перенапряжения на вводе машины должны осуществлять разрядники с улучшенными характеристиками типа РВМ. Чтобы координировать импульсную прочность изоляции машин с характеристиками РВМ, надо предусмотреть ограничение напряжения на нейтрали, что защитит продольную изоляцию машины.

Если генератор подключен к ЛЭП через трансформатор связи, то на генераторном напряжении разрядники могут не устанавливаться. Когда же они установлены, то не требуется дополнительного ограничения крутизны импульса волны косинусными емкостями C_k , которые должны подключаться параллельно разряднику РВМ.

Молниезащита электрической машины, присоединенной к воздушной линии, успешно осуществляется вентильными разрядниками типа РВТ первой группы. Это необходимо для увеличения координационного интервала между остающимся напряжением разрядника и допустимым напряжением на главной изоляции машины. Для более глубокого снижения крутизны, что обеспечивает надежную работу межвитковой изоляции, параллельно разряднику включают косинусные емкости. Ограничение осуществляется до $1 - 2$ кВ/мкс.

Схемы соединения генератора и ЛЭП представляют:

распределительного устройства 3 - 10 кВ, которые имеют грозозащиту на подходе к подстанции в пределах 500 - 600 м, выполненную от ПУМ молниеотводами стержневого типа, и ограничение набегающей волны как на подходе линии, так и на шинах генератора по рис. 2.26 а, где используется косинусная емкость C_k для глубокого ограничения крутизны импульса перенапряжений; сопротивление заземления разрядников должно быть до 5 Ом, если невозможно его выполнить таким, то требуется второй комплект трубчатого разрядника РТ2 на второй после концевой опоре (к.оп.);



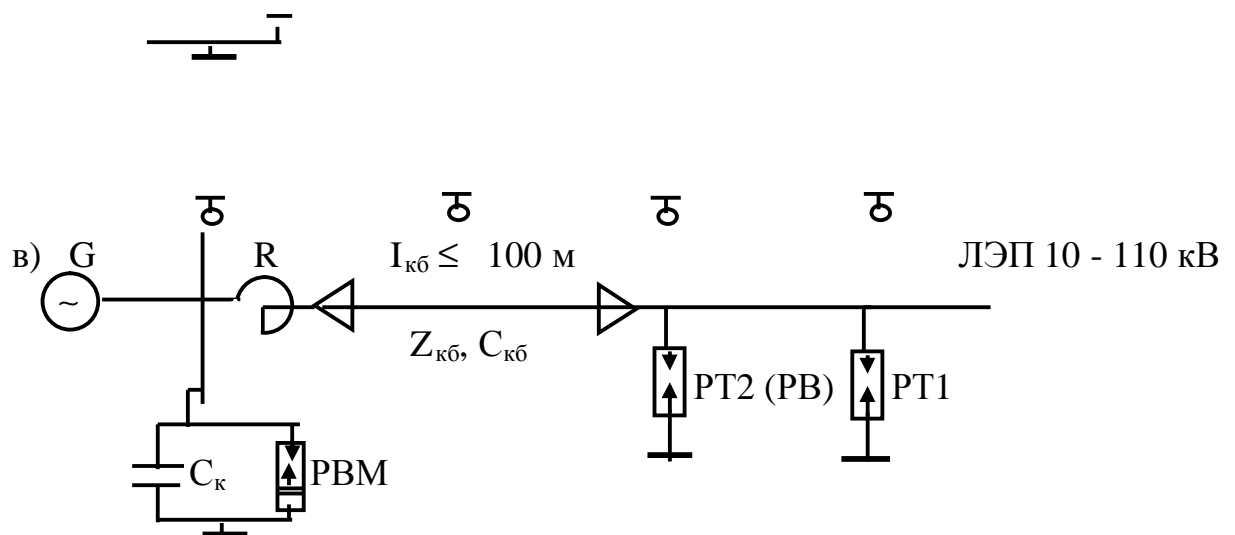


Рис. 2.25. Схемы грозозащиты изоляции электрической машины, имеющей безтрансформаторную связь с ЛЭП

- а) - грозозащита подхода ЛЭП стержневыми молниеотводами;
 б), в) - то же с грозозащитой распреустройства кабельной вставкой

распреустройства 3-110 кВ по рис. 2.25 б и в, которые имеют грозозащитные кабельные вставки общей емкостью выше 1,5 - 2,5 мкФ не предусматривают установку косинусной емкости C_k ; реактор R используется для ограничения тока короткого замыкания.

2.5. Внутренние перенапряжения

Общие сведения

Физическая картина внутреннего перенапряжения обусловлена колебательными переходными процессами от начальных к установившимся распределениям напряжения на токоведущих участках вследствие различной ситуации в электрической цепи. В реальной сети возможны либо плановые или режимные ситуации, либо аварийные. Исследованные внутренние перенапряжения можно объединить в две группы:

коммутационные перенапряжения, связанные с переходным процессом, когда осуществляется коммутация электрического аппарата, а также при дуговых замыканиях на землю;

резонансные перенапряжения, существенно связанные с установившимися резонансными колебаниями в системе с симметричным или несимметричным режимом ее работы.

К коммутационным относятся перенапряжения:

- при отключении емкостной нагрузки перегруженных длинных линий и конденсаторных батарей;
- при включении длинных линий, в частности, при автоматическом повторном включении;
- при отключении ненагруженных трансформаторов, асинхронных двигателей или реакторов;
- при дуговых замыканиях на землю и неустойчивом характере дуги в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью.

К резонансным относят перенапряжения:

- на рабочей частоте в длинных линиях с симметричным и несимметричным режимом работы;
- вследствие самовозбуждения вращающихся машин в симметричном режиме;
- на высших гармониках в несимметричном режиме работы сети;
- феррорезонансные перенапряжения на высших и низших гармониках, обусловленные нелинейными параметрами цепей со сталью.

В связи с эффективными ограничениями атмосферного перенапряжения, внутренние перенапряжения играют все большую роль в установлении уровня изоляции электроустановок, особенно на сверхвысокое напряжение.

Именно на реальные процессы следует ориентироваться при оценке макси-

мальной кратности внутреннего перенапряжения и выборе средств его ограничения.

Отключение линии электропередачи с повторным зажиганием дуги

Уровень изоляции ЛЭП достаточно высок, а поэтому небольшие токи утечки на землю по гирлянде изоляторов, следовательно, заряд на емкости линии сохраняется после ее отключения выключателем Q по рис. 2.26. В начале линии включен генератор переменного тока с напряжением U_ϕ , а конец линии разомкнут.

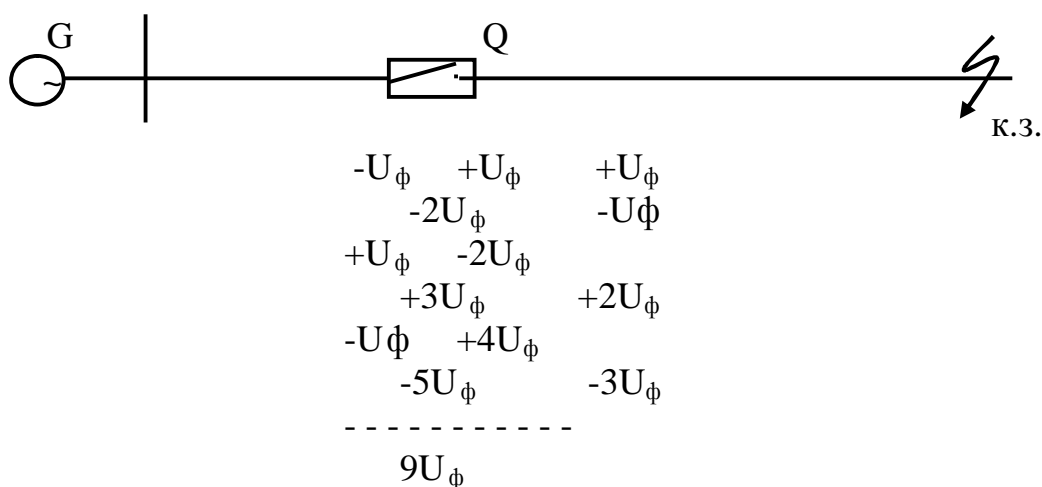


Рис. 2.26. Схема отключения ЛЭП в холостом режиме

Выключатель отключает линию в момент, когда ее зарядный ток проходит через нулевое значение, а напряжение через максимум. Хотя генератор отключен, линия остается под напряжением $+U_\phi$, т.к. утечка тока в ней не существенна. Через полпериода с момента отключения генератора напряжение на его зажимах изменит знак и достигнет $-U_\phi$. Разность потенциалов на выключателе возрастает до $-2U_\phi$. Если в этот момент расстояние между контактами выключателя еще невелико, что характерно для

всех типов выключателей, кроме быстродействующих, где электрическая прочность промежутка восстанавливается через 0,08 - 0,1, то возникает пробой промежутка или повторное включение цепи за время горения дуги. При

этом линия перезаряжается до напряжения $-U_{\phi}$, т.к. в линию распространяется электромагнитное колебание от повторного зажигания дуги амплитудой $-2U_{\phi}$, которое накладывается на остаточное напряжение емкости линии. На конце разомкнутой линии волна напряжения $-U_{cp}$ отразится с сохранением знака и придет результирующим значением на правый контакт с амплитудой $-2U_{\phi}$. В это время ток в выключателе падает до нуля и дуга в выключателе гаснет. Через полпериода напряжение на выключателе за счет перемены знака напряжения источника может достигнуть восстанавливающего значения $+3U_{\phi}$, что может оказаться достаточным, чтобы вновь зажглась дуга и снова распространилась по линии перенапряжения. Теоретически вероятно возникновение перенапряжения при повторном зажигании дуги за время расхождения контактов до $9U_{\phi}$, практически при отключении ненагруженных линий оно возрастает до $(4,0 - 4,5)U_{\phi}$.

Перенапряжение при повторном включении ЛЭП

С целью самоликвидации за время бестоковой паузы неустойчивых коротких замыканий в ЛЭП устанавливается автомат повторного включения. При однофазных коротких замыканиях (к.з.) ЛЭП по рис. 2.27 отключается с обеих сторон и создается бестоковая пауза. Причем из-за разброса времени действия выключателей Q1 и Q2 отключаются и включаются на линии неодновременно. Предположим, что B1 последним отключает линию и первым

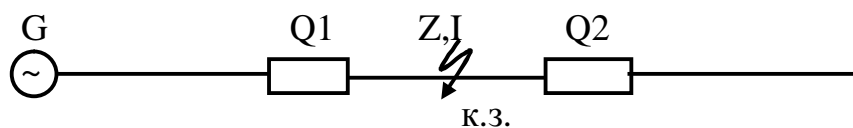


Рис. 2.27. Схема сети с односторонним питанием и АПВ

ее включает, поэтому, когда линия отключается выключателем Q2, напряжение на здоровых фазах линии в установившемся режиме будет равно перенапряжению

$$U_o = U_{уст} K_3, \quad (2.62)$$

где $U_{уст}$ - установившееся напряжение в симметричном режиме находится через ЭДС на емкости линии: $U_{уст} = E / (1 - (1 / \omega))$; K_3 - коэффициент повышения напряжения при однофазных к.з.

На фазах выключателя, питающего здоровые фазы линии, течет емкостный ток и при его обрыве в момент прохождения через нулевую отметку напряжение на проводах имеет амплитудное значение, равное U_0 . При отключении В1 возникают повторные зажигания дуги на его контактах из-за напряжения на проводах от остаточных зарядов на емкости линии и малых токов утечки на землю. Это напряжение уменьшается в зависимости от длительности бестоковой паузы АПВ, что учитывается коэффициентом дождя K_g . В дождь проводимость утечки тока велика, а в сухую погоду мала. При бестоковой паузе $\Delta t = 1$ с, $K_g = 0,5$; при $\Delta t = 0,4$ с, $K_g = 0,6$; при $\Delta t = 0,2$ с, $K_g = 0,7$. Поэтому с учетом K_g наблюдается снижение перенапряжения при работе АПВ:

$$U_0 = U_{уст} K_3 K_g. \quad (2.62)$$

Переходный процесс на здоровых фазах линии по-прежнему выражается формулами простого колебательного контура при любой работе АПВ. Расчеты показывают, что максимальное значение U_0 при успешном и не успешном АПВ достигают $(3 - 3,5)U_\phi$. При учете одновременного включения и взаимного влияния фаз линии эти значения могут быть еще выше. Повторные включения линий в следствие большой вероятности такой коммутации приводят к наиболее опасному перенапряжению.

Отключение ненагруженных трансформаторов

Отключение ненагруженных трансформаторов со стороны высокого напряжения возможно в момент прохождения тока через максимум, а напряжения через нуль или в момент прохождения тока вблизи нулевого значения (ток среза $I_{ср}$).

При мгновенном отключении индуктивной цепи магнитная энергия ($L_{тр} I_{xx}^2 / 2$) преобразуется в электрическую ($C_{тр} U_{тр}^2 / 2$). Приравняв значения энергий и решив их относительно напряжения, получим

$$U_{тр} = I_{xx} \sqrt{L_{тр} / C_{тр}} . \quad (2.61)$$

В момент разрыва тока вблизи нулевого значения ($I_{ср}$) и некотором значении фазного напряжения (U_{ϕ}) запасенная электромагнитная энергия в обмотке трансформатора выразится:

$$L_{тр} I_{ср}^2 / 2 + (C_{тр} U_{\phi}^2 / 2) = (C_{тр} U_{тр}^2 / 2). \quad (2.62)$$

Отсюда напряжение на трансформаторе и, следовательно, на контактах высоковольтного выключателя

$$U_{тр} = \sqrt{(L_{тр} / C_{тр}) I_{ср}^2 + U_{\phi}^2}, \quad (2.66)$$

где величина тока среза $I_{ср}$ для масляных и воздушных выключателей находится в пределах 10 - 20 А, что отмечают в паспорте трансформатора как I_{xx} - ток холостого тока трансформатора.

Величина $U_{тр}$ по (2.62) и (2.66) - это перенапряжение, которое даже при одном повторном зажигании дуги на контактах выключателя достигает значения $3,8 U_{\phi}$. Действительно, дугу в выключателе нельзя мгновенно прервать из-за конечной скорости нарастания электрической прочности дугового промежутка. Повышение напряжения на емкости трансформатора приводит к повторному зажиганию (через дугу) контактов выключателя, пока они еще находятся на небольшом расстоянии. Процесс повторных обрывов и зажигания дуги сопровождается колебательным процессом. Перед окончательным обрывом тока на контактах выключателя перенапряжение может достигать значений $(4,1 - 4,2) U_{\phi}$. Для трансформаторов с заземленной нейтралью перенапряжение переходит за пределы $3,0 U_{\phi}$. Если нейтраль изолирована или заземлена через дугогасящую катушку, то одновременное отключение фаз приводит к перенапряжению до $(4,0 - 4,5) U_{\phi}$.

Междуфазное коммутационное перенапряжение

Перенапряжения между фазами $U_{\text{омф}}$ равны разности перенапряжению на фазах U_0 . Статистическому разбросу U_0 соответствует статистический разброс $U_{\text{омф}}$, который осложнен разбросом действия фаз выключателя. Очевидно, что наибольшие $U_{\text{омф}}$ возникают при таком процессе на фазах, когда момент максимума U_0 в переходном режиме и амплитудой установившегося режима $U_{\text{уст}}$ осуществляется ударным коэффициентом $K_{\text{уд}}$, который зависит от параметров схемы, начальных условий, вида коммутации, разброса моментов включения или отключения фаз и т.д.:

$$U_0 = K_{\text{уд}} U_{\text{уст}}. \quad (2.67)$$

В среднем принимается связь между ударными коэффициентами перенапряжению на фазах и между фазами

$$K_{\text{удмф}} = 0,85 K_{\text{уд}}. \quad (2.68)$$

С учетом того, что $U_{\text{мф}} = 3 U_{\text{ф}}$, получим

$$U_{\text{омф}} = 0,85 \cdot 3 U_{\text{ф}} = 1,45 U_0. \quad (2.69)$$

Для оценки уровня изоляции между фазами значение $U_{\text{омф}}$ является определяющим.

Перенапряжения в сетях с изолированной нейтралью

Короткие замыкания на землю в электрических системах часто сопровождаются возникновением дуги. Если в сети с изолированной нейтралью или нейтралью, заземленной через дугогасящую катушку, ток к.з. небольшой, то он не представляет опасность для изоляции электрооборудования, имеющей высокий уровень. При этом возникающая дуга может существовать относительно долго. Емкостный ток во время однофазных к.з. на землю, равный $3 \omega C_{\text{ф}} U_{\text{ф}}$, в сетях 6 - 35 кВ имеет значение в несколько ампер. В условиях эксплуатации такие замыкания практически не сказываются на условиях пере-

дачи энергии, а повышение напряжения в неповрежденных фазах до линейного значения опасно для изоляции электроустановки. Опытом эксплуатации допускается работа сетей 6 - 35 кВ с изолированной нейтралью при емкостном токе по табл. 2.1.

Таблица 2.1

Ток замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью				
U_n , кВ	$I_{сдоп}$, А	$I_{уд}$ ЛЭП, А/(км кВ)	ВЛ/КЛ	1 ЛЭП, км ВЛ/КЛ
6	30	0,016/0,6		-/50
10	20	0,05/1,0		-/20
20	15	0,06/2,0		250/7,5
35	10	0,105/3,5		100/3,0

Увеличение протяженности линий приводит к росту емкостного тока до десятков и сотен ампер. Это увеличивает длительность горения дуги и даже дугогасящая катушка не предотвращает последующее повторное зажигание дуги при каждом переходе тока через нулевое значение. Возникает перемежающаяся дуга под действием восстанавливаемого напряжения на дуговом промежутке, а в сети появляются колебания или отмечается процесс, результатом которого является перенапряжение, имеющие много общего с перенапряжением при отключении ненагруженных линий.

Оценкой максимального перенапряжения при n -ом зажигании дуги может служить уравнение (2.70), где напряжение фазы А в момент, предшествующий повторному зажиганию, возрастает на величину смещения нейтрали ΔU , образовавшегося в результате предыдущего $n - 1$ гашения дуги:

$$U_{\text{оmax}} = U_c(t_n) - U_a(t_n) - (U_a(t_n) + \Delta U_{n-1}) (1 - K) (1 - d), \quad (2.70)$$

где K - коэффициент связи сети, равный 0,2 - 0,25; d - коэффициент, зависящий от коэффициента затухания δ , определяемый активными сопротивлениями сети, обычно $1 \approx d = n \delta / \omega_1$ и можно принять $e^{-d} = 1 - d$, где $d = 0,1$, а $\pi / \omega_1 = T_1 / 2$ - полупериод свободных колебаний максимального напряжения на неповрежденных фазах.

Предельные значения перенапряжений при различных вариантах поведения дуги рассчитывается согласно следующих теорий.

Теория ПЕТЕРСЕНА: дуга гаснет при переходе через нуль тока высокочастотных колебаний и вновь зажигается через полпериода промышленной частоты в момент максимума напряжения на поврежденной фазе. Такой режим маловероятен, но позволяет получить предельные значения перенапряжения. Это объясняется тем, что параллельно с накоплением зарядов на емкостях между фазами и относительно земли после каждого погасания дуги происходит стекание зарядов на землю за время горения дуги, что приводит к прекращению роста перенапряжения:

$$U_{\text{оmax1}} = 1,5 U_{\phi} - (- U_{\phi} - (2 / 3) U_{\text{оmax}}) (1 - K) (1 - d)$$

или

$$U_{\text{оmax1}} = U_{\phi} (1,5 + (1 - K) (1 - d)) / (1 - (2 / 3) (1 - K) (1 - d)) = 4,26 U_{\phi}, \quad (2.71)$$

где $K = 0,2$, а $d = 0,1$.

Теория Н. Н. БЕЛЯКОВА: Согласно ей дуга может гаснуть как при первом или последующем переходе через нуль высокочастотного тока, так и при переходе через нуль тока промышленной частоты. Гашение дуги проходит успешно, если его пик в сетях 6 - 10 кВ не превышает в сетях $0,4 U_{\phi}$. Значение пика гашения связано со снижением нейтрали не более, чем на $1,2 U_{\phi}$.

Гашение дуги затруднено, если его пик выше этих пределов. Тогда дуга загорается вновь (заряды емкостей частично отводятся в землю) и этот процесс продолжается до тех пор, пока пик гашения не станет меньше $0,4 U_{\phi}$. После этого дуга гаснет и может зажечься под влиянием восстанавливающего напряжения промышленной частоты через полпериода

$$\Delta U = - 1,2 U_{\phi}; U_a = - U_{\phi}; U_c = 0,5 U_{\phi},$$

$$U_{\text{оmax}} = 1,5 U_{\phi} - (- 2,22 U_{\phi}) (1 - K) (1 - d) = 3,1 U_{\phi}. \quad (2.72)$$

Теория Белякова в большей степени объясняет поведение реальной дуги.

Теория ПЕТЕРСЕНА и СЛЕПИНА: дуга гаснет при переходе через нуль тока промышленной частоты и зажигается вновь при максимальном значении напряжения той же частоты на поврежденной фазе. При этих условиях гашение дуги происходит через полпериода после зажигания, когда свободные колебания затухают и мгновенные значения напряжения на поврежденных фазах равны $+1,5 U_{\phi}$, а смещение нейтрали $\Delta U = + 2$

$$1,5 U_{\phi} / 3 = + U_{\phi},$$

поэтому перенапряжение $U_{\text{оmax}} = 1,5 U_{\phi} - (- 2 U_{\phi}) (1 - K) (1-d) = 1,94 U_{\phi}$.

(2.73)

Резонансные перенапряжения

Такой вид перенапряжения возникает в сетях, содержащих последовательно включенные индуктивность и емкость по рис. 2.29.

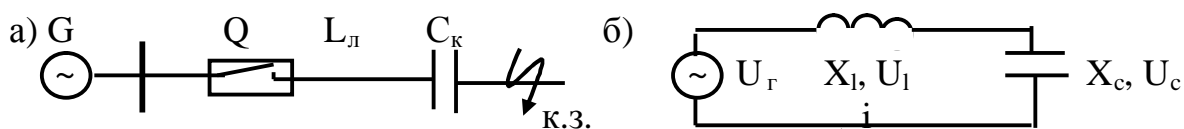


Рис.2. 28. Схема ЛЭП с продольной компенсацией а) и расчетная схема к.з. б)

Для резонанса характерно, чтобы частота собственных колебаний цепи была близка к частоте источника напряжения. Резонансные перенапряжения свойственны, например, линиям высокого напряжения с продольной компенсацией по рис. 2.28 а. Устойчивость работы системы повышает частичная компенсация индуктивности линии емкостью C_k . При к.з. емкостью и частот колебаний контура управления, близкой к промышленной, в цепи возникает резонанс напряжений, приводящий к резкому возрастанию тока. Напряжения на индуктивности линии и емкости продольной компенсации в это время равны и превосходят напряжение источника семикратно. Напряжение на емкости растет быстрее, достигая резонансного значения. Оно наиболее опасно

для изоляции конденсаторов продольной компенсации и должно быть ограничено продольным разрядником.

Опасным видом резонанса в электрической цепи является феррорезонанс, для которого в контуре индуктивность с железом и емкость соединены последовательно. Явление феррорезонанса возможно при различных ситуациях: обрыв провода, заземление одного из его концов, неодновременное включение или отключение проводов, опрокидывание фазы напряжения при включении в нейтраль трансформатора достаточно большой индуктивности (дугогасящей катушки) или при обрыве одного из проводов с замыканием на землю в линии с двухсторонним питанием.

В электрических сетях с большим числом асинхронных двигателей и малой нагрузкой при обрыве фазы двигателя продолжают вращаться как однофазные, а в разомкнутой фазе индуктируется номинальное напряжение, что препятствует опрокидыванию фаз. При больших нагрузках двигатель может остановиться, тогда увеличивается реактивный ток и двигатель подобен реактивной катушке со сталью. Малые двигатели не могут воспрепятствовать опрокидыванию фаз вследствие их малой мощности, в результате чего меняется очередность следования фаз и трехфазный асинхронный двигатель изменяет свое вращение.

Ограничение коммутационных и резонансных перенапряжений

1). Шунтирующие сопротивления в выключателях служат для ограничения скорости нарастания крутизны и амплитуды восстанавливающихся напряжений на контактах. Последние выполняются многоступенчатыми, чтобы многократно выполнить разрыв дуги. На каждой ступени схема вновь повторяется по рис. 2.29.

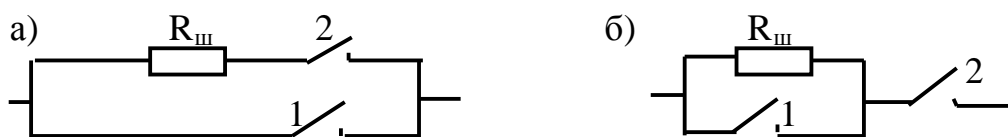


Рис. 2.29. Параллельная а) и последовательно-параллельная б) схема исполнения выключателя (1) с шунтирующим сопротивлением $R_{ш}$ и дополнительным контактам (2)

Величина $R_{ш}$ от 100 Ом на ступень до нескольких десятков Ом и обеспечивает искусственный путь утечки тока заряда с емкости линии через нейтраль трансформатора или генератора на землю, что резко снижает в конечном итоге величину перенапряжения при повторном зажигании дуги на контакте 1 выключателя. Контакт 2 отключает $R_{ш}$ с некоторой задержкой по времени относительно контакта 1.

2). Отключение коротких замыканий (не удаленных). При разрыве тока контактами 1 по рис. 2.29 б $R_{ш}$ демпфирует колебания в контурах электрической цепи и снижает волновые сопротивления линии и распродустройства. Чем ниже $R_{ш}$, тем более эффективно ограничивается перенапряжение. Однако чем ниже $R_{ш}$, тем выше перенапряжение во втором цикле отключения контактами 2. Таким образом выбор конструкции $R_{ш}$ и контактов отделителя 2 оказывается весьма сложным. Оптимальная величина $R_{ш}$ порядка сотен и десятков Ом или не линейное сопротивление. Такое сопротивление эффективно при разрыве электропередачи в асинхронном режиме.

3). Отключение ненагруженных линий. Роль $R_{ш}$ заключается в ограничении повторных зажиганий дуги в выключателе путем снижения амплитуды восстанавливающегося напряжения на контакте 1 по рис. 2.29 а. После обрыва дуги на контакте 1 остаточный заряд с емкости линии стекает через сопротивление $R_{ш}$, индуктивность сети и нейтраль сети в землю. В результате значение амплитуды восстанавливающегося напряжения оказывается не выше напряжения заряда емкости линии при величине $R_{ш} < 3,0$ кОм, например, для выключателя 220 кВ.

4). Включение линии в цикле АПВ. По схеме рис. 2.29 а $R_{ш}$ разряжает линию и тем самым резко снижает перенапряжение при повторном зажигании

дуги на контактах выключателя. Наиболее опасные перенапряжения при АПВ могут быть эффективно ограничены даже высокоомными маломощными шунтирующими сопротивлениями $R_{ш} < 3,0$ кОм.

5). Включение холостых линий. Экономически целесообразней уровень изоляции длинных линий сверхвысоких напряжений СВН оставлять достаточно низким. Для таких линий в С - ПГТУ им. М.И. Калинина было предложено выполнять выключатели с $R_{ш}$ двустороннего действия по рис. 2.29 а, когда вначале замыкаются вспомогательные контакты 2 с $R_{ш}$, а затем главные контакты 1. Включение контактов 2 ведет к зарядке емкости линии через сопротивление $R_{ш}$. Чем выше $R_{ш}$, тем ниже U_0 в этой коммутации. Однако с повышением $R_{ш}$ растет U_0 при замыкании контактов 1 и шунтировании $R_{ш}$. Оптимальные значения $R_{ш}$, обеспечивающие минимальные перенапряжения при включении линии, составляют 500 - 1000 Ом при длине линии в 400 -200 км.

6). Отключение ненагруженных трансформаторов. При отключении малых индуктивных токов в первом цикле (разрыв главных контактов 1 по схеме рис. 2.29 а параллельно обрываемому току $I_{ср}$ включено $R_{ш}$. В этом цикле перенапряжение на контактах 1 выключателя не превышает $U_0 = I_{ср} R_{ш}$. Во втором цикле отключения роль $R_{ш}$ заключается в ограничении тока и сглаживании колебаний при возникновении повторных колебаний дуги. Этому условию отвечает неравенство $R_{ш} < (1 / 2) \sqrt{L/C}$, по которому $R_{ш}$ порядка десятков кОм.

7). Разрядники для ограничения внутренних перенапряжений. В сетях 500 - 750 кВ используются комбинированные вентельные разрядники для ограничения внутренних перенапряжений типа РВМК по рис. 2.30. Так как коэффициент импульса РВМК близок к единице, можно считать, что разрядное напряжение искровых промежутков при перенапряжении равно разрядному напряжению при промышленной частоте. Разрядник должен гасить проводящий ток рабочей частоты при высоких напряжениях гашения $U_{гаш}$

во время коммутаций в сетях. При перенапряжении "работают" искровой промежуток 1 и рабочее сопротивление 2. Ток в рабочем сопротивлении 2" ($I_p > 1500 \text{ A}$) недостаточен для пробоя искрового промежутка 3. Сопротивление 2 ограничивает сопровождающий ток при напряжении гашения до значения, при котором он гасится искровыми промежутками 1. При атмосферном перенапряжении и прохождении через сопротивление 2" импульсного тока 2000 А срабатывает искровой промежуток 3 и рабочее сопротивление разрядника ограничивается участком 2. Этот участок в то же время ограничивает сопровождающий ток при напряжении U_r до необходимой для гашения величины. РВМК предназначен для установки на линиях, а РВМГ - на подстанциях, т.к. на подстанциях коммутационные токи существенно ниже, чем на линиях, ниже и напряжение гашения.

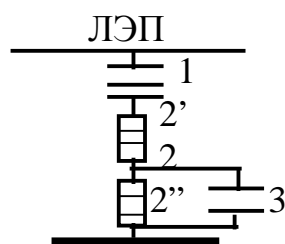


Рис. 2.30. Принципиальная схема разрядника РВМК

8). Ограничение перенапряжения приключенными к линиям реакторами и трансформаторами напряжения. При отключении линий на них остаются подключенными трансформаторы напряжения и реакторы поперечной компенсации. Остаточные заряды на проводах отключаемой линии могут стекать в землю по индуктивности электрооборудования. В результате снижается восстанавливающееся напряжение и соответственно снижается амплитуда перенапряжения при отключении линии с повторными пробоями на расходящихся контактах выключателя и при включении линии в цикле АПВ. В схеме с реактором после обрыва тока в выключателе напряжение в линии изменяется, как в схеме без реакторов, носит колебательный характер с соб-

ственной частотой $\omega_0 = 1 / X_p b_{вл}$ и при $\omega_0 = 0,8$ и повторном пробое в самый неблагоприятный момент кратность перенапряжения снижается до 1,5 - 2,0, таким же образом ограничивается перенапряжение при повторном включении в цикле АПВ.

В схеме с электромагнитным трансформатором напряжения ТН заряд линии после обрыва тока в выключателе стекает через нелинейную индуктивность ТН. На таких линиях перенапряжения не превышают $2,5 U_\phi$. Трансформаторы типа НКФ-500 хорошо зарекомендовали себя на линиях 500 кВ, где также требуется установка разрядников РВМК. В сетях СВН внедряются экономические емкостные трансформаторы напряжения, хотя они и не обладают свойством отвода зарядов линии. Однако в сочетании с выключателями, в которых использованы дешевые шунтирующие высокоомные сопротивления, способны разрядить линию за бестоковую паузу цикла АПВ.

9). Предотвращение резонансных явлений в длинных линиях. Резонансные перенапряжения на длинных линиях, хотя и имеют амплитуду, не превышающую $2 U_\phi$, опасны для изоляции, особенно трансформаторов, вследствие своей длительности. Они опасны для коммутационных разрядников, которые могут не погасить дугу сопровождающего тока при установившемся напряжении, превышающем U_r разрядников. Исключить возможность образования резонансных или близких к ним условий можно еще при проектировании линии, в расчетной схеме которой закладывают неравенство X_l / X_c .

Снизить длительность резонансных перенапряжений до нескольких периодов или устранить их могут системная автоматика и релейная защита. Так, при опасном режиме сброса нагрузки при одностороннем отключении линии используется защита с подачей сигнала на отключение выключателей на обоих концах линии.

Регуляторы сильного действия на станциях позволяют поддерживать постоянное напряжение не только на выводах генераторов, но и на линиях высокого напряжения. Это в свою очередь, снижает вероятность возбуждения высших гармоник из-за насыщения магнитопровода трансформаторов. В точках сети, удаленных от станции, ту же роль могут играть синхронные компенсаторы, снабженные регулятором сильного действия.

Обычно резонансные условия на основной гармонике исключаются с помощью шунтирующих реакторов с искровой промежутком по рис. 2.31.

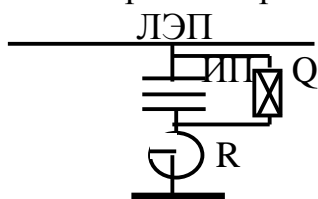


Рис. 2.31. Схема включения реактора R через искровой промежуток ИП

Разрядное напряжение ИП реактора R порядка $1,4 U_{\phi}$. Выключатель Q при отключении не должен создавать коммутационного перенапряжения выше этого уровня в противном случае ИП вновь пробьется и установится режим повторного замыкания и размыкания. Включение реактора по схеме рис. 2.31 производится от сигнала, подаваемого на отключение линейного выключателя, такая схема расстраивает резонансные условия и на высших гармониках.

Глава 3. КООРДИНАЦИЯ И КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ

3.1. Общие принципы координации изоляции

В процессе эксплуатации на изоляцию воздействуют рабочее напряжение, внутреннее и внешнее перенапряжения. Выбор уровня (промежутка между электродами) изоляции электрооборудования электростанций и подстанций

должен быть экономически оправдан. Под координацией изоляции с точки зрения технико-экономических показателей понимают установление и поддержание соответствия между уровнем ее электрической прочности и уровнем амплитуды воздействующего напряжения после защитного разрядника.

Установление и поддержание уровня изоляции электрооборудования основывается на многолетнем опыте его изготовления, эксплуатации и испытания на заводах и в энергосистемах. Уровень перенапряжения регистрируется в течение всего срока службы изоляции современными средствами защиты (разрядниками). Методическая и экспериментальная трудность получения результатов по вольт-секундным характеристикам (ВХ) разрядников требуют при испытании большого числа дорогостоящих образцов изоляции электрооборудования, поэтому опубликованных данных по ВХ разрядников мало. Чаще всего координация изоляции осуществляется с помощью следующего неравенства:

$$U_i > U_o, \quad (3.1)$$

где U_i - импульсная прочность изоляции, нижний предел которой определяется испытательным напряжением

$$U_i = U_{исп} K_i \sqrt{2}, \quad (3.2)$$

где U_o - остающееся напряжение сработавшего разрядника; K_i - коэффициент импульса изоляции.

В СНГ ГОСТ 1516.1-78 и 1516.2-78 устанавливает испытательные напряжения для оборудования каждого класса напряжения. В США уровни изоляции не связываются с номинальным напряжением, а выбираются по многоступенчатой шкале в зависимости от защитных характеристик разрядников в данной точке сети, что позволяет гибко и экономично осуществлять выбор оборудования, с расширенной номенклатурой разрядников.

3.2. Координация изоляции по атмосферным перенапряжениям

Импульсные испытательные напряжения стационарного оборудования выбраны так, чтобы в схемах распределительных устройств, защищенных разрядником, не происходило повреждение изоляции электрооборудования волнами атмосферного перенапряжения. Испытания изоляции проводятся на полной и срезанной волнах (трехударный метод), получаемых от генератора импульсных напряжений (ГИН), согласно ГОСТ 1516.2-78. Таким испытаниям подвергается вся внешняя изоляция типа опорной, проходной и линейной.

3.3. Координация изоляции по внутреннему перенапряжению

Пробивные напряжения искровых промежутков разрядников на рабочей частоте $U_{пр}$ являются определяющими при внутреннем перенапряжении. Остаточное напряжение на рабочем сопротивлении РВ после прохождения импульсного тока разряда молнии несколько ниже напряжения $U_{пр}$. Поэтому для внутренней изоляции выбор испытательного напряжения на рабочей частоте, согласно ГОСТ 1516.1-78, осуществляется по формуле

$$U_{исп \sim} = U_{пр} K_k / K_i, \quad (3.3)$$

где K_k - коэффициент кумулятивности, равный 1,1; K_i - коэффициент импульса внутреннем перенапряжении, принимаемый от 2,0 до 1,5 при увеличении длительности воздействия перенапряжения от 0,1 до 1,0 с.

Для координации внешней изоляции с уровнем внутреннего перенапряжения находится ее прочность под дождем:

$$U_{исп \sim} = U_{пр} / (K_i K_p), \quad (3.4)$$

где $K_i = 1 + 0,5 ((U_{ср} / U_{мр}) - 1)$, т.е. зависит от соотношения $U_{ср} / U_{мр}$ изолятора, где $U_{ср}$ - сухоразрядное напряжение, т.е. разрядное напряжение по поверхности изолятора в сухую погоду при нормальных атмосферных услови-

ях; $U_{\text{мр}}$ - мокроразрядное напряжение, т.е. разрядное напряжение по поверхности изолятора при ливневом дожде со скоростью ветра в 3 м/с и направлением потока воды к оси изолятора под углом в 45° , или принимается для всех видов внешней изоляции $K_i = 1,1$; K_p - коэффициент, учитывающий атмосферное давление на высоте электрооборудования от 500 до 1000 м над уровнем моря, принимается 0,965 до 0,94.

Для внешней изоляции в сухом состоянии амплитуду испытательного напряжения рабочей частоты можно оценить

$$U_{\text{исп}} \sim = U_{\text{пр}} / (\delta / K), \quad (3.5)$$

где δ / K - поправочный коэффициент, с учетом плотности воздуха δ и коэффициента влажности K при высоте от 500 до 1000 м над уровнем моря, принимается соответственно от 0,89 до 0,84; δ - относительная плотность воздуха; K_i и K_k равны 1,0.

В системах сверхвысокого напряжения (СВН) внутренние перенапряжения являются доминирующими и длительными (до секунд и даже минут). Причиной их может быть сброс нагрузки, неправильная работа регуляторов напряжения, односторонний разрыв передачи и т.д. Снижение амплитуды и длительности такого перенапряжения до допустимых значений, определяемых внутренней изоляцией электрооборудования, можно обеспечить с помощью схемных мероприятий и автоматики.

3.4. Координация изоляции по длительным воздействиям напряжения

Неравенство (3.1) гарантирует надежную работу изоляции, если оно сохраняется в течении времени между двумя соседними испытаниями. В действительности U_0 остается неизменным в указанный промежуток времени, а U_i снижается из-за кумулятивного эффекта или увеличения уровня частичных зарядов. Следовательно, в период между соседними профилактическими ис-

пытаниями U_i может снизиться настолько, что будет иметь место неравенство $U_i < U_o$. Это приведет к аварийному отказу изоляции в эксплуатации или неисправности ее во время испытаний повышенным напряжением.

Однако U_i представляет собой одноимпульсную прочность изоляции U_{li} , т.е. ее электрическую прочность при воздействии одного импульса перенапряжения, в то время как воздействие перенапряжения с амплитудой U_o является многократными. Поэтому в основу координации изоляции необходимо положить неравенство

$$U_{mi} > U_o, \quad (3.6)$$

где U_{mi} - многоимпульсная, или электрическая, прочность изоляции под воздействием импульсов, количество которых соответствует эксплуатационному или больше.

В то же время оценка U_{mi} не дает надежных результатов при испытании изоляции повышенным переменным напряжением промышленной частоты в течение 1 мин, т.к. за этот период изоляция старится под воздействием высоко-го знакопеременного напряжения, а распределения напряженности по изоляции во время испытания и под воздействием импульса перенапряжения не идентичны, поэтому K_i (3.2) изменяется в широких пределах - от 0,6 до 2,0 соответственно для устаревшей и новой изоляции. В выражении (3.2) $K_i = 0$. В С - ПГПУ им. М.И. Калинина разработан метод оценки импульсной прочности изоляции по зависимости

$$U_i = f(n), \quad (3.7)$$

где n - число импульсов или амплитуд воздействующего испытательного напряжения.

Обработка опытных данных для изоляционных материалов типа слюдотерм, монолит, ВЭС-2 и т.д. показала, что между одноимпульсной прочностью изоляции и многоимпульсной есть зависимость

$$U_{mi} = K_c U_{li}, \quad (3.8)$$

где K_c - коэффициент старения или снижения напряжения для слюдосодержащих материалов, изменяется в пределах 0,55-0,65.

На графике зависимости (3.7) для слюдосодержащего материала по рис. 3.1 имеются три характерные точки:

$n = 1$ - одноимпульсная прочность при определенной вероятности пробоя изоляции;

$n = 1000-2000$ - электрическая прочность изоляции соответствует прочности изоляции при воздействии импульсных амплитуд напряжений микросекундной зоны (внешние перенапряжения);

$n = 4000-5000$ - прочность изоляции при воздействии внутренних перенапряжениях;

$n > n_i$, когда равное n_i или большее n_m число воздействующих амплитуд перенапряжения на изоляцию электрооборудования не вызовет пробоя изоляции - это безопасная амплитуда напряжения или многоимпульсная прочность изоляции.

Таким образом, неравенство (3.6) наиболее реально отражает вопросы координации изоляции. В то же время, если амплитуда повышенного испытательного напряжения будет выбрана не выше многоимпульсной прочности изоляция не состарится.

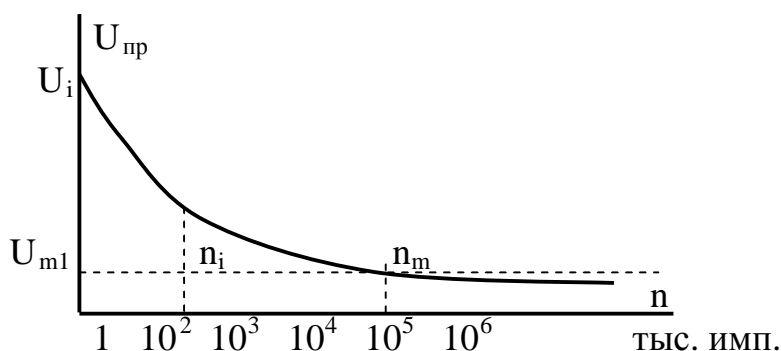


Рис. 3.1. Зависимость прочности материала от числа воздействующих импульсов

3.5. Контроль за качеством изоляции

Качество технической изоляции определяется не только культурой производства, но и налаженной службой контроля или проверки соответствия качества изоляции ГОСТу или заводским нормам. Контроль за качеством изоляции на производстве при изготовлении и выпуске электрооборудования и профилактика изоляции в эксплуатации направлены на выявление ее дефектов с последующей заменой или восстановлением поврежденного изоляционного участка.

Местные и общие дефекты в изоляционной конструкции .

Местные дефекты сосредоточены на небольшом участке изоляции и проявляются в виде газовых (воздушных полостей) и металлических включений, примесей, а также в виде механических и технологических нарушений (микротрещин, заусениц, морщин, смещений слоев ленты, вмятин и т.п.).

Общие дефекты наиболее распространены, среди них чаще обнаруживается проникающая влага в изоляцию, реже выявляются дефекты развитого газового включения (дырка) и проводящей примеси (металлическое включение). Разрушение изоляции в начале эксплуатации протекает медленно, а в конце - носит скачкообразный характер.

Методы контроля за изоляцией - это разрушающие методы при испытании повышенным напряжением и метод обнаружения дефектов под воздействием напряжения ниже номинального уровня или рабочих напряжений без разрушения изоляции.

Опыт применения профилактических испытаний высоковольтной изоляции сводится к повышению надежности изделий в работе или к снижению вероятностей отказов электрооборудования.

3.6. Испытание изоляции повышенным напряжением

Изоляция электрооборудования в условиях эксплуатации подвергается воздействию рабочего напряжения, перенапряжения внешнего и внутреннего характера и физико-механических факторов - теплового поля, вибраций, электродинамических усилий и т.д. Пооперационные испытания повышенным напряжением позволяют оценить способность изоляции противостоять таким воздействиям.

Повышенное испытательное напряжение должно:

- эффективно обнаружить все виды дефектов;
- не старить изоляцию, т.е. не развивать дефект, если он выдержал испытания;
- дать распределение напряженности поля по изоляции во время испытания идентично перенапряжению во время эксплуатации;
- установки повышенного напряжения должны быть транспортабельны, просты в обслуживании и электробезопасны.

В понятие эффективности испытания вкладывают различное содержание, вследствие чего сравнение эффективности испытаний, проводимых различными специалистами, затруднительно, а порой невозможно. Одни оценивают эффективность испытаний отношением числа выявляемых дефектов к числу испытаний машин, другие определяют отношение числа выявленных дефектов при испытаниях к числу машин, изоляция которых повреждена в эксплуатации за период времени между двумя испытаниями. В обоих случаях такой подход формальный. В ряде случаев дается оценка эффективности испытаний с применением нескольких форм испытательных напряжений и при неоправданно завышенных величинах испытательного напряжения Наряду с большим числом пробоев изоляции во время испытаний ожидается кумулятивный эффект в ней и, как следствие, аварийность изоляции в эксплуатации не снижается. Все выше сказанное относится как к традиционным испытаниям повышенным напряжением, существующим в настоящее время в Нормах и ГОСТах - это повышенное переменное напряжение повышенной частоты в

течение 1 мин и выпрямленное в течении 5 мин, а также импульсное напряжение стандартной волны 1,5/40 мкс и срезанной - 1,5/2 мкс (трех ударный метод). К нетрадиционным испытаниям относят другие формы повышенных напряжений: трапецеидальная (завод "Электросила"), сверхнизкочастотные 0,1 Гц (США), полупериод напряжения 50 Гц (Нидерланды, С - ПГТУ им. М.И. Калинина). Анализ форм напряжений приведен в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Показатели различных форм повышенных напряжений

Формы повыш. напряжения	Эффективность	Отсутствие эл. старения	Идентич. с перенапряж.	Транс., прос. обл., эл-без.	Примечан
Переменное 50 Гц в течен. 1 мин.	+	-	0	+	Завод экспл
Выпрямленное в течение 5 мин.	0	+	-	-	-«-
Импульсное напр. 1,5/40 мкс	+	+	+	-	-«-
Полупериод 50 Гц	+	+	0	+	-«-
СНЧ 0,1 Гц	+	-	-	-	-«-
Трапецеидальное	+	-	0	-	-«-

Примечание: "+" - полностью удовлетворяет требованию; "-" - не удовлетворяет; "0" - частично удовлетворяет.

3.7. Не разрушающий метод контроля изоляции

Такой контроль построен на оценке процессов медленной поляризации, которая происходит в изоляции. Изоляция может быть представлена параллельной схемой замещения, приведенной на рис. 3.4, первая ветвь которой состоит из емкости C_{∞} , вторая - из емкости C и сопротивления r , третья - из сопротивления R . Суммарная емкость схемы равна

$$C_0 = C_{\infty} + C, \quad (3.9)$$

где $C = C_0 - C_\infty$ - емкость поляризационных процессов в изоляции, по которой течет абсорбционный ток $i_{абс} = (U / r) e^{-t/T}$, изменяющийся с постоянной времени T .

Через емкость C_∞ протекает импульс тока i_∞ заряда емкости или ток поляризации, которые считаются мгновенными. Релаксационные поляризации характерны для оценки не только абсорбционного тока, но и тока сквозной проводимости $i_{пр} = U / R$, протекающего через сопротивление R и обусловленного сквозными путями утечки в изоляции при образовании мостика из влаги.

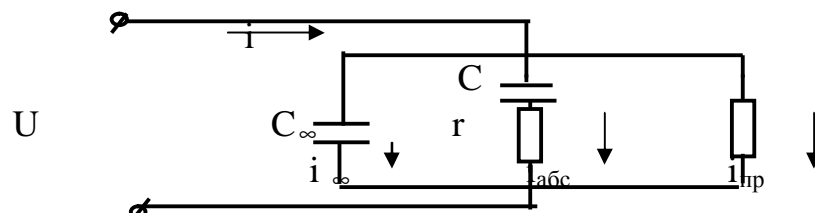


Рис. 3.4. Схема замещения изоляции

На схеме замещения и измерения токов по ветвям рис. 3.4 можно рассмотреть многие из способов контроля изоляции не разрушающим методом. Поляризационные явления, как и каналы сквозной проводимости, связываются в основном с увлажнением изоляции. Поэтому качество ее определяется по оценке токов в схеме замещения рис. 3.4.

3.8. Измерение сопротивления изоляции или сквозной проводимости

Сопротивление изоляции по схеме замещения рис. 3.4, определяемое

как $R_{из} = U / i$, где $i = i_\infty + i_{абс} + i_{пр}$, растет, если ток i спадает во времени.

К моменту времени $T = 1$ мин после приложения напряжения U сопротивление $R_{из}$ достигает установившегося значения. Резкое падение сопротивления показывает на далеко зашедшее развитие дефекта или наличие сквозной проводимости в изоляции. Чем больше изоляция содержит посторонних включений, в частности, чем больше она увлажнена, тем меньше отношение R_{60} / R_{15}

в моменты времени $t_1 = 15$ с и $t_2 = 60$ с, когда измеряются сопротивления от токов $i_{\text{абс}}$ и $i_{\text{пр}}$.

Измерение сопротивления изоляции осуществляется мегаометром, состоящим из маломощного генератора постоянного тока с напряжением 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 кВ и ручным или электронным приводом, позволяющим вращать ручку с редуктором со скоростью 120 оборотов в мин.

3.9. Измерение угла диэлектрических потерь

Поляризационные токи, протекающие через диэлектрик, разогревают изоляцию, что соответствует потере энергии, называемой диэлектрической. При промышленной частоте такие потери происходят за счет релаксационных поляризаций или токов $i_{\text{абс}}$ и $i_{\text{пр}}$ по рис. 3.4, т.е. активной и емкостной суммарной составляющих токов, а в векторной диаграмме между этими составляющими появиться угол δ . Отношение тока активного I_a к току емкостному I_c равно $\text{tg}\delta$, что является характеристикой диэлектрических потерь в изоляции, которые можно определить из выражения

$$W = U I \cos\varphi = U I \text{tg}\delta. \quad (3.10)$$

Поскольку токи сквозной проводимости малы, измерение угла δ диэлектрических потерь определяется параметрами ветви r C , т.е. угол δ является показателем посторонних включений и, в частности, увлажнения изоляции.

Величина $\text{tg}\delta$ не зависит от абсолютного значения емкости объекта, а зависит от отношения C_0 / C_∞ . Поэтому $\text{tg}\delta$ становится универсальным показателем качества изоляции, не зависимым от ее габаритов.

Для объектов емкостью порядка 200 - 300 пФ (например, вводы трансформаторов тока или внешняя изоляция, различные изоляторы) значение $\text{tg}\delta$ харак-

теризует общее состояние изоляции и может отметить развивающийся местный дефект.

Для объектов емкостью выше 2000 пФ (например, изоляция крупных генераторов, электродвигателей, трансформаторов, кабелей и т.д.) значение $\text{tg}\delta$ указывает, на увлажнение изоляции, на общее старение, частичное разрушение (микротрещина) и т.п. Такие дефекты в изоляции, как весьма развитые металлические включения или мостики повышенной проводимости, могут быть обнаружены и на постоянном токе.

Величина $\text{tg}\delta$ и сквозная проводимость растут с увеличением температуры, поэтому эти параметры нормируются при температуре 20 °С.

Измерение $\text{tg}\delta$ изоляции осуществляется высоковольтными мостами по схеме Шеринга типа Р-5026 с рабочим напряжением 5 или 10 кВ промышленной частоты.

3.10. Измерение емкостных характеристик изоляции

При неизменной температуре и частоте емкость объекта остается постоянной. Если она изменяется скачкообразно, то это крупный, развитый дефект в изоляции, такой как включение, шунтирующее часть изоляции.

Для увлажненной изоляции в крупных объектах оценка емкости может оказаться зависящей от частоты, т.к. C_∞ минимальна при $\omega \rightarrow \infty$ и C максимальна при $\omega \rightarrow 0$. С одной стороны, чем больше увлажнение в изоляции или содержание посторонних проводящих включений, тем выше емкость $C = C_0 - C_\infty$. С другой стороны, посторонние включения не влияют практически на емкость C_∞ . Измерение емкости объекта можно вести при двух частотах - низкой C_H и высокой C_B , а отношение C_H / C_B покажет качество изоляции. Для

сухой изоляции $C_2/ C_{50} = 1,2 - 1,3$, а по мере ее увлажнения отношение C_2/ C_{50} , измеренное на частотах 2 и 50 Гц, возрастает.

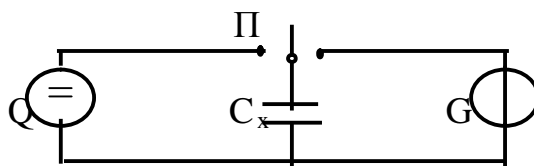


Рис. 3.5. Принципиальная схема измерения емкости изоляции

Принцип действия прибора, оценивающего качество изоляции, приводится на рис. 3.5. Переключатель П в левой части заряжает емкость C_x объекта (изоляции) от источника постоянного напряжения Q в несколько сотен вольт, а в правой части разряжает C_x на гальванометр G. Переключение происходит на частотах 2 и 50 Гц. Средний ток разрядки емкости изоляции находится как

$$i = q f = C \omega U f. \quad (3.11)$$

Этот способ измерения получил название "емкость-частота".

Измерение абсорбционной емкости возможно и способом "емкость-время", когда измеряется мгновенное значение емкости через 1 мкс и 0,5 - 1 с после приложения зарядного напряжения или после разряда. Таким образом, оценивается в первом случае геометрическая емкость C_∞ , а во втором - абсорбционная емкость ($C_0 - C$) изоляции. Отношение

$$\Delta C / C_\infty = (C_0 - C_\infty) / C \quad (3.12)$$

служит характеристикой изоляции.

3.11 Распределение напряжения по элементам изоляционной конструкции

В изоляционных конструкциях, таких как гирлянда изоляторов, колонка опорных изоляторов, рабочее напряжение распределяется по ряду элементов

или по емкостям собственных изоляторов C , а так же по частичным емкостям относительно земли C_3 и токоведущих частей $C_{п}$ согласно рис. 3.6.

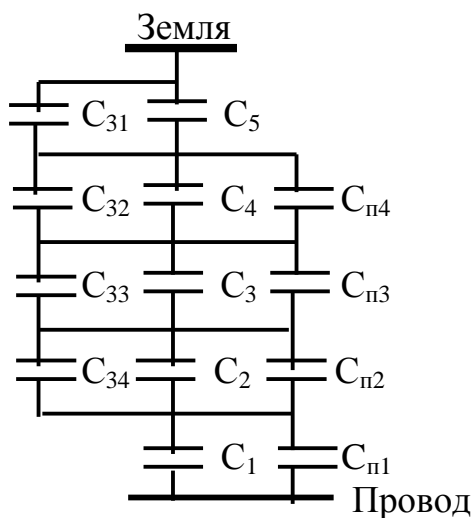


Рис. 3.6. Схема замещения изоляционной конструкции

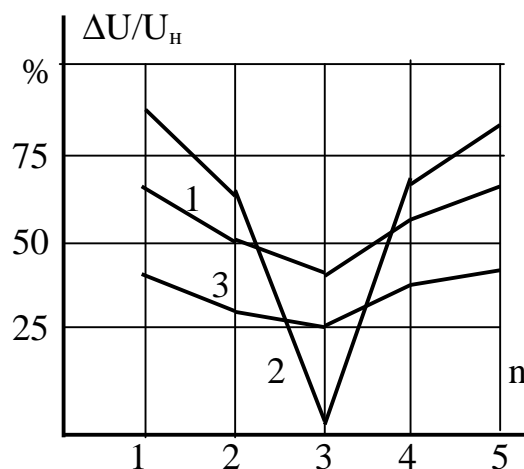


Рис. 3.7. Распределение напряжения по элементам изоляционной конструкции

Нормальное распределение ΔU при U_n рабочем напряжении изоляционной конструкции представлено кривой 1 на рис. 3.7. При резком изменении сопротивления изоляции (например, нарушение структуры - микротрещина) распределение напряжения по элементам конструкции искажается в сторону дефектного ("нулевого") изолятора согласно кривой 2 на рис. 3.7. Более равномерное распределение напряжения U_n по элементам конструкции отмечается с вводом на концы изоляционной конструкции защитных устройств из металла в виде рогов, колец, восьмерок, которые увеличивают емкости от $C_{п1}$ до $C_{п4}$, снижая токи утечки на землю и токоведущий участок согласно рис. 3.7, кривая 3.

Способ измерения напряжения, распределенного по элементам изоляционной конструкции, ведется под рабочим напряжением с помощью измерительной штанги. Щупы штанги переносятся от элемента к элементу, пооче-

редно измеряют напряжение на изоляторе и сравнивают с нормальным, а отклонение от нормального распределения укажет дефектный изолятор.

3.12. Измерение частичных разрядов в изоляции

Воздушные и газовые включения являются распространенными сосредоточенными дефектами в изоляции. Поскольку диэлектрическая проницаемость воздуха меньше, чем у диэлектрика, то напряженность поля в газовой полости значительно превосходит среднюю напряженность поля в полости изоляции. Поэтому в газовой полости даже при рабочем напряжении возникают ионизационные процессы, что называется частичным разрядом. Такой разряд вызывает импульс тока длительностью порядка $10^{-7} - 10^{-8}$ с, снижение амплитуды рабочего напряжения и распространение в окружающее пространство электромагнитных волн частотой от 10 кГц до 100 МГц.

Во внешней электрической цепи частичный разряд может быть обнаружен и измерен путем:

- оценки напряжения на объекте;
- регистрации импульса тока в цепи;
- оценки интенсивности электромагнитных волн.

Обнаружение колебаний напряжения или тока во внешней электрической цепи осуществляют индикаторы частичных разрядов (ИЧР), которые включаются непосредственно в испытательную схему. Наличие частичных разрядов можно обнаружить под рабочим напряжением во время эксплуатации изоляционной конструкции. С этой целью применяются высокочастотные дефектоскопы, которые имеют с объектом индуктивную связь через специальный щуп. Ток, проходящий в цепи заземления объекта, наводит в рамке щупа электродвижущую силу, которая измеряется с помощью осциллографа или электронного вольтметра.

Другая разновидность приборов позволяет обнаружить частичный разряд с помощью индикатора радиоизлучения частичного разряда (ИРИ). При таком способе электромагнитные волны, излучаемые частичным разрядом, воспринимаются с помощью антенны, т.е. четко пеленгуют источник излучения. Однако при измерении параметров источника излучения возможна ошибка в распознавании того, коронное это явление или частичный разряд в газовой полости изоляции, а трудности, связанные с наличием большого количества помех, усложняют расшифровку результатов.

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений /Под ред. В.П. Ларионова. - М.: ЭАИ, 1986.- 464 с.
2. Техника высоких напряжений /Под ред. Д.В. Разевига. - М.: Энергия, 1976.- 488 с.
3. Техника высоких напряжений /Под ред. М.В. Костенко. - М.: Высш. шк., 1973. - 528 с.
4. Долгинов А.И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике. - М.: Энергия, 1968. - 468 с.
5. Разевиг Д.В. Методы теории вероятностей в технике высоких напряжений. - М.: МЭИ, 1975. - 263 с.
6. Половой И.Ф., Михайлов Ю.А., Халлилов Ф.Х. Перенапряжения на электрооборудовании высокого и сверхвысокого напряжений - Л.: Энергия, 1975. - 255 с.
7. Правила устройства электроустановок. - М.: ЭАИ, 1985. - 640 с.
8. Лабораторные работы по технике высоких напряжений /М.А. Аронов, В.В. Базуткин, П.В. Борисоглебский и др. - М.: Энергия, 1974.- 320 с.

9. Алексеев С.А., Дробинский А.В., Козырев Н.А., Лифанов В.Н. Исследование безопасных испытательных перенапряжений изоляции высоковольтных электрических машин //Тр. ЛПИ. Электроэнергетика. – Л.: 1976, № 350.- С. 93-97.
10. Вольпов К.Д., Лифанов В.Н., Халлилов Ф.Х. и др. Исследование внутренних перенапряжений в сетях собственных нужд электростанций //Электрические станции.1976, № 8. - С. 60-64.
11. Домин О.И., Лифанов В.Н., Тырнов Ю.Н. Исследования, связанные с испытаниями твердой изоляции высоковольтных машин полупериодов 50 Гц //Тр. ЛПИ. Электроэнергетика. – Л.: 1979, № 367. - С. 92-95.
12. Лифанов В.Н., Лобанов М.П. Испытание изоляции крупных электрических машин повышенным напряжением /Деп. науч. работы – М.: ВИНТИ, 1988, № 1. N 936-эт.- С. 185.
13. Лифанов В.Н. Разрушающий метод испытания высоковольтной изоляции напряжением полупериода 50 Гц /Деп. науч. работы. – М.: ВИНТИ, 1988. № 2863-эн 77. Информэнерго.
14. Лифанов В.Н. Высоковольтное устройство для контроля качества изоляции //Внедрение мероприятий по снижению потерь и повышению устойчивости в энергетике Приморья /Прим. краев. упр. ВНТОЭ и Э. - Владивосток, 1988. - С. 5-9.
15. Базуткин В.В., Дмоховская Л.Ф. Расчеты переходных процессов и перенапряжений. - М.: ЭАИ, 1983. - 328 с.
16. Александров Г.Н., Иванов В.Л. Изоляция электрических аппаратов. - Л.: ЭАИ, 1984.- 208 с.
17. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. - Л.: Энергия, 1979. - 224 с.
18. Рябов Б.М. Измерение высоких импульсных напряжений. - Л.: ЭАИ, 1983. - 124 с.

19. Сви П.М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. - М.: Энергия, 1980.- 112 с.
20. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. - М.: ЭАИ, 1982. - 320 с.
21. Тиходеев Н.Н. Передача электрической энергии. / 2-е изд.- Л.: Энергия, 1979.- 304 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	
Глава 1. Электрические характеристики внешней изоляции	4
1.1. Процессы в газовом разрядном промежутке	4
Виды разрядов	4
Виды ионизации	5
Явления рекомбинации	7
Плазма	7
Коэффициент ударной ионизации	8
1.2. Механизм пробоя в малом искровом промежутке	9
Коэффициент вторичной ионизации	10
Разрядное напряжение в промежутке с равномерным электрическим полем.	
Закон Пашена	12
1.3. Корона и ее характеристики	13
Лавинная корона	13

Стримерная корона	14	
Особенности коронного разряда при постоянном и переменном напряжениях		15
Потери электроэнергии на корону при переменном напряжении	17	
Влияние короны на амплитуду перенапряжения	18	
1.4. Особенности разряда в малых промежутках	19	
Разряд в промежутке с резконеравномерным электрическим полем	19	
Барьерный эффект в разрядном промежутке	22	
1.5. Механизм развития разряда в длинных воздушных промежутках	24	
Лидерная стадия разряда	24	
Главный разряд в длинном промежутке	26	
Искра	26	
Дуга	27	
1.6. Разряд в газе вдоль поверхности твердого диэлектрика	29	
Разряд по сухой поверхности твердого диэлектрика	29	
Мокроразрядное напряжение на поверхности изолятора	31	
Меры предотвращения перекрытия поверхности изолятора	35	
1.7. Электрический пробой твердой изоляции	35	
Одно - и многокомпозиционные изоляционные конструкции	35	
Электрический пробой однокомпозиционной конструкции	36	
Электрический пробой твердой композиции	38	
Глава 2. Перенапряжения в электрических сетях	41	
2.1. Молния и ее характеристики	41	
Развитие молнии		41
Физическая картина разряда молнии	42	
Параметры разряда молнии	43	
2.2. Молниеводы и разрядные устройства	45	
Устройство и назначение молниеводов	45	

Зоны защиты стержневых молниеотводов	47
Зоны защиты тросовых молниеотводов	51
Заземлители и их характеристики	52
Разрядные устройства	55
2.3. Волновой процесс на электрооборудовании	62
Электромагнитная волна на линии без потерь	62
Преломление и отражение волн в узловой точке молнии	59
Волновой процесс в обмотке трансформатора	64
Внутренняя защита трансформаторов	73
Распределение волн в обмотках вращающихся машин	77
2.4. Грозозащита линий, распределительных устройств и электрических машин	78
Общие принципы грозозащиты ЛЭП	78
Грозозащита ЛЭП 110 кВ и выше	79
Грозозащита ЛЭП 35-220 кВ на деревянных опорах	81
Грозозащита ЛЭП 35 кВ на металлических и железобетонных опорах	81
Грозозащита ЛЭП 3-10 кВ	83
Заземление грозозащитных тросов через искровые промежутки	83
Общие принципы грозозащиты подстанций	84
Грозозащита подстанций от набегающих волн перенапряжения	85
Принцип выбора места установки разрядника для защиты изоляции оборудования	86
Оценка длины защитного подхода к подстанции	88
Грозозащита изоляции подстанций различного номинального напряжения	на- 89
Грозозащита изоляции электрических машин	92
2.5. Внутренние перенапряжения	94
Общие сведения	94

Отключение линии электропередачи с повторны зажиганием дуги	95
Перенапряжения при повторном включении ЛЭП	97
Отключение ненагруженных трансформаторов	98
Междуфазные коммутационные перенапряжения	99
Перенапряжения в сетях с изолированной нейтралью	100
Резонансные перенапряжения	102
Ограничения коммутационных и резонансных перенапряжений	103
Глава 3. Координация и контроль изоляции	108
3.1. Общие принципы координации изоляции	108
3.2. Координация изоляции по атмосферным перенапряжениям	109
3.3. Координация изоляции по внутренним перенапряжениям	110
3.4. Координация изоляции по длительным воздействиям	напря-
жения	111
3.5. Контроль за качеством изоляции	113
3.6. Испытание изоляции повышенным напряжением	114
Устройство для получения высокого напряжения	114
3.7. Неразрушающий метод контроля изоляции	119
3.8. Измерение сопротивления изоляции или сквозной	
проводимости	120
3.9. Измерение угла диэлектрических потерь	120
3.10. Измерение емкостных характеристик изоляции	122
3.11. Измерение распределения напряжения по элементам	изоля-
ционной конструкции	123
3.12. Измерение частичных разрядов в изоляции	124
4. Список используемых источников	126

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИЯ И ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

ЛИФАНОВ ВАЛЕРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

Учебное пособие

Редактор Е. Горовенко

Лицензия №	от	Подписано в печать
Формат	Бумага тип. № 1. Усл. печ. л.	Уч.- изд. л.
	Тираж 100 экз. Заказ	Цена «С».

Издательство ДВГТУ. Владивосток, ул. Пушкинская, 10
Лаборатория множит. техники ДВГТУ.