

ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ – БАКАЛАВРИАТ
серия основана в 1996 г.



В.Ф. ВАЖОВ
В.А. ЛАВРИНОВИЧ

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

УЧЕБНИК

Рекомендовано

Электронно-
Библиотечная
Система
znanium.com

*Соответствует
Федеральному государственному
образовательному стандарту
3-го поколения*

Москва
ИНФРА-М
2015

Авторы: Важов В. Ф., Лавринович В. А.

Техника высоких напряжений / Учебник для бакалавров направления 140200 "Электроэнергетика" — ТПУ, 2014. — 263 с.: ил.

В краткой форме в соответствии с современной программой высшей школы изложены основы техники высоких напряжений применительно к электроэнергетике. Освещены физические аспекты электроразрядных процессов в газообразных, жидких, твердых и комбинированных диэлектриках. Описаны конструкции внешней изоляции линий электропередач и подстанций; рассмотрены основные принципы построения изоляции оборудования высокого напряжения (силовых трансформаторов, высоковольтных конденсаторов, кабелей, электрических машин, коммутационных аппаратов); кратко освещены вопросы назначения и построения высоковольтных испытательных установок, испытания и измерения; а также описаны внутренние и атмосферные перенапряжения в электрических системах, меры и средства защиты от них.

Учебник предназначен для студентов получивших степень бакалавра техники и технологии по направлению «Электроэнергетика» и желающих повысить уровень своих знаний на следующей ступени обучения – в магистратуре – по направлению высоковольтная техника в электроэнергетике, также может быть полезен инженерно-техническим работникам предприятий, энергосистем и проектных институтов.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая книга является учебником для студентов, получающих степень бакалавра, по направлению «Электроэнергетика». Учебник состоит из четырех глав, охватывающих основополагающие разделы курса «Техника высоких напряжений»:

- электрические разряды в диэлектрических средах;
- высоковольтное испытательное оборудование;
- изоляция высоковольтного оборудования;
- перенапряжения в электрических системах.

Изложение материала базируется на основных положениях курсов общей физики, высшей математики, теоретических основ электротехники, электротехнических материалов. Изложение материала произведено с учетом последних достижений в рассматриваемых областях, а содержание соответствует утвержденным стандарту и программам подготовки бакалавров по направлению 140200 «Электроэнергетика».

Учебное пособие написано сотрудниками кафедры Электроэнергетические системы Энергетического института Томского политехнического университета.

Для более углубленного изучения отдельных разделов курса, в конце каждой главы представлен список литературы и контрольных вопросов.

Замечания и предложения по улучшению учебника просим направлять по адресу: 634050, г.Томск, ул. Усова, 7, ТПУ, ЭНИН, кафедра ЭЭС.

ВВЕДЕНИЕ

Высоковольтная техника занимает важное место в развитии электроэнергетики России 21 века при решении вопросов передачи все возрастающих мощностей электрической энергии на большие расстояния и обеспечения стабильной работы электроэнергетических систем. Основное предназначение высокого напряжения при электропередаче заключается в увеличении передаваемой мощности, которая возрастает пропорционально квадрату номинального напряжения. В связи с этим, большое значение приобретают вопросы создания нового и совершенствования существующего комплекса высоковольтного оборудования для генерирования, передачи и распределения электрической энергии: генераторов, трансформаторов, конденсаторов, изоляции линий электропередачи и подстанций.

Другое важное применение высоковольтной техники – использование в электрофизических установках для решения задач мощной импульсной энергетики: ускорителях пучков заряженных частиц, мощных лазерах, установках управляемого термоядерного синтеза. Высокое напряжение применяется в технологических процессах, таких как электросепарация, электрофильтрация, электроокраска, магнитоимпульсная обработка, электрогидравлическая штамповка, плазмохимия, озонирование. Особая роль принадлежит быстроразвивающейся области высоковольтной техники: синтезу наноструктурных материалов с принципиально новыми свойствами. Синтез таких материалов проводится в специальных установках при воздействии концентрированных потоков энергии в виде потоков плазмы и пучков заряженных частиц. Основным элементом таких спецустановок является высоковольтный импульсный генератор. В связи с этим изучение основ высоковольтной техники имеет важное научное и прикладное значение для дальнейшего прогресса в области электрофизики, для проектантов и разработчиков высоковольтного оборудования и для служб эксплуатации в электроэнергетике.

ГЛАВА 1

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕДАХ

1.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ

Газовые разряды в зависимости от давления газа, конфигурации электродной системы, мощности источника питания подразделяются на коронный, тлеющий, искровой, дуговой и т.д. Разряды в газах зажигаются благодаря ионизационным взаимодействиям электронов и фотонов с атомами и молекулами газа, приводящих к генерации и умножению электронов и ионов, и образованию плазмы.

1.1.1. Виды электрических полей

Многообразие видов электрических полей подразделяется на однородные, слабонеоднородные, резконеоднородные. Типичным примером однородного поля является поле между двумя плоско-параллельными электродами с закругленными краями, слабонеоднородное поле образуется в сферической системе электродов при расстоянии между электродами S меньше диаметра шара D ($S/D \leq 0,5$), резконеоднородное поле имеет место в электродной системе, когда один или оба электрода имеют малые радиусы кривизны – острие-плоскость или острие-острие. Степень неоднородности электрического поля, между электродами характеризуется коэффициентом неоднородности K_n , который равен отношению максимальной напряженности $E_{\text{макс}}$ к средней напряженности $E_{\text{ср}}$ поля между электродами:

$$K_n = \frac{E_{\text{макс}}}{E_{\text{ср}}}. \quad (1.1)$$

Средняя напряженность есть отношение напряжения, приложенного к электродам U к расстоянию между электродами S .

$$E_{\text{ср}} = \frac{U}{S}. \quad (1.2)$$

Максимальная напряженность зависит от геометрии электродов и расстояния между ними. Для однородного поля коэффициент неоднородности $K_n = 1$, для слабонеоднородного $K_n \leq 3$, для резконеоднородного $K_n > 3$.

Кроме этого различают симметричную и несимметричную форму включения электродов. Симметричная форма: электроды имеют одинаковую форму,

размеры и отсутствует заземление любого из них (рис. 1, а). Несимметричная форма: электроды имеют отличающуюся конфигурацию, размеры или один из них заземлен (рис. 1, б).

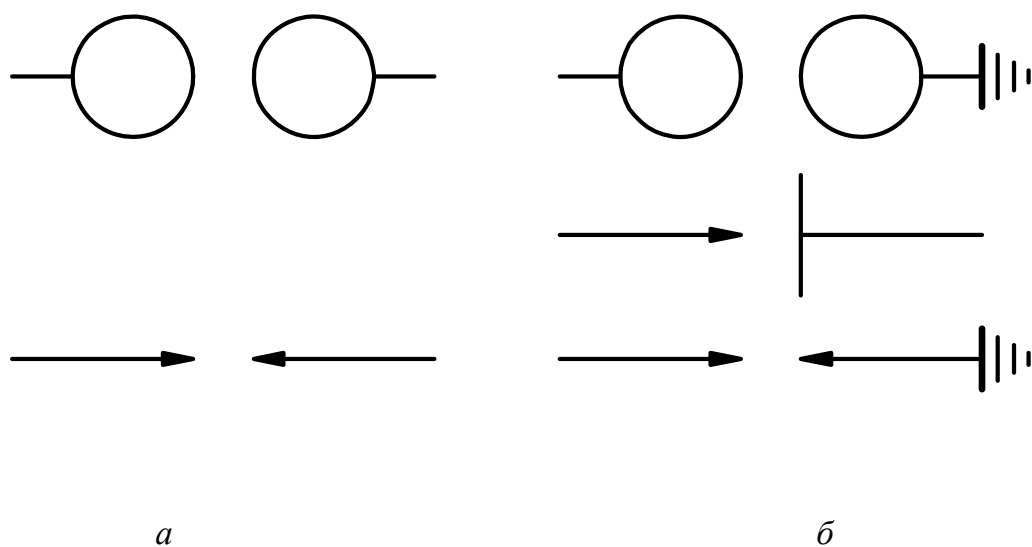


Рис. 1.1. Примеры форм электродов, создающих различные электрические поля: а) симметричная форма электродов; б) несимметричная форма электродов

1.1.2. Виды ионизации

В отсутствие внешнего электрического поля атомы и молекулы газа находятся в состоянии хаотического (теплового) движения, постоянно сталкиваясь между собой. Если на единице длины пути Z частиц газа испытали столкновение, то средняя длина свободного пробега λ равна:

$$\lambda = \frac{1}{Z}. \quad (1.3)$$

Значение параметра λ зависит от концентрации частиц газа и, следовательно, от давления и температуры газа. С увеличением давления газа и уменьшением температуры газа λ уменьшается. При температуре выше абсолютного нуля частицы газа перемещаются беспорядочно. Если в газе есть заряженные частицы, то при наличии внешнего электрического поля в газе возникает направленное движение заряженных частиц, т. е. электрический ток.

При относительно невысоких электрических полях и рассмотрении процессов возникновения и исчезновения свободных заряженных частиц в газе можно считать, что электроны являются частицами, и можно не учитывать их волновые свойства. Потенциальная энергия атома минимальна, когда электроны атомов находятся на ближайших к ядру орбитах, такое состояние атома является устойчивым. Переход одного или нескольких электронов с орбит ближайших к ядру на более удаленные от ядра, называется возбуждением атома. Энергию, необходимую для возбуждения, атом (молекула) может получить при

столкновении с другой частицей, например, с электроном, или при поглощении коротковолнового излучения (фотовозбуждение).

Время пребывания атома в возбужденном состоянии составляет величину порядка $\sim 10^{-10}$ с. Возвращение атома в устойчивое состояние происходит самопроизвольно и часто сопровождается излучением фотона.

Атом или молекула могут потерять электрон, когда последний удаляется от ядра настолько, что взаимодействие его с ядром практически исчезает. Такой электрон называется свободным. Процесс потери атомом или молекулой хотя бы одного электрона называется ионизацией. В результате ионизации образуются две независимые частицы: электрон и положительный ион. Энергия, необходимая для осуществления акта ионизации называется энергией ионизации. Энергия возбуждения и ионизации выражаются в электронвольтах (эВ). Минимальные энергии возбуждения и ионизации некоторых газов приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Значения минимальной энергии возбуждения и ионизации некоторых газов

Газ	Минимальная энергия, эВ	
	Возбуждение	Ионизация
N ₂	6,1	15,5
N	6,3	14,5
O ₂	7,9	12,5
O	9,1	13,6
H ₂ O	7,6	12,7

Может происходить процесс обратный ионизации – объединение иона и электрона в атом или молекулу. Этот процесс называется рекомбинацией. Вследствие действия двух противоположных факторов – ионизации и рекомбинации устанавливается равновесное состояние, при котором в единицу времени возникает и рекомбинирует одинаковое количество заряженных частиц. Это равновесное состояние характеризуется определенной степенью ионизации газа ψ , которая определяется отношением концентрации ионизированных частиц n к общей концентрации частиц N :

$$\psi = \frac{n}{N}. \quad (1.4)$$

Газ, в котором значительная часть атомов и молекул ионизирована, проводит электрический ток, называется плазмой. Концентрация положительных и отрицательных зарядов в плазме примерно одинакова.

При столкновении электрона с нейтральным атомом или молекулой возможен захват ими электрона и образование отрицательного иона. Газы, в которых возможно образование отрицательных ионов, называются электроотрицательными (кислород, хлор, пары воды и др.), а газы, в которых отрицательные ионы не образуются, – электроположительными (азот, гелий).

Если к промежутку между электродами в газе приложено напряжение, то заряженные частицы, кроме тепловой скорости, приобретают под действием электрического поля направленную скорость. Если электрическое поле велико, то приобретенная кинетическая энергия частиц может стать достаточной для ударной ионизации атомов. Энергия электронов и ионов W_E определяется как:

$$W_E = eE\lambda, \quad (1.5)$$

а условие ионизации может быть записано в виде:

$$eE\lambda = \frac{mV^2}{2} \geq W_{и}, \quad (1.6)$$

где: e – элементарный заряд,

E – напряженность электрического поля,

m – эффективная масса заряженной частицы,

V – скорость движения заряженных частиц,

$W_{и}$ – энергия ионизации нейтрального атома или молекулы.

Так как скорость электронов *значительно* больше скорости ионов, то ударная ионизация ионами, несмотря на их большую массу, малоэффективна, и определяющей является ионизация электронным ударом.

Различают объемную ионизацию и эмиссию заряженных частиц с поверхности электродов (поверхностную ионизацию).

Объемная ионизация – совокупность различных ионизационных процессов в межэлектродном пространстве.

Эмиссия – испускание заряженных частиц поверхностью электродов.

Объемная ионизация в свою очередь, подразделяется на следующие виды:

- ударная ионизация электронами,
- ступенчатая ионизация электронами,
- фотоионизация,
- термоионизация.

Ударная ионизация – образование иона при соударении электрона с нейтральным атомом или молекулой (рис. 1.2, *a*). Условие ударной ионизации

электроном: кинетическая энергия электрона больше или равна энергии ионизации атома или молекулы ($\frac{m_e V_1^2}{2} \geq W_u$).

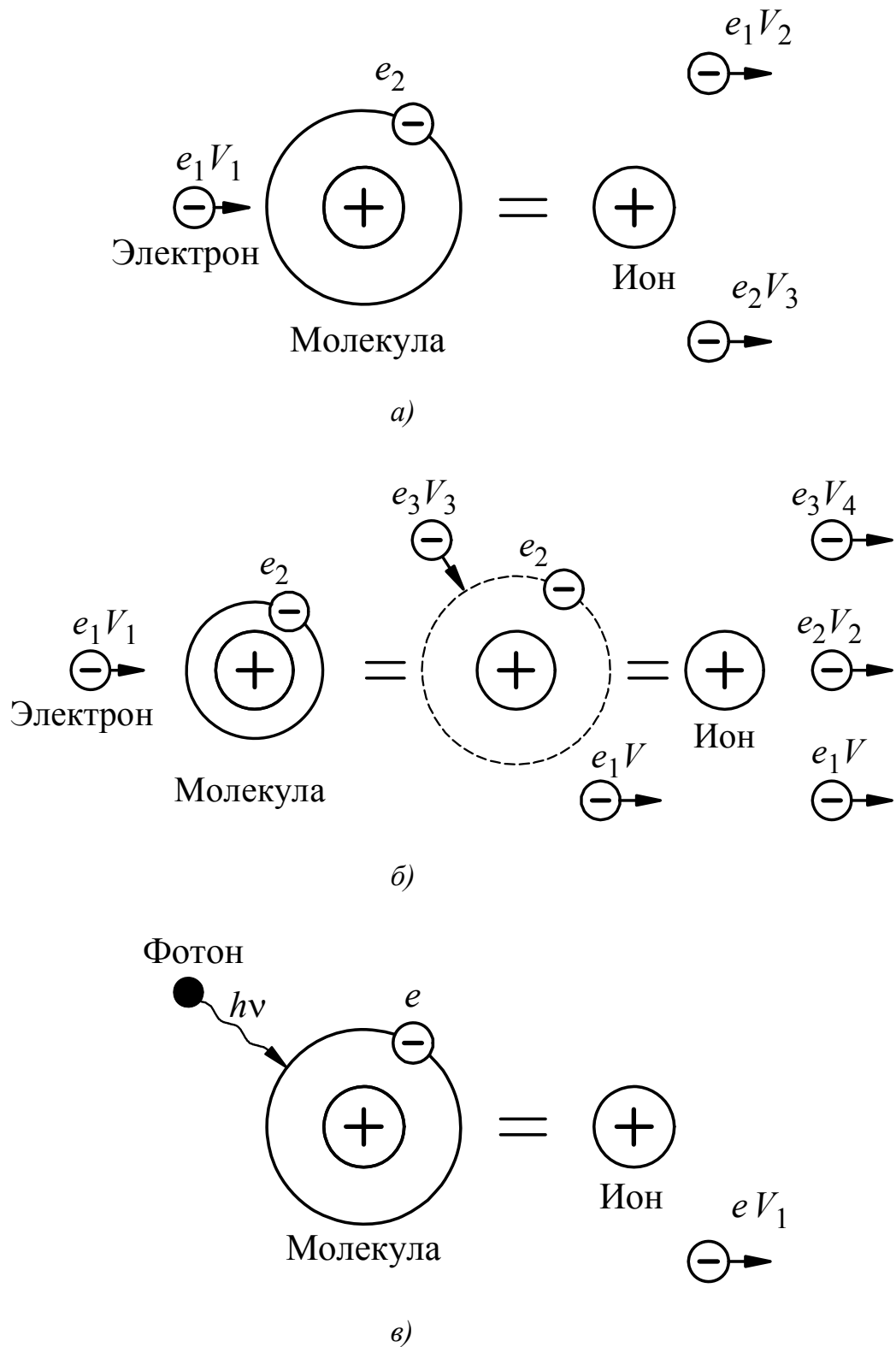


Рис. 1.2. Схемы объемной ионизации

Ступенчатая ионизация происходит тогда, когда энергия первого воздействующего на нейтральный атом или молекулу электрона приводит частицу только в возбуждённое состояние, т.е. недостаточна для ионизации. Воздействие следующего электрона (одного или нескольких) на возбуждённый атом или молекулу приводит к ионизации (рис. 1.2, б). Время между воздействием первого и последующего электронов должно быть не более времени нахождения нейтрального атома или молекулы в возбуждённом состоянии. Условие ступенчатой ионизации: сумма энергий воздействующих на атом или молекулу частиц, например электронов, больше или равна энергии ионизации данного атома или молекулы ($\frac{m_e V_1^2}{2} + \frac{m_e V_3^2}{2} \geq W_{и}$).

Для осуществления фотоионизации в объеме газа энергия фотонов, образованных в результате воздействия, например, космического или тормозного излучения, должна быть больше энергии ионизации при поглощении фотона нейтральным атомом или молекулой (рис. 1.2, в). Фотоионизация возможна в ступенчатой форме. Условие фотоионизации: энергия кванта больше или равна энергии ионизации данного атома или молекулы ($h\nu \geq W_{и}$, где h – постоянная Планка, ν – частота воздействующего излучения).

При высоких температурах газа возможна ионизация атомов или молекул при столкновениях между собой. Такая ионизация называется термоионизацией, она обусловлена тепловым состоянием газа и может происходить в результате высвобождения электронов при соударениях между атомами и молекулами. Термоионизация происходит при высоких температурах газа. В газах при тепловом движении возможна **диссоциация** молекул. Диссоциация (от лат. dissociatio – разделение, разъединение), процесс, заключающийся в распаде молекул на несколько более простых частиц – молекул, атомов, радикалов или ионов. Обычно различают три вида диссоциации: термическая диссоциация, происходящая при повышении температуры, электролитическая диссоциация, происходящая при растворении электролитов (расщепление молекул электролитов на ионы) и фотохимическая диссоциация, наблюдающаяся при действии света. Количественной характеристикой диссоциации служит степень диссоциации — отношение числа распавшихся молекул к общему числу молекул. Обычно в газах диссоциация происходит при меньшей энергии, чем ионизация.

В табл. 1.2 в качестве примера приведены значения энергии диссоциации и ионизации для некоторых газов.

Таблица 1.2

Значения энергии диссоциации и ионизации некоторых газов

Молекула	Энергия диссоциации, эВ	Атом	Энергия ионизации, эВ
O ₂	5,17	O	13,6
N ₂	9,77	N	14,5

Эмиссия электронов с поверхности может осуществляться за счет:

а) бомбардировки поверхности катода положительными ионами (вторичная эмиссия) (рис. 1.3, а). Условие эмиссии при бомбардировке поверхности катода положительными ионами: энергия бомбардирующего иона выше работы выхода электрона с поверхности катода ($\frac{m_{\text{и}}V_{\text{и}}^2}{2} > W_{\text{вых}}$, где $W_{\text{вых}}$ – работа выхода, характерная для данного металла);

б) облучения катода коротковолновым источником света (ультрафиолет, рентгеновское, лазерное излучение). Такой вид эмиссии называется фотоэмиссией (рис. 1.3, б). Условие фотоэмиссии: энергия кванта источника облучения выше работы выхода электронов с поверхности катода ($h\nu \geq W_{\text{вых}}$);

в) нагрева поверхности катода. Испускание электронов нагретыми телами называется термоэлектронной эмиссией (рис. 1.3, в). Условие термоэлектронной эмиссии: плотность подводимой энергии на единицу поверхности больше энергии выхода электронов с поверхности металла ($j = AT^2 e^{-\frac{W_{\text{вых}}}{KT}}$, где A – постоянный множитель, T – абсолютная температура, K – постоянная Больцмана, $W_{\text{вых}}$ – работа выхода, характерная для данного металла);

г) воздействия внешнего электрического поля – автоэлектронная или холодная эмиссия (рис. 1.3, г) (в западной терминологии – полевая эмиссия – field emission). Условие автоэлектронной эмиссии: напряжённость внешнего электрического поля на поверхности катода приводит к туннелированию электронов сквозь потенциальный барьер. Обычно требуется напряжённость внешнего электрического поля порядка $10^7 \dots 10^8$ В/см.

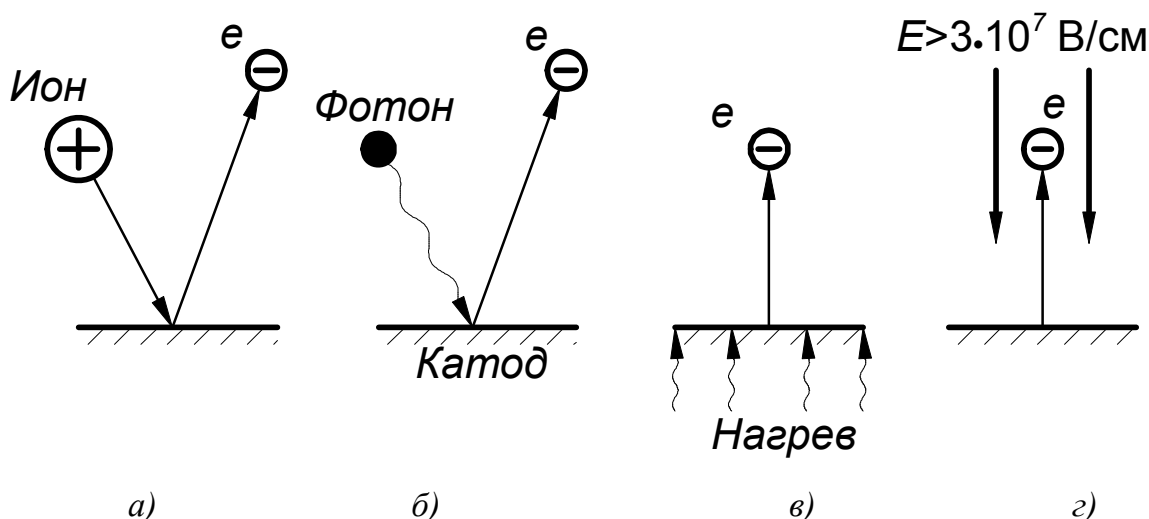


Рис. 1.3. Схемы различных видов эмиссии

В общем случае для реализации эмиссии необходимо, чтобы энергия воздействия на поверхность катода была больше энергии выхода электрона из катода $W_{\text{вых}}$. Энергия $W_{\text{вых}}$ ниже энергии ударной ионизации примерно в 2...10 раз. Для медных и стальных электродов в воздухе $W_{\text{вых}} \approx 4,5$ эВ.

1.1.3. Лавина электронов

Если в газе между двумя электродами появляется свободный электрон, то, набирая энергию при движении к аноду, согласно условию (1.5), он может ионизировать атом или молекулу газа при столкновении. В результате этого, многократно повторяющегося процесса появляются новые свободные электроны, число которых непрерывно растет. Этот лавинообразный процесс называют лавиной электронов.

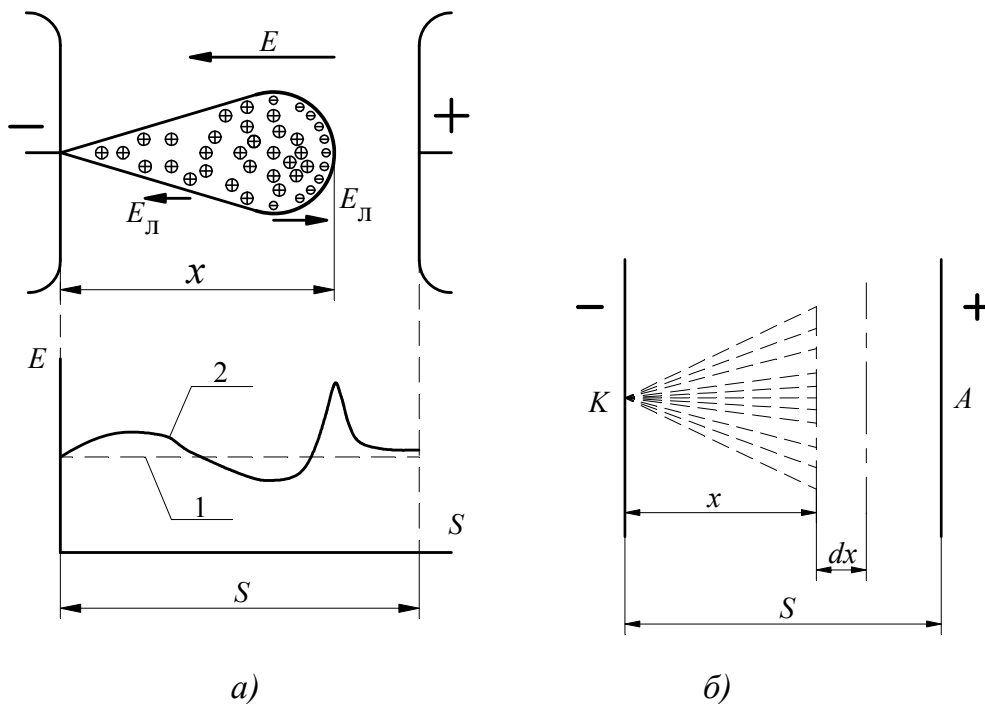


Рис. 1.4. Схема развития лавины: а – внешний вид распределения зарядов в лавине, б – схема определения числа электронов в лавине

Интенсивность размножения электронов в лавине характеризуется коэффициентом ударной ионизации α , который равен числу ионизаций, производимых электроном на единице длины пути в 1 см по направлению электрического поля.

При развитии лавины одновременно с электронами образуются положительные ионы. Подвижность ионов значительно меньше, чем электронов, и за время развития лавины они практически не успевают переместиться в промежутке к катоду. Таким образом, после прохождения лавины электронов в газе остаются положительные, а в электроотрицательных газах и отрицательные ионы, которые искажают (уменьшают или увеличивают) внешнее электрическое поле в промежутке.

Для описания процесса образования электронной лавины, необходимо определить число электронов в лавине. Предположим, что из катода за счет

воздействия внешнего ионизатора эмитируется n_0 электронов. На расстоянии X от катода число электронов возросло до n (рис. 1.4).

Увеличение числа электронов на пути dx будет равно

$$dn = n_0 \alpha dx, \quad (1.7)$$

или

$$dn/n_0 = \alpha dx. \quad (1.8)$$

Интегрируя (1.8) по n от n_0 до n и по x от 0 до x , получим

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n_0} = \int_0^x \alpha dx. \quad (1.9)$$

В однородном поле, где коэффициент ударной ионизации $\alpha = const$, т.к. напряженность в любой точке промежутка одинакова, будем иметь:

$$\ln \frac{n}{n_0} = \alpha x \quad \text{или} \quad n = n_0 e^{\alpha x}. \quad (1.10)$$

Выражение (1.10) дает значение электронов в лавине без учета их прилипания к нейтральным атомам и молекулам. Прилипание – это процесс захвата нейтральной частицей электрона с образованием отрицательного иона. Это явление характеризуется коэффициентом прилипания η . Тогда число электронов в лавине с учетом прилипания будет равно:

$$n = n_0 e^{(\alpha - \eta)x}. \quad (1.11)$$

После прохождения первой лавины в промежутке лавинный процесс может возобновиться, а может и затухнуть. Для возобновления развития лавины нужен хотя бы один вторичный эффективный электрон. Эффективным называется электрон, способный к осуществлению ионизационного размножения. Если этот электрон появляется от внешнего ионизатора – разряд называется самостоятельным. То есть, в отсутствии внешнего ионизатора развитие лавины не возобновится, и разряд погаснет. Если же вторичный, эффективный электрон возникает в результате прохождения первичной лавины – разряд называется самостоятельным. Несамостоятельный разряд может перейти в самостоятельный, если увеличить приложенное к электродам напряжение.

При самостоятельной форме разряда развитие лавины возобновляется, поскольку первичная и последующие лавины создают условия для их возобновления. Эти условия состоят в следующем:

1) возбужденные атомы и молекулы, образующиеся наряду с ионизацией, испускают фотоны, которые могут приводить к фотоионизации или к фотоэмиссии электронов из катода. Вторичные электроны могут образовывать лавины в разрядном промежутке;

2) оставшиеся после прохождения лавины положительные ионы, двигаясь к катоду, бомбардируют его и вызывают вторичную эмиссию электронов из катода.

Количество положительных ионов $n_{и}^+$, оставшихся в промежутке после прохождения лавины, равно количеству электронов в лавине, исключая начальный электрон, т. е.:

$$n_{и}^+ = e^{(\alpha-\eta)S} - 1. \quad (1.12)$$

Не все эмитированные из катода электроны участвуют в образовании вторичных лавин, часть электронов рекомбинирует с положительными ионами. Суммарный процесс образования вторичных электронов из катода, которые могут участвовать в процессах вторичной ионизации, характеризуется коэффициентом вторичной эмиссии γ . Коэффициент γ зависит от материала катода, состава и давления газа и всегда $\gamma \ll 1$. Количество вторичных электронов, образованных после прохождения лавины, определяется следующим соотношением:

$$\gamma(e^{(\alpha-\eta)S} - 1) \geq 1. \quad (1.13)$$

Уравнение (1.13) есть условие самостоятельности разряда в газовом промежутке. Оно показывает, что после прохождения первичной лавины необходимо, как минимум, образование одного эффективного электрона, способного привести к появлению вторичной лавины, и, соответственно, может развиваться лавинный разряд в газе. Такая форма разряда характерна для пониженных давлений.

1.1.4. Стримерная форма разряда

Лавинная форма самостоятельного разряда в однородном поле, для которой характерна ионизация во всем объеме газа, имеет место, если произведение $\alpha \cdot x$, определяющее число электронов в отдельной лавине, относительно невелико – не превышает несколько единиц. Характер процесса качественно меняется, если упомянутое произведение становится близким и превышает 18-20, а число электронов лавины, прошедшей путь x и определяемое по формуле $n_e = \exp(\alpha \cdot x)$, превышает $n_{кр} \geq 10^8 \div 10^9$. При этих условиях разряд переходит в новую форму – стримерную. Такая форма разряда характерна для атмосферных давлений и больших напряжений.

Стримерная теория газового разряда основана на представлении о проращении между электродами плазменного канала – стримера. Стример представляет собой светящийся слабоионизованный, тонкий канал, который образу-

ется в результате слияния электронных лавин и распространяется в ту или другую или в обе стороны к электродам. Рассмотрим несколько подробнее переход от лавинной формы разряда к стримерной.

В ходе развития лавины непрерывно увеличивается число электронов и положительных ионов. С увеличением числа электронов в головке лавины возрастает напряженность на фронте лавины. Критерием перехода лавинного разряда в стримерный (лавинно-стримерный переход) является критическое число электронов в лавине. Расчеты показывают, что при числе электронов $n_{кр} \geq 10^8 \div 10^9$ лавина переходит в стример. Для накопления такого количества электронов лавина должна пройти определенное критическое расстояние $x_{кр}$. Необходимо отметить, что $x_{кр}$ зависит от давления газа и его состава. Когда расстояние между электродами $S > x_{кр}$, разряд приобретает стримерную форму. Когда лавина, развивающаяся от катода, достигнет критической длины $x_{кр}$, напряженность электрического поля в ее хвосте недостаточна, чтобы электроны могли производить ионизацию, тогда образуется стример. А на фронте лавины поле значительно усиливается и становится возможной фотоионизация в объеме (рис. 1.5). Вторичные лавины, следуя вдоль силовых линий поля и имея на головке избыточный отрицательный заряд (электроны), втягиваются в область положительного объемного заряда, оставленного первичной лавиной. Электроны вторичных лавин смешиваются с положительными ионами первичной лавины и образуют стример – область с наибольшей плотностью тока, которая, разогреваясь, начинает светиться.

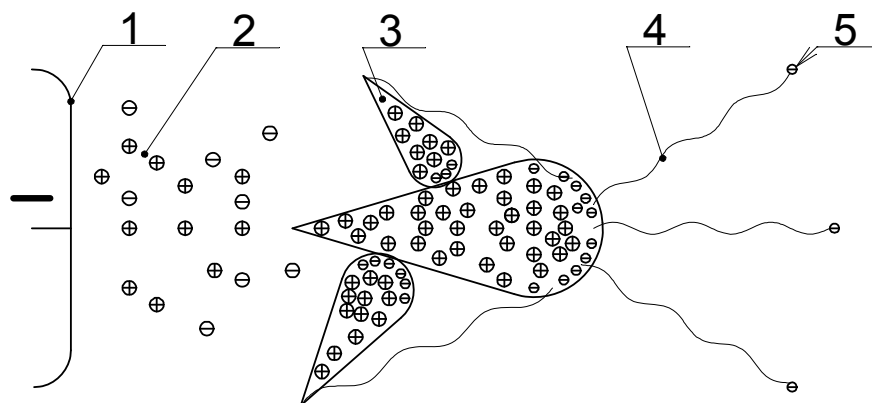


Рис. 1.5. Механизм развития положительного стримера: 1 – анод; 2 – канал стримера; 3 – лавины; 4 – фотоны; 5 – электрон, появившийся за счёт фотоионизации

Стримерная форма разряда в коротких промежутках завершается, когда стримеры замыкают промежуток, и в результате образуется искровой канал.

1.1.5. Искровой разряд

Если постепенно увеличивать напряжение между двумя электродами, находящимися в атмосферном воздухе, то возникает искровой разряд. Электри-

ческая искра имеет вид ярко светящегося канала, соединяющего оба электрода, который обычно бывает разветвлен. Искровой разряд возникает в том случае, если электрическое поле в газе достигает некоторого определенного значения E_k (критическая напряженность поля или напряженность пробоя), которая зависит от рода газа и его состояния. Значение E_k возрастает с увеличением давления. Отношение критической напряженности поля к давлению p для конкретного газа остается приблизительно постоянным в широкой области изменения давлений:

$$E_k / p \approx \text{const}. \quad (1.14)$$

Напряжение пробоя понижается при воздействии на газ внешнего ионизатора. Если приложить к газовому промежутку напряжение, несколько меньшее пробивного, и воздействовать внешним ионизатором (освещение отрицательного электрода излучением ультрафиолетовой области спектра, инжекция электронного пучка в разрядный промежуток, а также другие ионизаторы), то возникает искровой разряд.

Зажигание искрового разряда происходит по следующей схеме: благодаря наличию эффективных электронов в межэлектродном промежутке формируются начальные электронные лавины, при выполнении критерия лавинно-стримерного перехода образуются стримеры. Концентрация электронов в канале в момент его возникновения находится на уровне $n_e \approx 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Частота столкновений электронов с молекулами газа составляет $\approx 10^{12} \text{ с}^{-1}$. Сопротивление канала оценим как для цилиндрического проводника:

$$R = \rho l_k / S, \quad (1.15)$$

где ρ – удельное сопротивление канала, l_k – длина канала, S – сечение канала ($10^{-8} \div 10^{-7} \text{ м}^2$). Расчеты показывают, что сопротивление канала искрового разряда длиной 10^{-2} м имеет порядок $10^4 \div 10^5 \text{ Ом}$. Если внутреннее сопротивление генератора много меньше этого значения, то напряжение на промежутке после замыкания его стримером близко к начальному. Спад напряжения при одновременном росте тока в цепи происходит из-за снижения сопротивления канала вследствие его расширения и роста проводимости плазмы.

Процессы в искровом разряде достаточно сложны: вначале ионизация распространяется по оси канала в виде волны (волна ионизации) со скоростью более 10^8 см/с , затем рост концентрации электронов происходит однородно по длине. Эти процессы описываются моделью Ромпе-Вайцеля, по которой сопротивление канала:

$$R = \frac{l_k}{\sqrt{\frac{2a}{p} \int I^2 dt}}, \quad (1.16)$$

где: R – сопротивление канала, a – постоянная, зависящая от давления газа, p – давление газа, I – ток разряда.

Модель Ромпе-Вайцеля описывает изменение концентрации электронов в диапазоне $10^{21} \div 10^{24} \text{ м}^{-3}$ при плотностях тока выше 10 А/см^2 . Необходимо отметить, что сопротивление канала не зависит от его сечения, так как концентрация электронов, а следовательно и проводимость плазмы при заданном токе обратно пропорциональны сечению.

1.1.6. Закон Пашена

Выполнение условия самостоятельности разряда (1.13) в однородном поле означает пробой всего промежутка. Приняв $\eta = 0$ и приравняв (1.13) единице, получим:

$$\gamma(e^{\alpha S} - 1) = 1 \quad (1.17)$$

или

$$e^{\alpha S} = 1 + \frac{1}{\gamma}. \quad (1.18)$$

Прологарифмируем (1.18) и преобразуем относительно α

$$\alpha = \frac{\ln(1 + \frac{1}{\gamma})}{S}. \quad (1.19)$$

Экспериментально установлено, что:

$$\alpha = A \cdot P \cdot e^{-\frac{B P}{E}}, \quad (1.20)$$

$$A = \frac{\pi \cdot r^2}{K T}, \quad (1.21)$$

где: P – давление газа,

E – напряженность электрического поля,

A – коэффициент, зависящий от состава газа,

r – радиус молекул;

K – постоянная Больцмана;

T – температура в градусах Кельвина;

B – коэффициент, зависящий от энергии ионизации газа, причем,

$B = A \cdot U_{\text{и}}$, где $U_{\text{и}}$ – потенциал ионизации газа.

Приравняв выражение для α (1.19) и (1.20), получим:

$$\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = A_0 \cdot P \cdot S \cdot e^{-\frac{B_0 \cdot P}{E}}. \quad (1.22)$$

Подставив в (1.22) $E = U/S$, имеем:

$$\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = A_0 \cdot P \cdot S \cdot e^{-\frac{B_0 \cdot P \cdot S}{U}}. \quad (1.23)$$

Прологарифмируем (1.23), тогда:

$$\frac{B_0 \cdot P \cdot S}{U} = \ln \frac{A_0 \cdot P \cdot S}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}. \quad (1.24)$$

Поскольку нас интересует напряжение, при котором произойдет пробой, приравняем $U = U_{пр}$. Тогда из (1.24):

$$U_{пр} = \frac{B_0 \cdot P \cdot S}{\ln \frac{A_0 \cdot P \cdot S}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}}. \quad (1.25)$$

Из (1.25) видно, что разрядное напряжение в однородном поле является функцией произведения давления P на расстояние между электродами S , т.е.

$$U_{пр} = f(P \cdot S). \quad (1.26)$$

Выражение (1.26) графически представлено на рис. 1.6 и называется законом Пашена.

В приложении П1 приведены зависимости, соответствующие закону Пашена, для различных газов.

Вид этой зависимости можно объяснить, исходя из физических представлений. При $S = \text{const}$ увеличение давления больше значения, соответствующего минимуму, приводит к увеличению числа столкновений электрона с нейтральными атомами и молекулами и, как следствие, к уменьшению его энергии, накапливаемой на длине свободного пробега. Следовательно, для возникновения ударной ионизации необходимо увеличение напряжения $U_{пр}$.

С другой стороны, при давлениях меньших, чем значение, соответствующее минимуму кривой, увеличивается длина свободного пробега и накапливаемая электроном энергия, но уменьшается количество столкновений, что уменьшает вероятность ударной ионизации. Для ее увеличения необходимо, чтобы как можно большее число столкновений заканчивалось ионизацией. Для этого необходимо увеличивать энергию электрона на длине свободного пробега, т.е. увеличивать $U_{пр}$.

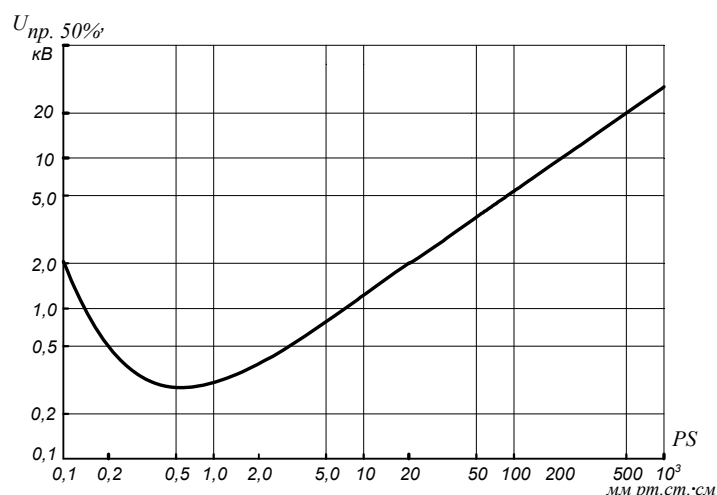


Рис. 1.6. Зависимость $U_{np} = f(P \cdot S)$

Экспериментальная кривая Пашена отличается от полученной расчетом как в области очень малых значений $P \cdot S$, так и в области очень больших значений $P \cdot S$. В области очень малых значений $P \cdot S$ отличие объясняется приближением к вакуумному пробую, при котором основную роль играют процессы на поверхности электродов, а не в объеме газа. При больших значениях $P \cdot S$ отличие объясняется увеличением степени неоднородности поля с возрастанием S .

Следствием закона Пашена являются способы повышения пробивного напряжения газов: необходимо или увеличение давления выше атмосферного или уменьшение давления до значений меньших, чем давление, соответствующее минимуму кривой, вплоть до вакуума. В однородном поле при атмосферном давлении прочность воздуха составляет 30 кВ/см, а минимальное значение $U_{np} \approx 300$ В.

1.1.7. Разряд в неоднородных полях

В неоднородном поле, в отличие от однородного, напряженность поля в различных точках промежутка разная по величине и/или по направлению. К типичным промежуткам с неоднородным полем относятся острие-острие, острие – плоскость, провод – земля, тороид – плоскость и многие другие реальные изоляционные промежутки. В них имеется точка на электроде, напряженность в которой превышает напряженность в остальных точках промежутка.

На рис. 1.7 приведена зависимость напряженности поля от радиуса кривизны и расстояния между электродами типа острие – плоскость при $r \ll S$. Электрическое поле в этом случае определяется как:

$$E = \frac{U}{r \ln \left(1 + \frac{4S}{r} \right)}. \quad (1.27)$$

Основные закономерности развития разряда в любых резконеоднородных полях ($K_n > 4$) практически одинаковы. При некотором напряжении U_k в промежутке возникает самостоятельный разряд в лавинной форме, т.к. вблизи стержня имеется область с напряженностью, превышающей значение E^* , соответствующее возникновению самостоятельной формы разряда (рис. 1.7). Разряд локализуется в этой области, а вторичные лавины поддерживаются либо за счет фотоионизации из объема газа и автоэлектронной эмиссии с катода (при положительной полярности стержня), либо за счет фотоэффекта с катода (при отрицательной полярности стержня). Такой разряд называется **коронным разрядом в лавинной форме (лавиная корона)**. Значение напряжения и напряженности поля у электрода при возникновении коронного разряда зависит от степени неоднородности поля.

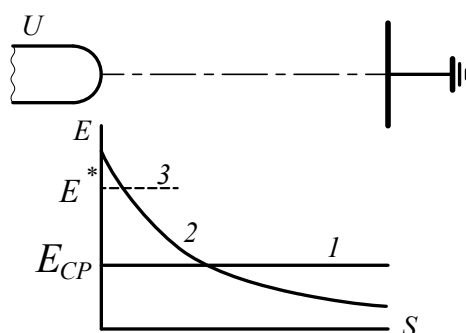


Рис.1.7. Зависимость напряженности электрического поля от расстояния между электродами типа стержень – плоскость. 1 – $E_{CP} \neq f(S)$; 2 – $E = f(S)$; 3 – E^* – возникновение самостоятельной формы разряда

При увеличении напряжения свыше U_k , когда количество электронов в лавине возрастает до $10^7 \div 10^8$, в промежутке возникает стример у электрода с повышенной напряженностью поля. Если в однородном поле возникший стример пересекает весь межэлектродный промежуток, то в резконеоднородном поле в зависимости от величины напряжения стример, пройдя некоторое расстояние, может остановиться, и заряды в плазме рекомбинируют. Этот процесс может повторяться. Такое состояние разряда устойчивое, т.е. выполняется условие самостоятельности разряда. Явление, когда стримеры не достигают противоположного электрода, получило название **коронного разряда в стримерной форме (стримерная корона)**. Для пробоя всего межэлектродного промежутка необходимо еще увеличить напряжение. Тогда образуется стримерный канал, который продвигается от электрода с повышенной напряженностью (острие) к противоположному электроду. После перемика промежутка стримерный канал трансформируется в искровой. Причем, пробой промежутка при положительной полярности электрода с малым радиусом кривизны (острие) происходит при меньших в (2-2,5 раза) напряжениях, чем при отрицательной. Это явление связано с влиянием поля объемного заряда в межэлектродном промежутке и называется **эффектом полярности**. При достаточной мощности источника тока искра, расширяясь, преобразуется в электрическую дугу.

В резконеоднородных полях напряжение пробоя всегда больше напряжения возникновения коронного разряда в любой форме.

1.1.8. Лидерный разряд в длинных промежутках

В длинных промежутках (десятки-сотни сантиметров и более) и резконеоднородных полях (коэффициент неоднородности поля $K_n \geq 3$) возникает **лидерный разряд**. От активного электрода из области сильного поля, по траектории, прокладываемой предшествующими стримерами (стримерной короной), прорастает канал, проводимость которого на 2-3 порядка выше, чем у стримера. Этот разрядный канал получивший название **лидер**, представляет собой волну ионизации, которая движется по подготовленной стримерами траектории со скоростью $10^8 \div 10^9$ см/с. После того, как лидер «догоняет» стримерный канал, происходит его остановка и расширение с одновременным снижением яркости свечения за счет уменьшения интенсивности рекомбинации. Высокая проводимость лидерного канала обеспечивает вынос потенциала на его головку, высокую напряженность поля, интенсивную ионизацию и непрерывное развитие стримеров. По мере прогрева одного из них, по нему развивается следующая волна ионизации – ступень лидера. Структура лидера показана на рис. 1.8. Диаметр канала вблизи головки 10^{-2} см. Сам лидерный канал оказывается окруженным «чехлом» пространственного заряда.

Основной причиной образования лидера в воздухе, т.е. условием **стримерно-лидерного перехода**, является повышение температуры газа приводящее к **термической ионизации**. Ток нагревает канал лидера до нескольких тысяч градусов.

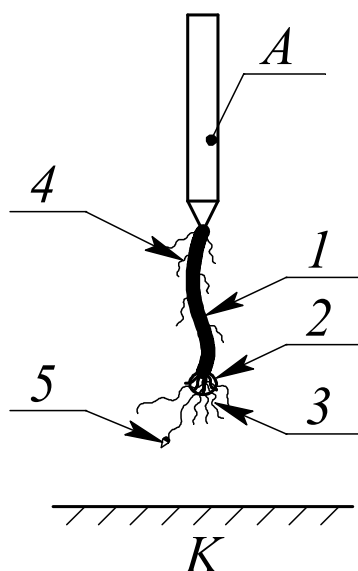


Рис.1.8. Схема лидера, прорастающего от положительного острого электрода. Структурные элементы: 1 – канал лидера; 2 – головка; 3 – стримерная корона; 4 – стримеры; 5 – чехол пространственного заряда.

меры чехла; 5 – лавина, втягивающаяся в головку стримера (показана только одна лавина у одного из многочисленных стримеров); А – анод; К – катод

Завершая рассмотрение лидерного процесса, укажем на сходства и различия двух плазменных образований - стримера и лидера. Лидер и стример - плазменные каналы, распространяющиеся во внешнем поле межэлектродного промежутка. Проводимости каналов сопоставимы, различаясь не более чем на один-два порядка. Плазма стримера склонна к потере проводимости, особенно в воздушных промежутках, плазма лидера – нет.

1.1.9. Молния

Молния – как форма газового разряда. Грандиозной формой газового искрового разряда является **молния**. Молния представляет собой лидерный разряд, при котором в качестве электродов разрядной системы выступают заряженное облако и Земля или два заряженных облака. Для образования молнии, как и осуществления любого разрядного процесса, необходимо наличие электрического поля. Электрическое поле в атмосфере Земли возникает в результате образования и пространственного разделения положительных и отрицательных зарядов за счет восходящих и нисходящих потоков в воздухе. Если поле между облаками или между облаком и землей достигает значения, достаточного для пробоя воздуха, происходит разряд. При хорошей погоде напряженность электрического поля у поверхности Земли в среднем составляет 100-150 В/м. Поверхность Земли заряжена отрицательно, а ионосферы – положительно. Значения удельного сопротивления воздуха у поверхности океана находятся в пределах $-10^{13} \div 10^{14}$ Ом·м, поэтому плотность тока в атмосфере достаточно мала - $3 \cdot 10^{-12}$ А/м².

Электризация в грозовом облаке. Первая научная гипотеза образования грозового облака была сформулирована М.В. Ломоносовым в далеком 1753 г. Согласно этой теории, которая актуальна и по сей день, грозовое облако образуется в процессе быстрого перемещения воздуха в вертикальном направлении и конденсации содержащейся в нем влаги при его охлаждении. Содержащиеся в облаке капли воды поляризуются в электрическом поле Земли и представляют собой диполи. Так как электрическое поле направлено к Земле, то на нижних частях капель накапливается положительный, а на верхних отрицательный заряд. При падении тяжелых капель положительные ионы воздуха отталкиваются, а отрицательные ионы захватываются такими каплями. Поэтому капли оказываются заряженными отрицательно. Мелкие капли, увлекаемые восходящим потоком, наоборот, заряжаются положительно. В результате нижняя часть облака оказывается заряженной отрицательно, а верхняя – положительно. Поэтому грозовое облако можно представить в виде большого диполя с зарядом, в среднем равном примерно 25 Кл. Измерения показали, что центр положительного заряда грозового облака находится на высоте 2-3 км, где температура составляет от 0 до –20 С.

Грозовой разряд. Для возникновения грозового разряда необходимо, чтобы напряженность электрического поля в некоторой области достигла нескольких киловольт на сантиметр. В зависимости от того, где возникает указанная напряженность, различают два вида молнии – нисходящая и восходящая. Если напряженность имеет место внутри облака, то возникает внутриоблачный разряд или разряд на Землю – нисходящая молния. Если напряженность поля сильно искажается у поверхности Земли, например высокими башнями или антеннами, то возникает молния, развивающаяся от Земли к облаку – восходящая молния. Световая вспышка молнии длится в среднем 200 мс. Она состоит из нескольких импульсов по 10 мс с интервалами примерно по 40 мс. Каждый импульс начинается с прорастания от облака к Земле *лидерного канала*.

Светится канал слабо, за исключением головной части. Лидер переносит отрицательный заряд (из отрицательного облака), при этом течет ток порядка 100 А. По мере приближения к Земле, канал начинает разветвляться, пути ветвей имеют зигзагообразную форму. Когда основной лидер достигает Земли, по его пути с огромной скоростью порядка 0,1 – 0,3 скорости света распространяется ярко светящийся канал – обратная волна. Это явление называется возвратным ударом или главной стадией молнии. Ток молнии при этом может достигать максимальной величины порядка 200 кА. **Именно с этим током связаны опасные воздействия молнии, вызывающие перенапряжения в линиях электропередач.**

От тепловыделения в разрядном канале молнии повышается давление, что служит источником ударной волны. Ударная волна переходит в акустическую, которая воспринимается как **гром**. При разряде молнии выделяется энергия на уровне $\approx 10^9 \div 10^{10}$ Дж, которая соответствует энергии взрыва порядка нескольких тонн взрывчатого вещества.

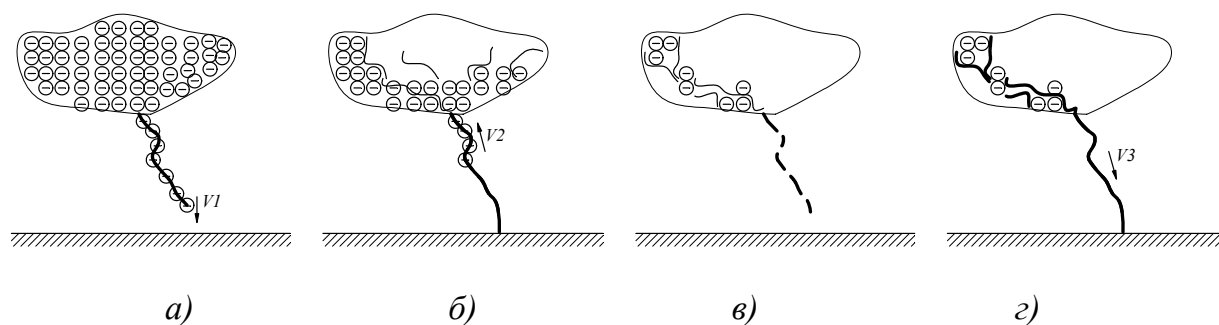


Рис. 1.9. Схема разряда молнии: а – первый лидер идёт к земле со скоростью v_1 , б – волна возвратного удара идёт вверх со скоростью v_2 , в – произошёл внутриоблачный пробой от канала возвратного удара на левую часть облака, г – второй лидер движется со скоростью v_3 по частично распавшейся плазме искрового канала

Молния – как источник грозовых перенапряжений. При ударе молнии в линию электропередач на проводах появляются заряды и создается высокое напряжение относительно Земли, под действием которого в обе стороны от места удара вдоль линии распространяются волны перенапряжений. Атмосфер-

ные перенапряжения совместно с рабочим напряжением воздействуют на изоляцию оборудования и могут приводить к выходу его из строя. Ток молнии, протекающий через пораженный объект характеризуется максимальным значением I_m , средней крутизной фронта a :

$$a = \left(\frac{dI_m}{dt} \right) \quad (1.28)$$

и длительностью импульса τ_n , равной времени уменьшения тока до половины максимального значения. Интенсивность грозовой деятельности принято характеризовать числом грозовых дней в году или общей продолжительностью гроз в часах. Число грозовых дней или часов в году определяется на основании многолетних наблюдений метеорологических станций. Так, например, установлено, что в районах с числом грозовых дней в году $n = 30$, 1 км² поверхности Земли в среднем поражается 1 раз в 2 года. Таким образом, среднее число разрядов молнии в 1 км² поверхности Земли за один грозовой час равно 0,066. Такого рода данные позволяют оценить частоту поражения молнией различных энергетических объектов.

Удары молнии в наземные объекты часто сопровождаются пожарами и механическими разрушениями. Средства защиты от молнии (молниеотводы, заземлители) должны выдерживать удары молнии самой большой интенсивности. Для этого необходимо определить количество тепла, выделяющегося в проводнике при ударе молнии, и температуры, до которой при этом нагревается проводник:

$$Q = 0,21 I_{cp} \cdot R \sum_{k=1}^m g_k, \quad (1.29)$$

где: I_{cp} – средний ток многократной молнии, кА;

g_k – заряд, переносимый в Землю во время k -го разряда, Кл;

R – активное сопротивление проводника, Ом.

Температура t , до которой нагревается проводник, определяется как:

$$t = \frac{Q}{slc\gamma}, \quad (1.30)$$

где: s – сечение проводника, м²;

l – длина проводника, м;

c – удельная теплоемкость, кДж/(кг °С);

γ – удельная масса проводника, кг/м³.

1.1.10. Дуговой разряд

Дуговой разряд – самостоятельный электрический разряд в газе, горящий при относительно низком напряжении, которое соответствует значениям потенциала ионизации атомов газа (единицы...десятки электронвольт). Особенностью дуговых разрядов является существование больших токов (1...100 кА), которые ограничиваются только мощностью источника питания разряда.

Впервые дуговой разряд наблюдался между двумя угольными электродами в воздухе в 1802 г. В.В. Петровым. Светящийся токовый канал этого разряда при горизонтальном расположении электродов из-за нагрева газа (конвекции) дугообразно изогнут, что и обусловило название. Характерной чертой дугового разряда является наличие очень яркого, малого по размеру пятна на катоде (катодное пятно), в которое стянут разрядный ток. В процессе горения разряда катодное пятно хаотично перемещается по поверхности катода. Температура поверхности электрода в пятне достигает величины температуры кипения материала катода. Поэтому значительную роль в формировании тока дугового разряда играет термоэлектронная эмиссия. Над катодным пятном образуется слой положительного пространственного заряда, который обеспечивает ускорение эмитируемых электронов до энергий, достаточных для ударной ионизации атомов и молекул газа. Этот слой создает высокую напряженность электрического поля у поверхности катода, особенно вблизи естественных микронеоднородностей поверхности, что приводит к усилению роли автоэлектронной эмиссии. Высокая плотность тока в катодном пятне - $10^2 \div 10^7$ А/см² и постоянное перемещение катодного пятна создают условия для возникновения взрывной электронной эмиссии. Непосредственно к зоне катодного падения потенциала примыкает положительный столб анодной части дуги. На аноде формируется яркое анодное пятно, несколько большего размера и менее подвижное, чем катодное. Нагретый до высокой температуры $T = 6000 \text{ -- } 12000$ К, а иногда и выше, ионизованный газ в столбе дуги является термоионизованной плазмой, в которой концентрации электронов и ионов равны. Кроме описанной дуги с холодным катодом, существуют дуги с накаливаемым (термоэмиссионным) катодом, вакуумные дуги (горят в парах металлов, образованных за счет испарения электродов) и т.д.

Знание особенностей и закономерностей зажигания дуговых разрядов необходимо при проектировании и эксплуатации объектов электроэнергетики.

1.1.11. Коронный разряд

Общая характеристика коронного разряда. *Коронный разряд* – один из видов самостоятельного разряда, возникающий в широком диапазоне давлений – от атмосферного до сотен атмосфер и выше. **Особенность коронного разряда состоит в том, что он может не завершиться пробоем промежутка.** Коронный разряд возникает у электрода с малым радиусом кривизны и горит в виде светящегося ореола – «короны» (отсюда и название). **Обязательным**

условием возникновения коронного разряда является значительная неоднородность электрического поля, $K_n \geq 3$. Такое электрическое поле возникает у проводов линий электропередач, появление коронного разряда у которых приводит к потерям электрической энергии. Потери на корону могут быть существенными и часто оказываются сравнимыми с потерями джоулева тепла в проводах. Ионизационные процессы в коронном разряде происходят только вблизи электрода с малым радиусом кривизны, эту зону называют **чехлом короны**. В зависимости от полярности электрода различают отрицательную и положительную короны. За счет процессов ударной ионизации в чехле короны непрерывно создаются заряженные частицы обоих знаков. Частицы того же знака, что и коронирующий электрод, под действием электрического поля выходят из чехла короны во внешнюю область и постепенно перемещаются к противоположному электроду.

Коронный разряд при постоянном напряжении. При постоянном напряжении различают два вида коронного разряда – униполярный и биполярный. Униполярный коронный разряд (униполярная корона) возникает в том случае, когда коронирующие электроды в промежутке имеют одинаковую полярность. При униполярной короне вся внешняя зона заполнена зарядами того же знака, что и коронирующий провод. Распределение зарядов в униполярной короне показано на рис.1.10.

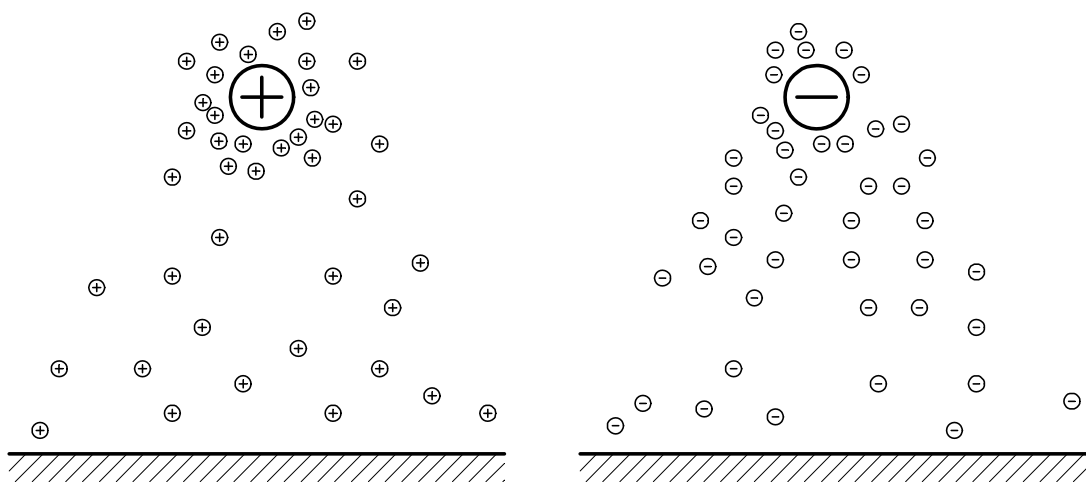


Рис. 1.10. Распределение зарядов в униполярной короне

Биполярный коронный разряд (биполярная корона) возникает в том случае, когда коронирующие электроды имеют противоположную полярность. Распределение заряда в этом случае показано на рис.1.11.

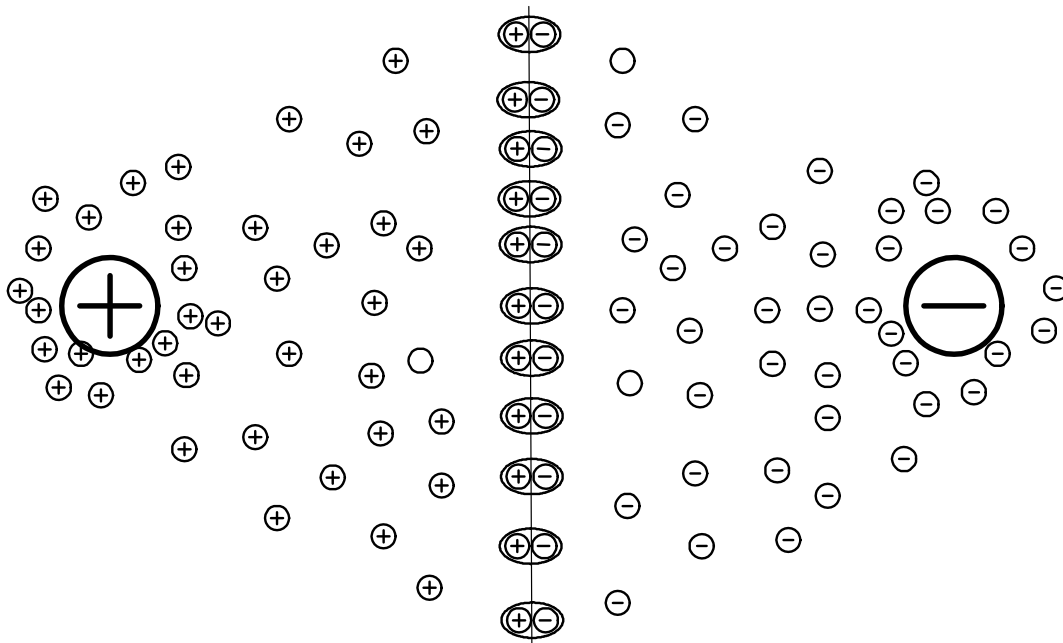


Рис.1.11. Распределение заряда в биполярной короне

Во внешней зоне биполярной короны ионы разных знаков движутся навстречу друг другу. Если бы на границе нулевого потенциала, (линия нулевого потенциала показана штрих-пунктиром на рис.1.11) происходила полная рекомбинация ионов, биполярная корона состояла бы из двух не зависящих друг от друга униполярных коронных разрядов. В действительности на границе раздела происходит лишь частичная рекомбинация ионов, и значительная их часть проникает во внешнюю зону провода противоположной полярности. При этом уменьшается суммарный, объемный заряд этой зоны. Для того чтобы восстановить значение напряжения, обеспечивающее сохранение начальной напряженности поля на поверхности провода, ионизация в чехле короны должна возрасти и из чехла короны должен выделиться дополнительный заряд для нейтрализации проникших зарядов. Благодаря этому ток короны, а следовательно, и **потери энергии в биполярной короне значительно больше, чем в униполярной.**

Коронный разряд вынуждает ограничивать напряженность электрического поля у поверхности высоковольтных электродов многих конструкций и проводов линий электропередачи. Ограничения достигаются увеличением размеров электродов, придания им формы, обеспечивающей большую однородность поля, полировкой электродов и т.д. На линиях электропередачи с номинальным напряжением 330 кВ и выше снижение напряженности электрического поля на поверхности проводов достигается расщеплением проводов, т. е. использованием 4...6 проводов на одну фазу, которые в результате увеличивают эффективный радиус. Начальная напряженность электрического поля E_k , соответствующая появлению короны, зависит от радиуса кривизны электрода, вида газа, его относительной плотности и ряда других факторов. Параметр E_k оказывается важным при расчете потерь энергии на корону. Начальная напряженность электрического поля, соответствующая появлению общей короны на одиночном проводе с $r_0 < 1$ см рассчитывается по формуле Пика:

$$E_k = 30,3m\delta \left[1 + \frac{0,298}{\sqrt{\delta r_0}} \right], \quad (1.31)$$

где E_k – начальная напряженность зажигания короны, (кВ/см);

m – коэффициент гладкости провода (для хорошо отполированного круглого провода $m = 1$);

δ – относительная плотность воздуха;

r_0 – радиус провода.

При $r_0 > 1$ см расчет необходимо вести по формуле Залесского:

$$E_k = 24,5m\delta \left[1 + \frac{0,613}{(r_0\delta)^{0,4}} \right]. \quad (1.32)$$

Формула (1.32) даёт необходимую точность для оценки E_k для проводов, как для постоянного, так и для амплитуды переменного напряжения.

Коронный разряд при переменном напряжении. На переменном напряжении коронный разряд зажигается при достижении начального напряжения, равного напряжению зажигания короны $U_n = U_k$ при времени t_1 (рис. 1.12, а). Вокруг провода образуется зона ионизации, называемая чехлом короны (рис. 1.12, в). Из чехла короны положительные заряды выносятся в окружающее пространство и образуют внешний объёмный заряд (ОЗ). Процесс коронирования продолжается до тех пор, пока напряжение не достигнет U_{\max} при t_2 . Несмотря на повышение U до U_{\max} , напряженность на проводе остается постоянной и равной E_k из-за влияния объёмного заряда. Затем напряжение начинает снижаться. Синхронно снижается и напряженность на проводе E_n , что приводит к погасанию короны. Но после погасания короны (после t_2) в пространстве остаётся положительный внешний объёмный заряд, который ещё удаляется от провода (рис. 1.12, в). Расстояние, на которое удаляется объёмный заряд, зависит от напряжения на проводе и составляет $\sim 40 \dots 100$ см. Разность потенциалов между проводом и ОЗ увеличивается по мере уменьшения напряженности на проводе до времени t_3 . Ещё до достижения t_3 потенциал на проводе относительно ОЗ приобретает отрицательное значение (условно при t_3). В момент времени t_4 (рис. 1.12, а, в), когда напряжение достигает U_0 , которое значительно меньше U_k , зажигается отрицательная корона. При этом отрицательно заряженные частицы начинают двигаться от провода во внешнюю область, а навстречу (к проводу) движутся положительно заряженные частицы из внешнего объёмного заряда. Происходит релаксация заряженных частиц до полной компенсации положительного внешнего ОЗ (t_5). Затем накапливается отрицательный ОЗ во внешней области (t_6). Все это происходит за время от t_4 до t_6 (рис. 1.12, а, в). В момент времени t_6 (начало уменьшения напряжения) отрицательная корона гаснет. В дальнейшем все эти циклы повторяются, и зажигание короны на обеих полярностях происходит при U_0 . Между проводом и землей есть емкость C , ко-

торая заряжается и разряжается с частотой переменного тока. При этом между проводом и землей протекает емкостной ток i_c . (рис. 1.12, б)

$$i_c = C \frac{dU}{dt}. \quad (1.33)$$

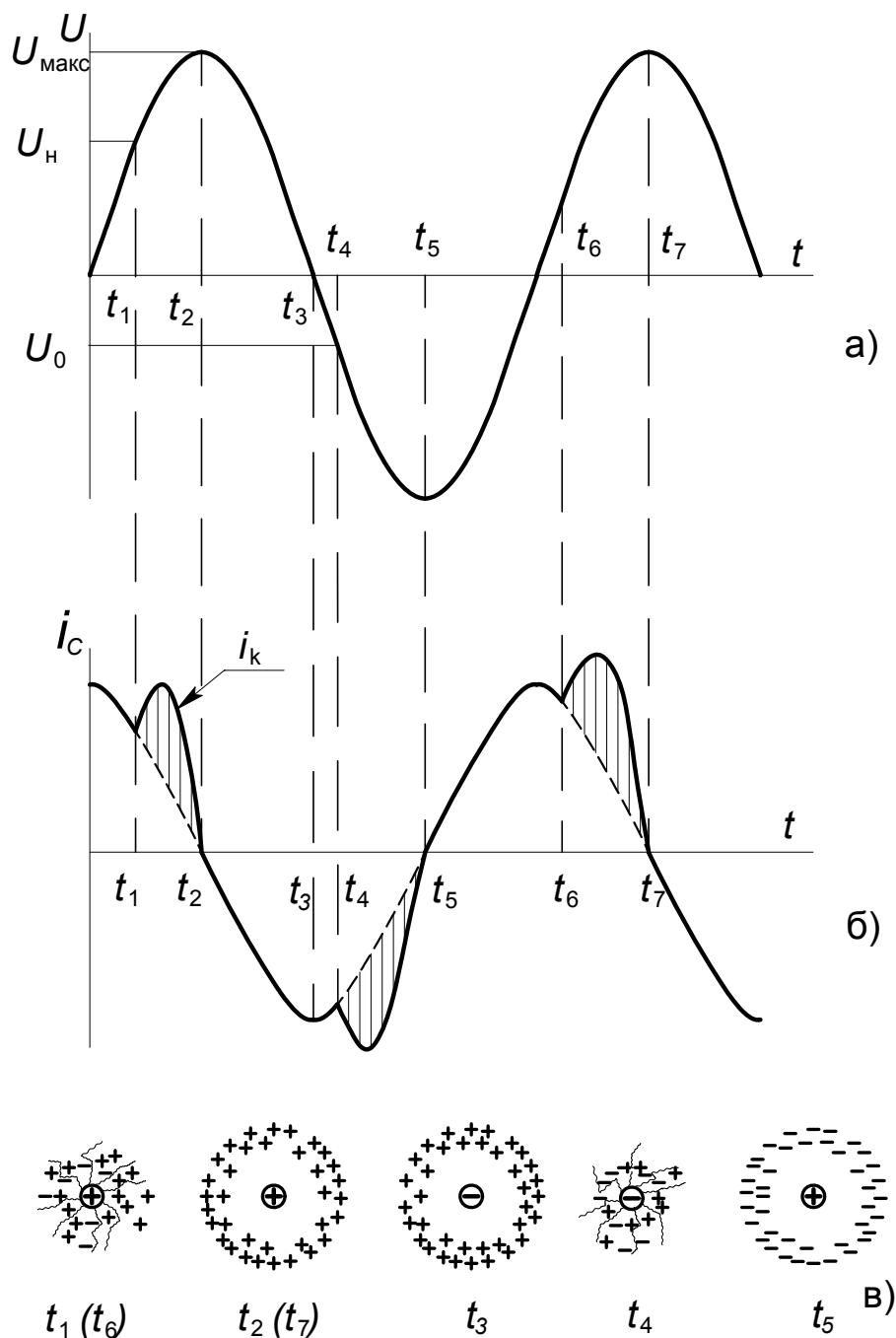


Рис. 1.12. Корона на проводе при переменном напряжении: а) изменение напряжения U во времени; б) изменение ёмкостного тока провода i_c и тока короны i_k во времени; в) чехол короны и объёмные заряды в различные моменты времени

Возникновение коронного разряда в момент t_1 приводит к появлению тока короны i_k , который накладывается на емкостный ток линии и искажает синус-

соиду тока (рис. 1.12, б). Длительность пиков тока короны равна длительности ее горения, т.е. до времени t_2 (или $t_4 - t_5, t_6 - t_7$).

При переменном напряжении коронирование проводов более интенсивное, чем при постоянном напряжении, и при прочих равных условиях потери энергии на корону существенно больше.

На характеристики коронного разряда – начальное напряжение, потери энергии, радиопомехи, шум – значительное влияние оказывают погодные условия. Атмосферные осадки резко снижают начальное напряжение возникновения короны.

Основы расчета потерь на корону. Потери энергии на корону экспериментально можно определить при помощи осциллографирования вольт-кулоновой характеристики. При этом потери за один период определяются как

$$P = \oint U \cdot dQ, (Вт), \quad (1.34)$$

где Q – величина объемного заряда в короне.

Из (1.34) следует, что потери пропорциональны площади, описываемой вольт-кулоновой характеристикой. Потери энергии при коронировании в единицу времени подсчитываются как

$$P = f \oint U \cdot dQ, (Вт), \quad (1.35)$$

где f – частота переменного тока.

При проектировании ЛЭП пользуются расчетными зависимостями потерь энергии при коронировании, т.к. использование методики расчета по вольт-кулоновой характеристике связано со значительными трудностями.

Распространенной формулой для расчета потерь на корону на переменном напряжении является эмпирическая формула Пика

$$P = \frac{24,1}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r_0}{S}} (U_\phi - U_k)^2 \cdot 10^{-5}, (кВт/км \cdot \text{фаза}), \quad (1.36)$$

где δ – относительная плотность воздуха;

f – частота, Гц;

r_0 – радиус одиночного провода, см;

S – расстояние между проводами, см;

U_ϕ – действующее значение фазного напряжения, кВ;

U_k – напряжение возникновения короны, кВ.

$$U_k = 21,2 \cdot \delta \cdot r_0 \cdot \ln \frac{S}{r_0} \cdot m_1 \cdot m_2, (кВ), \quad (1.37)$$

где m_1 – коэффициент гладкости провода, m_2 – коэффициент погоды. Для идеально гладкого провода $m_1 = 1$, для реального витого провода $m_1 = 0,85 \div 0,92$ (зависит от конфигурации провода).

Для оценочного подсчета среднегодовых потерь все погодные условия разбивают на 4 группы: 1) хорошая погода; 2) дождь (включая мокрый снег и морось); 3) сухой снег; 4) изморозь (включая гололед и иней). Наибольшие потери в единицу времени возникают при изморози. Усредненная продолжительность различных групп погоды для средней полосы европейской части России и Западной Сибири приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Усредненная продолжительность различных групп погоды

Группа погоды	Продолжительность групп погоды за год (час)	Продолжительность групп погоды за год (%)
Хорошая погода	7120	81,3
Сухой снег	800	9,1
Дождь	500	5,7
Изморозь	340	3,9

На линиях электропередачи сверхвысокого напряжения используют расщепленные провода в фазах. В технике высоких напряжений принята следующая классификация классов напряжения:

высокие напряжения (ВН) – $1 \div 220$ кВ;

сверхвысокие напряжения (СВН) – $330 \div 750$ кВ;

ультравысокие напряжения (УВН) ≥ 1150 кВ.

На рис.1.13 приведён вид расщепленного фазного провода ЛЭП 500 кВ с радиусом расщепления r_p из трёх составляющих его проводников $n = 3$ радиусом r_0 .

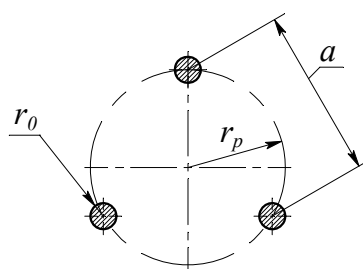


Рис.1.13. Вид расщепленного на три составляющих провода фазы ЛЭП сверхвысокого напряжения: a – шаг расщепления; r_p – радиус расщепления; r_0 – радиус одиночных составляющих провода

Для определения потерь при коронировании для расщеплённых проводов используют формулу Майра:

$$P_k = n \cdot r \cdot \kappa \cdot r_0^2 \cdot E_3 (E_3 - E_k) (2,3 \cdot \lg \frac{1350 \cdot E_3}{f \cdot r_0} - 1) \cdot 10^{-5}, \left(\frac{\text{кВт}}{\text{км} \cdot \text{фаза}} \right) \quad (1.38)$$

где n – число проводов в фазе;

f – частота, Гц;

r_0 – радиус одиночного провода, см;

E_k – напряженность возникновения короны, кВ/см;

E_3 – эквивалентная напряженность, кВ/см;

κ – коэффициент погоды.

$$E_3 = \frac{E_{\text{макс}} + E_{\text{ср}}}{2}. \quad (1.39)$$

Неточность расчета обусловлена упрощением учета погодных условий, которые делятся на две группы: «хорошая» погода ($\kappa = 44$; $E_k = 17$ кВ/см) и «плохая» погода ($\kappa = 31,5$; $E_k = 11$ кВ/см). Для средней полосы Европейской части России и Западной Сибири потери на корону для 3-х фазных ЛЭП сверхвысокого напряжения могут рассчитываться по формуле Л. Егоровой и Н. Тиходеева

$$P_k = 2,4 \cdot 10^{-6} \cdot U_m^2 \exp \left[8,7 \left(\frac{U_m}{U_k} - 0,53 \right) \right], \quad (\text{кВт/км}), \quad (1.40)$$

где U_m – амплитудное значение фазового напряжения, кВ.

Для определения потерь на корону в течение года рассчитывают потери энергии для каждой группы погоды, а затем суммируют их с учетом продолжительности группы в течение года

$$\sum P_k = \sum_{i=1}^4 P_{ki} \cdot \psi_i, \quad (1.41)$$

где ψ_i – относительная продолжительность группы погоды, P_{ki} – среднегодовая мощность потерь на корону при i -ой группе погоды.

1.1.12. Поверхностный разряд

Общая характеристика поверхностного разряда. Внесение твердого диэлектрика в воздушный промежуток может существенным образом изменять условия и механизм развития разряда. Величина разрядного напряжения при этом снижается и зависит от давления газа и формы электрического поля, свойств твёрдого диэлектрика, состояния его поверхности и расположения её относительно силовых линий электрического поля. Разряд вдоль поверхности

диэлектрика называется **поверхностным разрядом**. Закономерности развития разрядов вдоль поверхности твердого диэлектрика необходимо знать для рационального конструирования изоляторов, которые являются важной составляющей высоковольтных изоляционных конструкций.

Рассмотрим влияние твердого диэлектрика на возникновение и развитие разряда в воздухе вдоль поверхности изолятора. В конструкции рис. 1.14, а силовые линии электрического поля параллельны поверхности диэлектрика и поле является однородным.

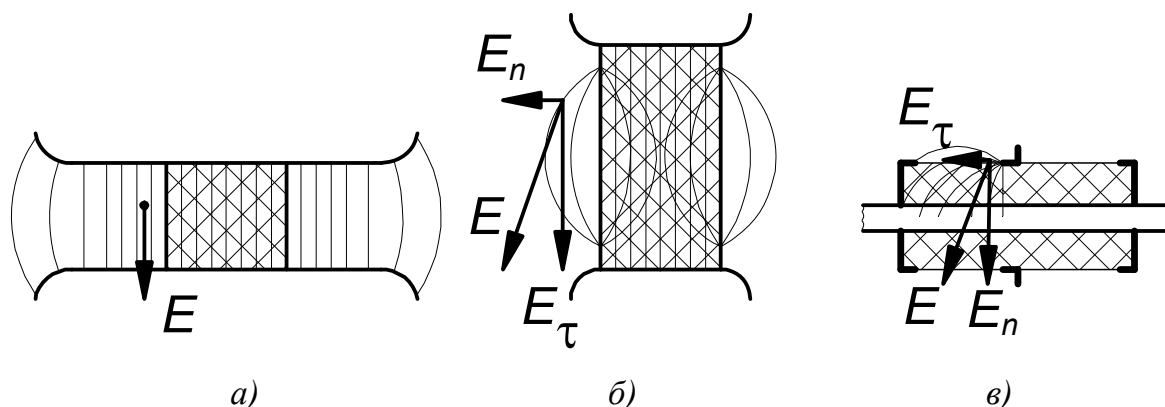


Рис. 1.14. Характерные конструкции воздушных промежутков с твердым диэлектриком: а – однородное поле, б – поле с преобладанием тангенциальной составляющей, в – поле с преобладающей нормальной составляющей

В конструкции по рис. 1.14, б поле неоднородно и тангенциальная составляющая напряжённости поля на поверхности диэлектрика E_τ преобладает над нормальной составляющей E_n . В конструкции рис. 1.14, в поле также неоднородно, но преобладает нормальная составляющая. Первая конструкция сравнительно редко встречается в реальных условиях, но удобна при выявлении влияния характеристик диэлектрика на возникновение разряда, вторая и третья конструкции встречаются часто (опорные, рис. 1.14, б, и проходные, рис. 1.14, в, изоляторы). В изоляционной конструкции рис. 1.14, а электрическая прочность промежутка с диэлектриком меньше, чем чисто воздушного промежутка (рис. 1.15, кривая 5).

Это связано с адсорбцией влаги из окружающего воздуха на поверхности диэлектрика, а также с микроразорами между твердым диэлектриком и электродом в тройной точке. Поверхность всех тел в воздухе покрыта тончайшей пленкой воды. Ионы, образующиеся в этой пленке под действием электрического поля, перемещаются к электродам. В результате этого поле вблизи электродов усиливается, а в середине промежутка ослабляется. Усиление поля у электродов приводит к снижению электрической прочности промежутка. Это снижение тем больше, чем гигроскопичнее диэлектрик. Например, стекло является более гигроскопичным материалом, чем глазурированный фарфор, поэтому напряжение перекрытия вдоль поверхности стекла ниже, чем вдоль фарфора.

Уменьшение напряжения перекрытия изолятора при наличии микрозазора между диэлектриком и электродом или микротрещин на поверхности диэлектрика связано с увеличением в них напряженности поля вследствие различия диэлектрических проницаемостей воздуха и твердого диэлектрика (диэлектрическая проницаемость твердого диэлектрика в 2...10 раз больше, чем воздуха). Увеличение напряженности поля в микрозазорах приводит к ионизации и усилению поля в основном промежутке и уменьшению напряжения перекрытия (рис. 1.15, кривая 4).

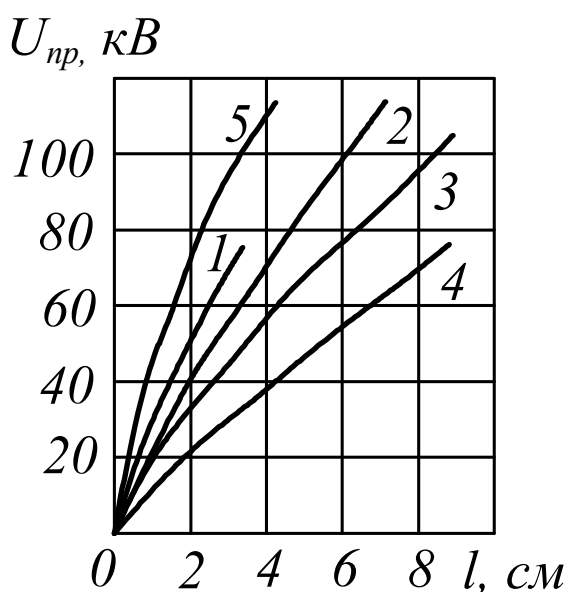


Рис. 1.15. Зависимость разрядного напряжения по поверхности образцов из различных материалов в однородном поле от расстояния: 1 – парафин; 2 – фарфор; 3 – турбонит; 4 – неплотный контакт электрода с диэлектриком (фарфор, стекло, турбонит); 5 – разрядное напряжение воздушного промежутка

Для увеличения разрядного напряжения промежутка с твердым диэлектриком стремятся использовать малогигроскопичные диэлектрики или создать покрытия из малогигроскопичных материалов, защищающие диэлектрик от контакта с парами воды (например, глазуровка поверхности фарфора), а также обеспечить надежное, без микрозазоров, сопряжение тела изолятора с металлической арматурой, используя цементные заделки и эластичные прокладки.

В изоляционной конструкции на рис. 1.14, б поле неоднородное, следовательно, и в случае только воздушного промежутка разрядное напряжение меньше, чем в однородном поле. Влияние гигроскопичности диэлектрика и микрозазоров здесь качественно такое же, как и в конструкции на рис. 1.14, а, но оно слабее выражено, так как электрическое поле и без того существенно неоднородно (рис. 1.16).

Общий вид зависимости напряжения перекрытия изолятора с преобладанием тангенциальной составляющей имеет вид

$$U_p = a + bL, \quad (1.42)$$

где a , b – экспериментальные коэффициенты;

L – расстояние между электродами (фланцами).

Из зависимости (1.42) следует, что для увеличения разрядного напряжения по поверхности изолятора необходимо увеличивать длину пути разряда L , например за счет оребрения поверхности.

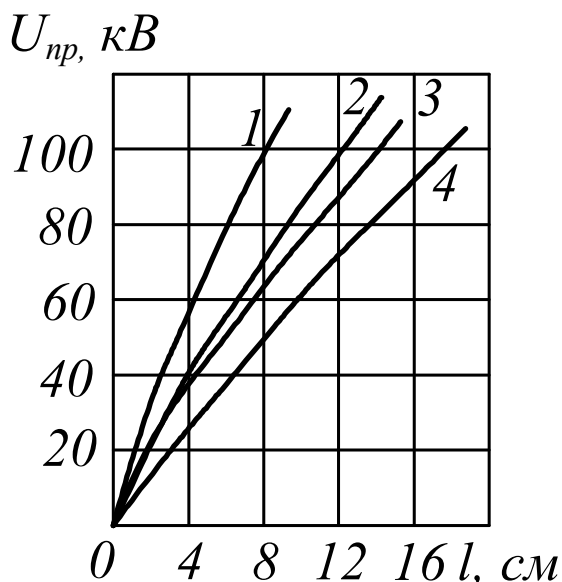


Рис.1.16. Зависимость разрядного напряжения по поверхности образцов из различных материалов в поле с преобладающей тангенциальной составляющей от расстояния: 1 – пробой воздушного промежутка; 2 – парафин, турбонит; 3 – бакелит; 4 – фарфор, стекло

При достаточно большой неоднородности поля в этой изоляционной конструкции, как и в чисто воздушном промежутке, возникает коронный разряд. Образующиеся при этом озон и окислы азота воздействуют на твердый диэлектрик. Наибольшую опасность коронный разряд представляет для полимерной изоляции, особенно если он имеет стримерную форму. Температура стримера достаточно высока, и соприкосновение его с поверхностью диэлектрика может привести к термическому разложению диэлектрика и образованию обугленного следа с повышенной проводимостью. Длина этого следа (*трека*) со временем возрастает, что приводит к перекрытию изолятора с необратимой потерей им электрической прочности.

Все сказанное справедливо и для конструкции на рис. 1.14, в. Большая нормальная составляющая электрического поля способствует сближению стримера с поверхностью диэлектрика, что повышает вероятность повреждения диэлектрика. Электрическая прочность этой конструкции еще меньше, чем конструкции на рис. 1.14, б. Стримеры, развивающиеся вдоль поверхности диэлектрика, имеют значительно большую емкость по отношению к внутреннему (противоположному) электроду, чем в конструкции с преобладанием тангенциальной составляющей поля. Поэтому через стримеры протекает сравнительно большой ток. При определенном значении напряжения ток возрастает настолько, что температура газа в стримерах становится достаточной для термической

ионизации. Термически ионизированный канал разряда, развивающегося вдоль диэлектрика, на поверхности которого нормальная составляющая напряженности поля превышает тангенциальную составляющую, называют *каналом скользящего разряда*.

Проводимость канала скользящего разряда значительно больше проводимости плазмы стримера. Увеличение напряжения на непокрытой части промежутка приводит к удлинению канала скользящего разряда и полному перекрытию промежутка при меньшем значении напряжения между электродами.

Длина канала скользящего разряда зависит от его проводимости, а следовательно, от значения тока в нем. В свою очередь ток зависит от напряжения между электродами, изменения напряжения и емкости стримера относительно противоположного электрода. Влияние этих параметров отражено в эмпирической формуле Теплера, согласно которой длина канала скользящего разряда

$$l_{\text{ск}} = a \cdot C^2 \cdot U^5 \sqrt{\frac{dU}{dt}}, \quad (1.43)$$

где a – коэффициент, определяемый опытным путем; C – удельная поверхностная емкость (емкость единицы поверхности диэлектрика, по которой развивается разряд, относительно противоположного электрода).

Из (1.43) при подстановке вместо $l_{\text{ск}}$ расстояния между электродами по поверхности диэлектрика L можно определить значение напряжения $U_{\text{пр}}$, необходимого для перекрытия изолятора. Если же принять $C = \epsilon\epsilon_0/d$, где d – толщина диэлектрика, и считать значение du/dt постоянным, что в первом приближении соответствует постоянству частоты приложенного напряжения, то из (1.43) получим

$$U_{\text{пр}} = a \cdot L^{0,2} \left(\frac{d}{\epsilon\epsilon_0} \right)^{0,4}. \quad (1.43, \text{a})$$

Из (1.43, а) следует, что рост длины изолятора дает относительно малое повышение разрядного напряжения. Поэтому для увеличения разрядных напряжений по поверхности проходных изоляторов необходимо увеличивать толщину изоляции d у фланца или уменьшать ее диэлектрическую проницаемость ϵ . Используется также нанесение у фланца полупроводящего покрытия, что способствует выравниванию распределения напряжения по поверхности изолятора и, следовательно, приводит к увеличению разрядных напряжений.

При постоянном напряжении удельная поверхностная емкость практически не влияет на развитие разряда, и значение разрядного напряжения оказывается близким к разрядному напряжению опорного изолятора.

В условиях эксплуатации поверхности изоляторов всегда загрязняются. Однако, как правило, сухие загрязнения, имеющие высокое сопротивление и не влияющие на распределение напряжения по поверхности изолятора, не снижают заметно его разрядного напряжения. Увлажнение слоя загрязнения моросья-

щим дождем или росой приводит к уменьшению сопротивления слоя загрязнения, изменению распределения напряжения по поверхности изолятора и в результате – к снижению его разрядного напряжения.

Механизмы перекрытия изолятора под дождем и при загрязненной и увлажненной поверхности сходны. Рассмотрим развитие разряда в случае, когда поверхность изолятора загрязнена и увлажнена.

Под действием приложенного к изолятору напряжения по увлажненному слою загрязнения проходит ток утечки, нагревающий его. Так как загрязнение распределено по поверхности изолятора неравномерно и плотность тока утечки неодинакова на отдельных участках изолятора из-за сложной конфигурации его поверхности, то нагревание слоя загрязнения происходит также неравномерно. На тех участках изолятора, где плотность тока наибольшая, происходит интенсивное испарение воды, и образуются подсушенные участки с повышенным сопротивлением. Распределение напряжения по поверхности изолятора меняется. Почти все напряжение, воздействующее на изоляцию, оказывается приложенным к подсушенным участкам. В результате этого подсушенные участки перекрываются искровыми каналами, называемыми частичными дугами. Сопротивление искрового канала меньше сопротивления подсушенного участка поверхности изолятора, поэтому ток утечки возрастает. Возрастание тока утечки приводит к дальнейшему подсушиванию слоя загрязнения, а, следовательно, и к увеличению его сопротивления.

Интенсивное подсушивание поверхности изолятора у концов дуг приводит к их удлинению. Подсушивание всей поверхности ведет к снижению тока утечки, а увеличение длины частичных дуг – к его росту. Если результатом этого будет уменьшение тока утечки, то дуги погаснут, если же ток утечки будет расти, то частичные дуги будут удлиняться и перекроют весь изолятор. Так как параметры частичной дуги и количество дуг, одновременно существующих на поверхности изолятора, случайны, то и перекрытие также является случайным событием, характеризуемым определенной вероятностью. Вероятность перекрытия изолятора повышается с увеличением воздействующего напряжения, так как при этом возрастает ток утечки, что благоприятствует удлинению частичных дуг до полного перекрытия изолятора.

Из приведенной картины развития разряда следует, что разрядные напряжения изоляторов будут тем выше, чем меньше ток утечки:

$$I_y = U_y / R_y, \quad (1.44)$$

где R_y – сопротивление утечки по поверхности изолятора.

Если слой загрязнения имеет толщину Δ с удельным объемным сопротивлением ρ , то для цилиндрического гладкого изолятора диаметром D

$$R_y = \rho \cdot L_y / (\pi \cdot \Delta \cdot D), \quad (1.45)$$

где L_y – длина пути утечки.

Из (1.44) и (1.45) следует, что

$$I_y = U \cdot \pi \cdot \Delta \cdot D / (\rho \cdot L_y). \quad (1.46)$$

Следовательно, разрядное напряжение изолятора будет возрастать с увеличением длины пути утечки и уменьшением диаметра изолятора.

$$U = \frac{I_y \cdot (\rho \cdot L_y)}{\pi \cdot \Delta \cdot D}. \quad (1.47)$$

Так как процессы подсушки поверхности изолятора происходят относительно медленно, то при кратковременных перенапряжениях они не успевают развиваться и напряжение перекрытия бывает выше, чем при длительном воздействии напряжения.

Влагоразрядное напряжение изолятора зависит от характеристик слоя загрязнения – его количества и состава, а также от интенсивности и вида увлажнения. Большое разнообразие видов загрязнения, встречающихся в условиях эксплуатации, не позволяет выбрать единственное, «стандартное» загрязнение, которое можно было бы наносить на поверхность изоляторов при определении влагоразрядных напряжений. Наиболее правильно разрядные напряжения в реальных условиях загрязнения и увлажнения могут быть определены из опыта эксплуатации.

1.1.13. Понятие электрического пробоя

Рассмотрев основные виды газовых разрядов и их влияние на работу изоляционных конструкций, определим смысл важного понятия в физике газового разряда и техники высоких напряжений – понятие электрического *пробоя*.

Под электрическим пробоем понимают любой процесс быстрого возникновения сильноионизованного состояния вещества под действием приложенного электрического поля. В технике высоких напряжений пробоем называется образование сквозного канала высокой проводимости, способного пропустить столь сильный ток, что напряжение на изоляционном промежутке резко падает. Электрическая цепь оказывается в режиме короткого замыкания. Напряжение, приводящее к пробую, называют *пробивным напряжением*.

Чтобы в разрядной цепи наступило короткое замыкание, сопротивление канала разряда, перекрывшего промежуток, должно стать меньшим, чем сопротивление внешней цепи, включая внутреннее сопротивление источника. Это и является количественным критерием пробоя. Сопротивление канала пробоя быстро уменьшается с течением времени и, в конце концов, не канал, а элементы внешней электрической цепи ограничивают ток возникшего короткого замыкания. Для этого состояние в канале должно быть неустойчивым, увеличение тока должно снижать напряжение, необходимое для поддержания ионизации в газе. Иначе говоря, ионизованный канал должен обладать падающей вольт-амперной характеристикой.

1.1.14. Влияние времени приложения напряжения на электрическую прочность газовой изоляции

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

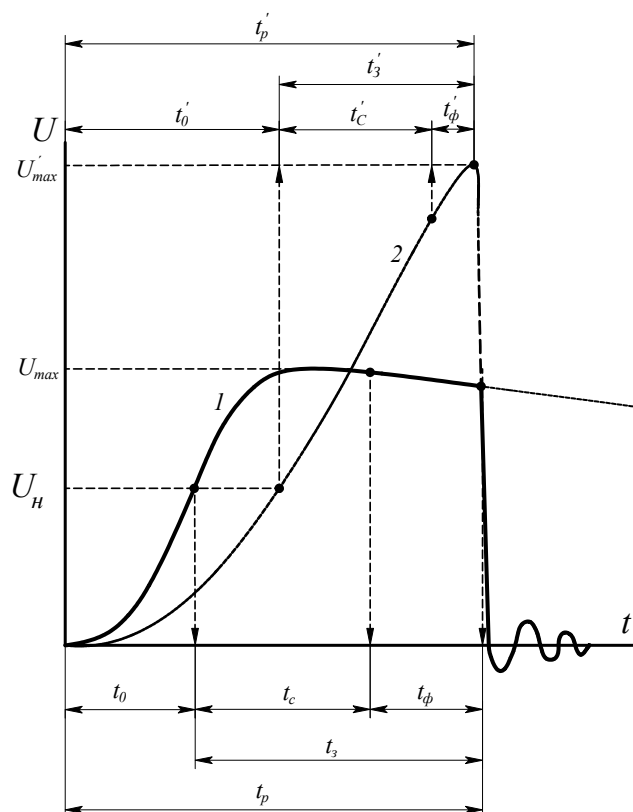


Рис. 1.17. Структура времени развития разряда t_p , 1 – пробой на спаде импульса напряжения; 2 – пробой на фронте импульса: t_0, t_0' – время до момента выполнения условия самостоятельности разряда, t_c, t_c' – время ожидания эффективного электрона, t_ϕ, t_ϕ' – время формирования разряда, t_3 – время запаздывания развития разряда

Импульсный пробой может происходить или при росте напряжения, или на его спаде (рис. 1.17, кривые 2 и 1, соответственно). Если U_n – напряжение, при котором выполняется условие самостоятельности разряда, то до момента t_0 разряд в промежутке принципиально произойти не может.

Развитие самостоятельного разряда начинается с появления в промежутке эффективного начального электрона, что является случайным событием. Время ожидания эффективного электрона t_c подвержено разбросу и называется поэтому статистическим временем запаздывания разряда. Это первая составляющая времени разряда. Следовательно, развитие разряда в промежутке начнется не в момент времени t_0 , а в любой момент $t_2 = t_0 + t_c$.

Другой составляющей, имеющей также статистический характер является время формирования разряда t_{ϕ} , т.е. время от момента появления начального электрона до завершения пробоя промежутка. Время $t_3 = t_c + t_{\phi}$ называется временем запаздывания развития разряда.

Таким образом, в общем случае время разряда определяется как

$$t_p = t_0 + t_c + t_{\phi}. \quad (1.48)$$

Статистическое время запаздывания разряда зависит от напряжения между электродами, материала электродов, состояния их поверхности, интенсивности внешнего ионизатора. В резконеоднородных полях t_c невелико и слабо зависит от внешней ионизации.

Время формирования разряда t_{ϕ} практически определяется суммой продолжительности лавинной, стримерной и искровой (в сантиметровых промежутках) стадий. При увеличении напряжения уменьшается время развития лавин, стримеров и искры, а следовательно, и время формирования разряда.

Зависимость максимального напряжения, при котором происходит разряд, от времени действия импульса называется вольт-секундной характеристикой изоляции (ВСХ). Поскольку начало и скорость развития ионизационных процессов зависят от значения напряжения, вольт-секундные характеристики зависят от формы импульса. С целью унификации испытаний и возможности сопоставления изоляционных конструкций установлен стандартный грозовой импульс 1,2/50 мкс (рис. 1.18), у которого согласно ГОСТ 1516.2 длительность фронта ($1,2 \pm 0,36$) мкс, длительность импульса на полувысоте (50 ± 10) мкс.

Для экспериментального определения вольт-секундной характеристики на исследуемый промежуток подаются импульсы стандартной формы. При каждом значении максимального напряжения импульса производится серия опытов. В силу статистического разброса времени разряда вольт-секундная характеристика получается в виде области точек (рис. 1.19), для которой указываются кривая средних значений и границы разброса времени разряда.

Вид вольт-секундной характеристики зависит от степени неоднородности электрического поля в промежутке. Для промежутков с однородным или слабонеоднородным полем $U_{\text{пр}}$ слабо зависит от t_p (рис. 1.20, кривая 1). Это позволяет использовать воздушный промежуток между шаровыми электродами для измерения амплитудных значений напряжения. При этом, начиная со времени запаздывания $t_p \geq 10^{-6}$ с, разброс значений $U_{\text{пр}}$ составляет $\Delta U_{\text{пр}} \leq 3\%$, что позволяет использовать промежуток между шаровыми электродами для измерения максимальных значений напряжения при соблюдении соответствующих требований к форме и поверхности шаровых электродов, устанавливаемых ГОСТ 17512.

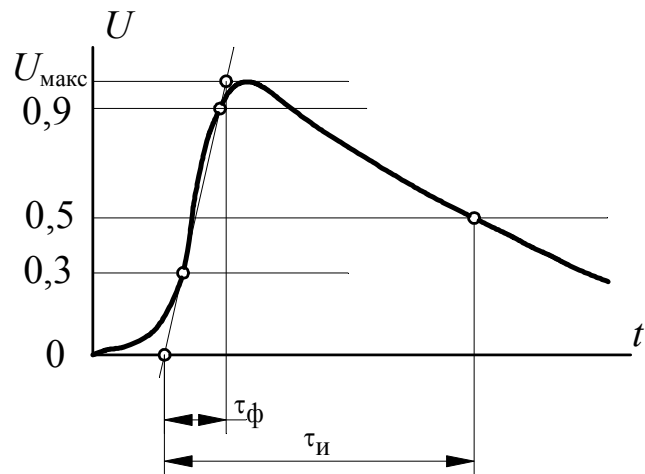


Рис. 1.18. Параметры грозового импульса и время разряда: t_ϕ – длительность фронта импульса; t_u – длительность импульса

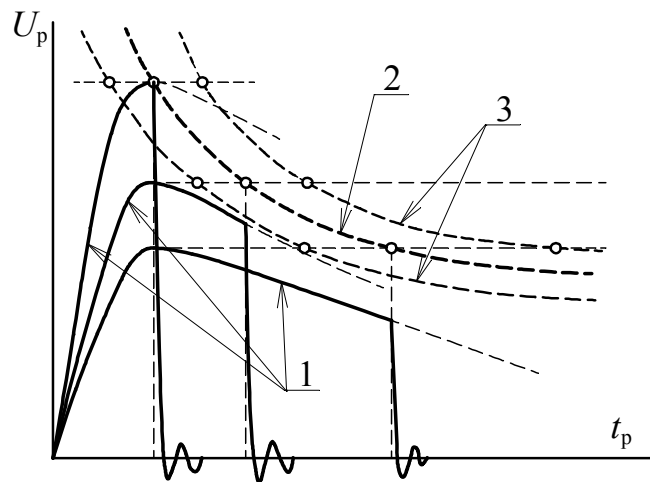


Рис. 1.19. Построение вольт-секундной характеристики изоляции по опыт-ным данным (грозовые импульсы): 1 – импульсы напряжения; 2 – кривая средних значений U_{np} ; 3 – граница разброса U_{np}

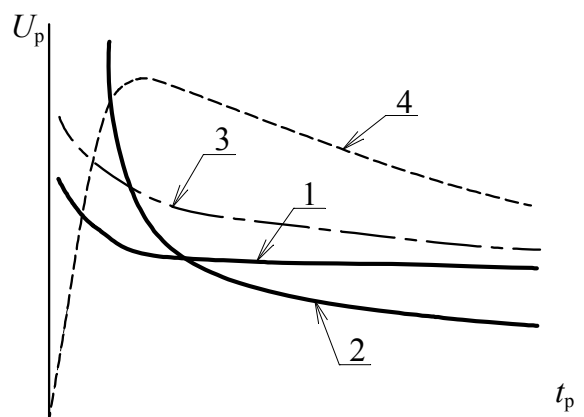


Рис. 1.20. Вид вольт-секундной характеристики для промежутков с разными электрическими полями (грозовые импульсы): 1 – однородное поле; 2 – резконеод-нородное поле; 3 – вольт-секундная характеристика защищаемого объекта

Если вольт-секундная характеристика защищаемого объекта (кривая 3 на рис. 1.20) лежит выше вольт-секундной характеристики разрядного промежутка, например, кривая 1 на рис. 1.20, то такой искровой промежуток пробивается раньше, чем пробивается изоляция защищаемого объекта.

1.1.14. Эффект полярности

В *слабонеоднородных* полях, где минимальный и средний градиенты напряжения мало отличаются друг от друга, коронное и разрядное напряжения практически совпадают друг с другом, влияние полярности невелико. В *резконеоднородном* поле коронное напряжение намного ниже разрядного, полярность при несимметричных электродах существенно влияет на величину разрядного напряжения. В промежутках с резконеоднородным полем типа *острие–плоскость* формирование разряда зависит от полярности острия.

При положительной полярности острия, имеющиеся в промежутке электроны, двигаясь к острию в область сильного поля, совершают ударную ионизацию и образуют лавину электронов. Когда лавина доходит до острия, электроны лавины нейтрализуются на аноде, а положительные ионы вследствие малой скорости движения остаются у острия и создают положительный объемный заряд, который обладает собственным электрическим полем. Взаимодействуя с внешним полем в промежутке, положительный объемный заряд ослабляет поле вблизи острия и усиливает его в остальной части промежутка (см. рис. 1.21, *а*). Если напряжение между электродами достаточно велико, то возникает лавина электронов справа от объемного заряда, электроны которой, смешиваясь с положительными ионами объемного заряда, создают зародыш канала анодного стримера, заполненный плазмой. Зажигается стримерный коронный разряд. Положительные заряды этой лавины будут располагаться на головке стримера и создавать область повышенной напряженности во внешнем пространстве. Наличие области сильного поля обеспечивает образование новых лавин, электроны которых втягиваются в канал стримера, постепенно удлиняя его. Стример прорастает к катоду, вызывая пробой промежутка, при сравнительно малом значении разрядного напряжения.

При отрицательной полярности острия электрическое поле непосредственно у острия приводит к эмиссии электронов с катода, которые сразу попадают в сильное поле и производят ударную ионизацию, образуя большое число лавин. Электроны лавин, перемещаясь в слабое поле у анода, теряют скорость, захватываются нейтральными молекулами, становятся отрицательными ионами, рассеянными в пространстве. Положительные ионы лавин образуют объемный заряд у острия, который, взаимодействуя с внешним полем, будет увеличивать напряженность непосредственно у острия и уменьшать – в остальной части промежутка (рис. 1.21, *б*). Увеличение поля у острия приводит к усилению эмиссии электронов с поверхности катода, которые, смешиваясь с положительным объемным зарядом, образуют у катода зародыш катодного стримера.

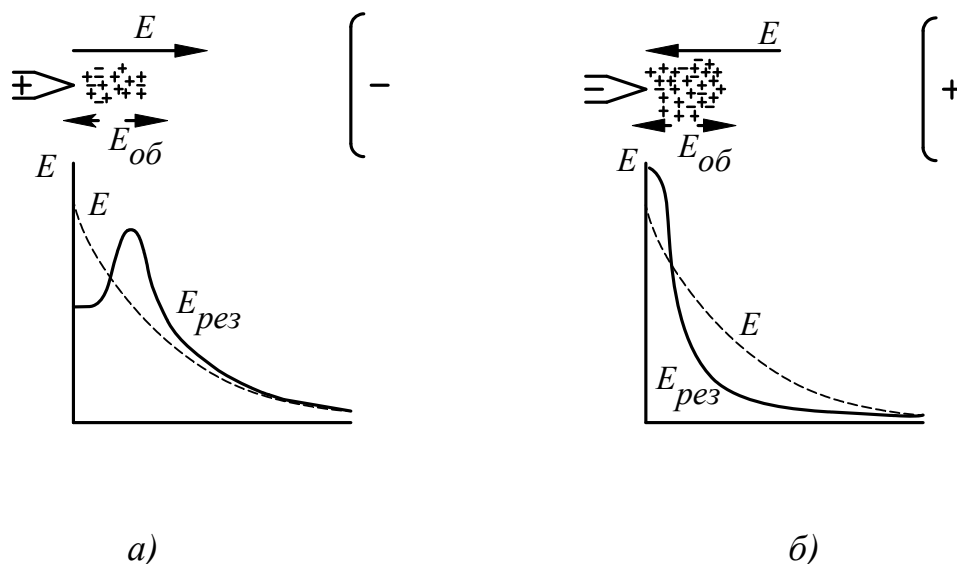


Рис. 1.21. Образование анодного (а) и катодного (б) стримера: E – напряженность внешнего поля; $E_{об}$ – напряженность поля объемного заряда; $E_{рез}$ – результирующая напряженность в промежутке после ионизации

Вследствие большого числа начальных лавин у катода плазменный канал здесь представляет собой более или менее однородный слой с радиусом кривизны большим, чем у острия. Поэтому электрическое поле несколько выравнивается и напряженность во внешней области уменьшается.

Уменьшение напряженности электрического поля во внешнем пространстве приводит к тому, что для дальнейшей ионизации в этой части промежутка необходимо значительно увеличить разность потенциалов между электродами.

При дальнейшем увеличении напряжения происходит ионизация справа от плазменного слоя. Большое число образующихся лавин приводит к удлинению стримера. Однако, так же как и в начале, благодаря большому числу лавин головка стримера размыта, и возрастание напряженности на головке стримера оказывается гораздо меньшим, чем при положительном острие.

В силу рассмотренных выше особенностей развитие стримера при отрицательном острие происходит с большими трудностями, поэтому разрядное напряжение при отрицательной полярности острия в 2–2,5 раза больше, чем при положительной полярности (рис. 1.22).

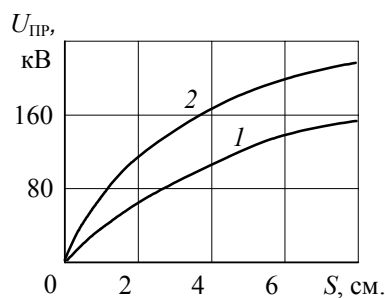


Рис. 1.22. Зависимость пробивного напряжения воздуха от расстояния между электродами: коническое острие (угол 30°) – плоскость: 1 – острие положительной полярности, 2 – острие отрицательной полярности

На переменном напряжении пробой происходит всегда на положительной полярности.

Вольт-секундные характеристики промежутков с резконеоднородным полем (рис. 1.20, кривая 2) имеют достаточно большую кривизну, поскольку в таких промежутках t_{ϕ} сильно зависит от значения приложенного напряжения. Для таких промежутков при грозовых импульсах характерны большие разрядные напряжения U_p , чем при переменном напряжении промышленной частоты 50 Гц U_{\sim} . Отношение

$$K_{\text{имп}} = U_p / U_{\sim}. \quad (1.49)$$

называется коэффициентом импульса и обычно относится к определенному времени разряда.

Промежутки с однородным и слабонеоднородным полями имеют $K_{\text{имп}} = 1$, практически, во всем диапазоне времен разряда $t_p \geq 10^{-7}$ с.

Вольт-секундные характеристики широко используются для координации изоляции высоковольтного оборудования, т. е. для защиты от воздействия грозовых и коммутационных воздействий. С этой целью параллельно защищаемому объекту включается воздушный разрядник с пологой ВСХ.

Надежная защита будет обеспечиваться, если ВСХ разрядника лежит ниже ВСХ защищаемого оборудования во всем диапазоне времен воздействующего напряжения (рис. 1.20, кривая 3).

1.1.15. Барьерный эффект

Существенное влияние объемного заряда на развитие разряда в промежутке с резконеоднородным полем используется на практике для увеличения разрядных напряжений изоляционных промежутков.

Это увеличение достигается помещением в промежуток барьеров из твердого диэлектрика (электрокартон, гетинакс и др.). При положительном острие положительные ионы оседают на барьер и растекаются по его поверхности тем равномернее, чем дальше от острия расположен барьер. Это приводит к более равномерному распределению напряженности в промежутке между барьером и плоскостью (рис. 1.23, *а*) и, следовательно, к значительному увеличению разрядного напряжения.

При отрицательной полярности стержня электроны, двигаясь от острия, попадают на барьер, теряют скорость, и большинство из них вместе с атомами кислорода становятся отрицательными ионами. На барьере в этом случае появляется концентрированный отрицательный заряд, увеличивающий напряженность поля не только между положительным объемным зарядом у острия и барьером, но и во внешнем пространстве (рис. 1.23, *б*). Поэтому при отрицательной полярности острия увеличение разрядного напряжения в промежутке при наличии барьера будет незначительным. При расположении барьера в средней

части промежутка разрядные напряжения при отрицательной и положительной полярностях близки.

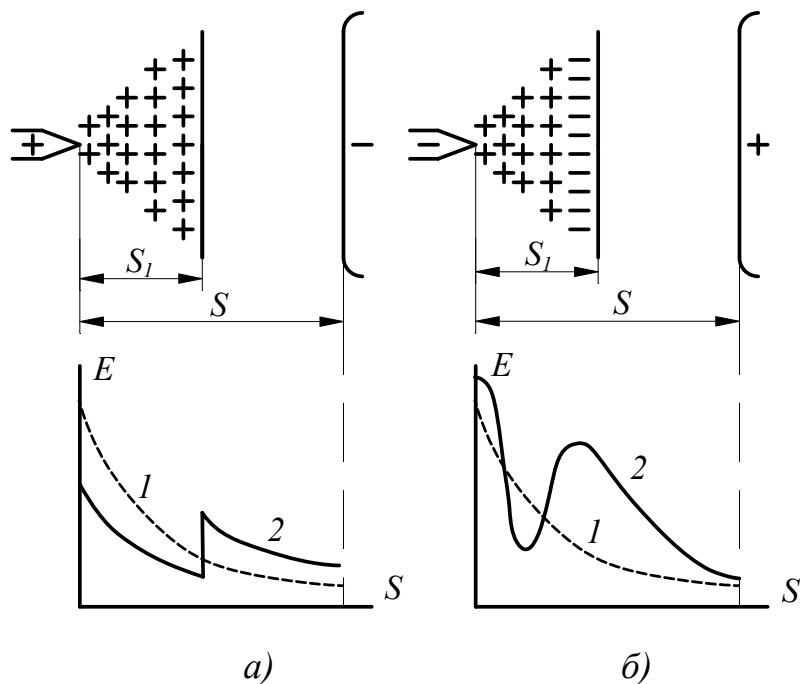


Рис. 1.23. Распределение напряжённости поля в межэлектродном промежутке при наличии барьера: а – положительная полярность стержня; б – отрицательная полярность стержня; 1 – распределение напряжённости поля без барьера; 2 – распределение напряжённости поля с барьером

При расположении барьера в непосредственной близости от положительного острия роль его уменьшается вследствие резкой неравномерности распределения зарядов на барьере. Напряженность поля оказывается достаточной для того, чтобы ионизационные процессы проходили на другую сторону барьера. Барьер, расположенный в непосредственной близости от отрицательного острия, не способен задерживать быстрые электроны с острия, которые проходят сквозь барьер к плоскости.

Таким образом, барьеры в промежутке устанавливаются на таком оптимальном расстоянии от острия, при котором разрядные напряжения максимальны (25...30 % от длины промежутка между электродами), причём при положительной полярности острия разрядное напряжение может увеличиться в 2 раза по сравнению с промежутком такой же длины, но без барьера (рис. 1.24).

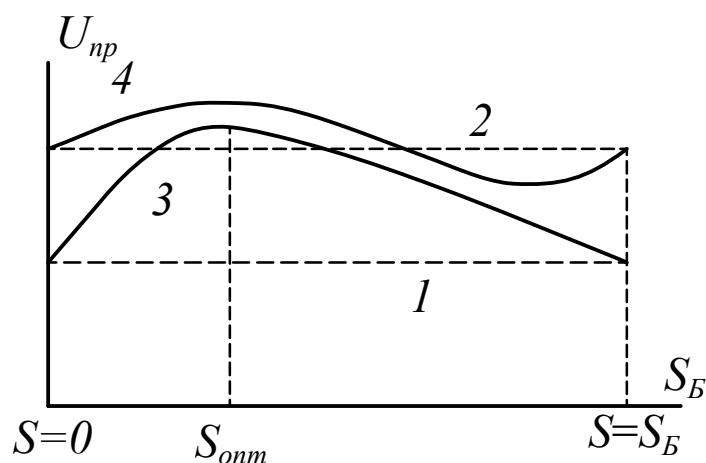


Рис. 1.24. Зависимости пробивного напряжения $U_{пр}$ от расстояния между острием и барьером S_B : 1 – пробивное напряжение промежутка стержень-плоскость без барьера при отрицательной полярности острия, 2 – пробивное напряжение промежутка стержень-плоскость без барьера при положительной полярности острия; 3 – влияние положения барьера на пробивное напряжение газового промежутка при положительной полярности острия; 4 – влияние положения барьера на пробивное напряжение газового промежутка при отрицательной полярности острия; $S_{опт}$ – оптимальное расстояние от острия до барьера; расстояние между электродами постоянно и равно S

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

1.2. Пробой конденсированных сред

1.2.1. Пробой жидких диэлектриков

Жидкие диэлектрики, обладая значительно более высокой электрической прочностью по сравнению с газами, нашли очень широкое применение в качестве высоковольтной изоляции электротехнического оборудования: трансформаторов, кабелей, конденсаторов, выключателей, разрядников и др.

Жидкие диэлектрики можно классифицировать на следующие группы:

1. углеводороды минеральные – продукты перегонки нефти и каменного угля: трансформаторное, конденсаторное и другие масла;
2. углеводороды растительные – касторовое, льняное и другие масла;
3. хлорированные углеводороды ароматического ряда – хлордифенил, совол;
4. кремнийорганические соединения.

Кроме этого, жидкие диэлектрики могут быть полярными и неполярными:

неполярные	$\rho \leq 10^{18}$ Ом·см	$\varepsilon = 1,8 \dots 2,5$	$\text{tg } \delta \approx 0,001$
слабополярные	$\rho \approx 10^{11} \dots 10^{12}$ Ом·см	$\varepsilon > 2,5$	$\text{tg } \delta \approx 0,01$
сильнополярные	$\rho \approx 10^7 \dots 10^8$ Ом·см	$\varepsilon > 5$	$\text{tg } \delta > 0,1$

В промышленности имеют дело с технически чистыми жидкостями, содержащими примеси воды, газов, волокна целлюлозы, углерода, продуктов разложения не менее $10^{-2} \div 10^{-3}$ массовых процентов.

По сравнению газами пробивные напряжения жидкостей имеют очень большой разброс. Отклонение от среднего составляет до $50 \div 70$ %, а среднее квадратичное отклонение $10 \dots 15$ %.

Определение электрической прочности масла $U_{пр}$ по ГОСТ 6581-75 осуществляется в стандартном пробойнике на переменном напряжении.

На пробой жидких диэлектриков существенное влияние оказывает множество факторов, которые могут как понижать пробивное напряжение (загрязнения, увлажнение и др.), так и увеличивать его (очистка, давление, барьеры и т.д.). Для хорошо очищенных, обезгаженных жидкостей величина электрической прочности достигает 1000 кВ/см.

1.2.1.1. Влияние условий эксплуатации на электрическую прочность жидкостей

Влияние влаги и микропримесей

Влага в жидком диэлектрике может находиться в трех состояниях: молекулярно-растворенном виде, в виде эмульсии (мелкие шарики воды размером $2 \div 10$ мкм) и в виде водяного отстоя на дне бака. Растворимость воды в жидких диэлектриках зависит от температуры. Например, в минеральном масле при 20°C может растворяться $\sim 40 \cdot 10^{-6}$ воды по объему, а при 80°C – $400 \cdot 10^{-6}$.

Наличие влаги в обоих состояниях сказывается на электрической прочности масла, особенно в присутствии волокон. Причем наиболее сильно влияет эмульгированная вода. Вследствие большой диэлектрической проницаемости (для воды $\varepsilon = 80$, для волокон целлюлозы $\varepsilon = 6,4$) частички влаги и волокна втягиваются в область наибольшей напряженности электрического поля, поляризуются и вытягиваются вдоль силовых линий поля. Это приводит к образованию «мостиков», которые увеличивают локальную плотность тока, нагреву, сильному увеличению локальной напряженности поля в местах разрывов мостиков, ионизации и пробоем всего межэлектродного промежутка.

Зависимость пробивной напряженности трансформаторного масла от содержания влаги (рис. 1.25) показывают, что наличие $0,01$ % влаги уменьшает электрическую прочность масла в несколько раз.

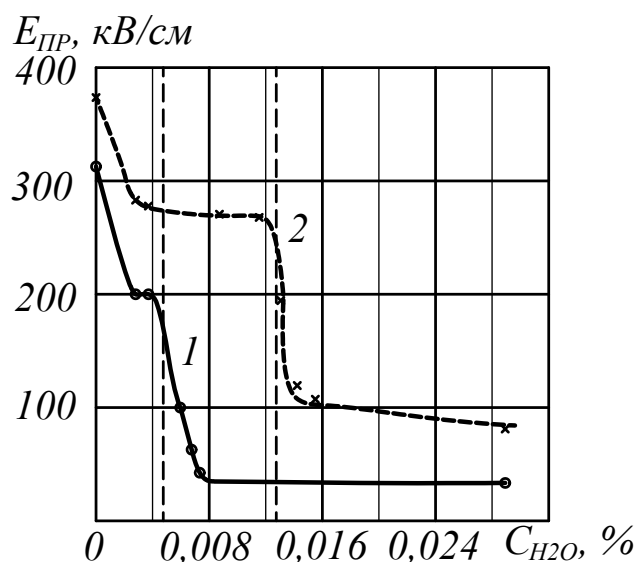


Рис. 1.25. Зависимость электрической прочности масла от содержания влаги: 1 – трансформаторное масло; 2 – вязкое кабельное масло

Снижение электрической прочности в области малых концентраций вызвано влиянием растворенной влаги, а в области больших концентраций – эмульгированной влаги. На рис. 1.25. показаны зоны растворимости влаги для масел с различной вязкостью.

Наличие влаги и волокон слабо сказывается на прочности жидких диэлектриков при коротких импульсах напряжения (единицы-десятки микросекунд), поскольку частицы примесей не успевают переместиться на значительное расстояние и повлиять на развитие разряда в жидкости.

Общее количество воды, которое может находиться в масле в молекулярно-растворённом и эмульгированном виде, ограничено. При содержании влаги более 0,02 % она коагулируется и выпадет в виде отстоя на дно. Хотя сам отстой и не влияет на электрическую прочность, его появление свидетельствует о существенном ухудшении изоляционных свойств масла.

Особенно резкое уменьшение разрядных напряжений происходит при наличии в масле гигроскопических загрязнений в виде волокон бумаги, картона, пряжи, значительно облегчающих образование проводящих мостиков. Эти загрязнения появляются в масле при его фильтрации в процессе эксплуатации из элементов твердой изоляции, находящихся в масле.

Влияние давления

Пробивное напряжение как технических, так и очищенных жидких диэлектриков при промышленной частоте 50 Гц зависит от давления. Это связано с наличием и образованием в жидкости при высоком напряжении пузырьков газа, являющихся очагами развития пробоя, а электрическая прочность газа увеличивается с ростом давления в соответствии с законом Пашена.

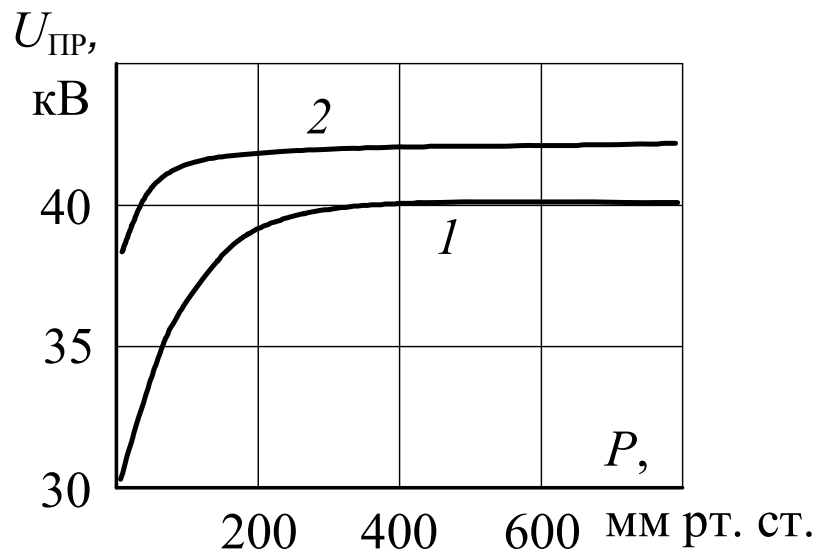


Рис. 1.26. Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от давления: 1 – недегазированное масло; 2 – дегазированное масло

На рис. 1.26 представлены зависимости пробивного напряжения трансформаторного масла от давления ниже атмосферного. При пониженных давлениях из масла начинают выделяться растворенные в нем газы, и его прочность резко падает (рис. 1.26, кривая 1). Видно, что пробивное напряжение заметно увеличивается с повышением степени очистки масла, что указывает на большое влияние газообразных примесей.

При давлении выше атмосферного (рис. 1.27) электрическая прочность масла увеличивается, что также свидетельствует о наличии газа в масле и его влиянии на электрическую прочность масла.

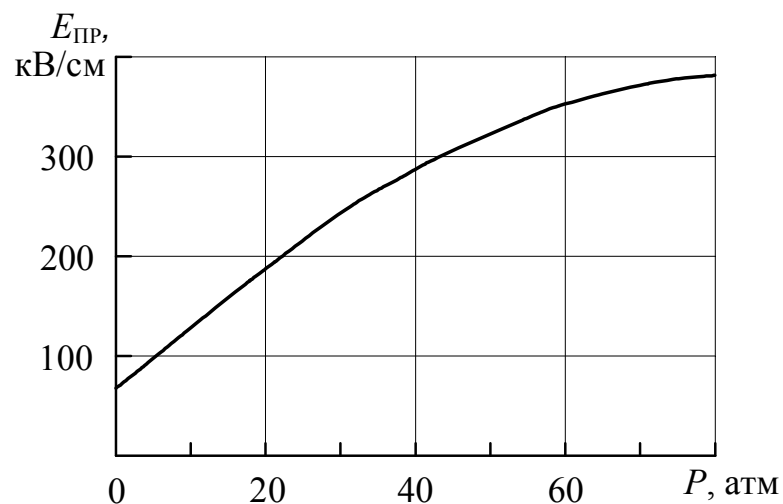


Рис. 1.27. Зависимость пробивной напряженности недегазированного парафинного масла от давления

При импульсных воздействиях давление практически не сказывается на электрической прочности жидких диэлектриков.

Влияние температуры

Для чистых сухих жидкостей значительное влияние температуры наблюдается в области интенсивного испарения и кипения (рис. 1.28).

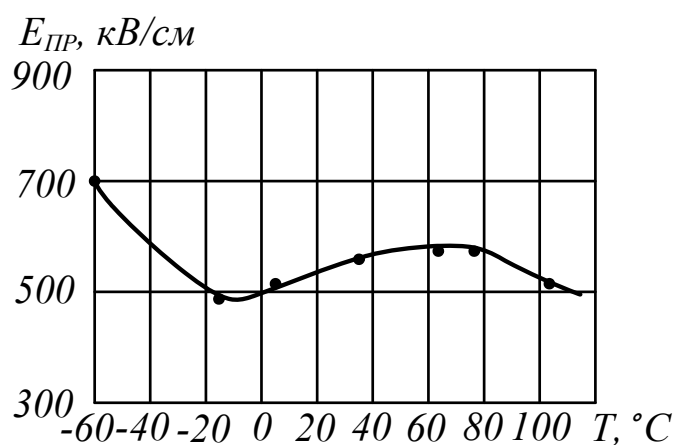


Рис. 1.28. Зависимость электрической прочности влажного трансформаторного масла от температуры на переменном напряжении 50 Гц

Для технически чистых жидкостей с примесью влаги зависимость электрической прочности от температуры достаточно сложная. Из рис. 1.28 видно, что имеет место минимум и максимум электрической прочности. Снижение температуры от точки максимума приводит к уменьшению $E_{\text{пр}}$ до минимума, что связано с переходом растворенной влаги в эмульгированное состояние. Дальнейшее понижение температуры ($< 0^\circ\text{C}$) вызывает замерзание капелек воды и, как следствие, повышение $E_{\text{пр}}$. У льда диэлектрическая постоянная $\epsilon_{\text{л}}$ близка к диэлектрической постоянной масла $\epsilon_{\text{м}}$, что уменьшает влияние влаги на электрическую прочность масла.

Уменьшение электрической прочности для сухого и технического масел при температуре выше $+80^\circ\text{C}$ обусловлено интенсивным испарением и кипением жидкости.

Влияние времени воздействия напряжения

Электрическая прочность жидких диэлектриков существенно зависит от длительности приложения напряжения τ и тем больше, чем больше примесей в жидкости (особенно влаги и волокон) (рис. 1.29).

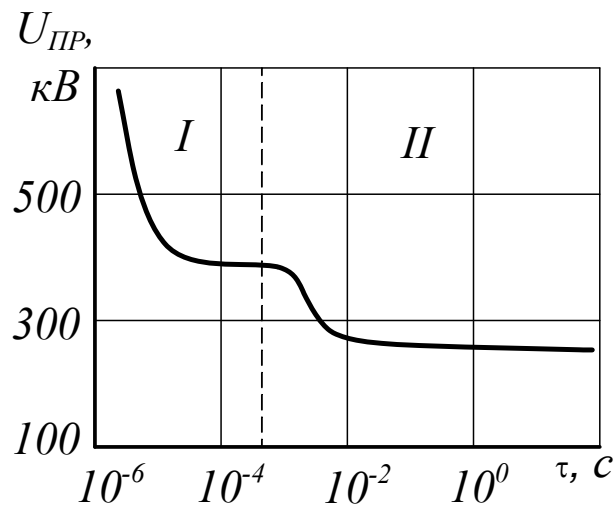


Рис. 1.29. Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от времени: полная вольт-секундная характеристика

Зависимость $U_{\text{пр}} = f(\tau)$ для технического трансформаторного масла можно разбить на 2 области. Первая область *I*: влага и волокна не успевают переместиться и не оказывают влияния на электрическую прочность. Резкое увеличение электрической прочности при $\tau < 10^{-5}$ с связано с запаздыванием развития разряда, когда время воздействия напряжения становится соизмеримо с временем формирования разряда. Вторая область *II*: увеличение времени воздействия напряжения $\tau > 10^{-3}$ с приводит к снижению $U_{\text{пр}}$ вследствие влияния влаги и волокон, а также образования газовых пузырьков под действием нагрева токами проводимости.

Влияние материала, геометрии электродов, расстояния между ними и полярности напряжения

Увеличение коэффициента неоднородности поля так же, как и в газах, снижает пробивное напряжение.

Даже незначительное увеличение радиуса кривизны электродов в резко-неоднородных полях дает более существенное увеличение $U_{\text{пр}}$ по сравнению с воздухом. Увеличение расстояния между электродами S приводит к увеличению пробивного напряжения (рис. 1.30), в обобщенном виде зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами можно представить как

$$U_{\text{пр}} = A \cdot S^n, \quad (1.50)$$

где A и n – постоянные, зависящие от свойств диэлектрика и условий пробоя.

На величину пробивного напряжения при неизменном S оказывает влияние площадь электродов и объем жидкости между электродами: увеличение площади электродов и объема жидкости вызывает снижение $U_{\text{пр}}$. Состояние поверхности электродов оказывает влияние на электрическую прочность $E_{\text{пр}}$ жидких диэлектриков. Загрязнение, окисление и плохая полировка поверхности электродов снижают $E_{\text{пр}}$.

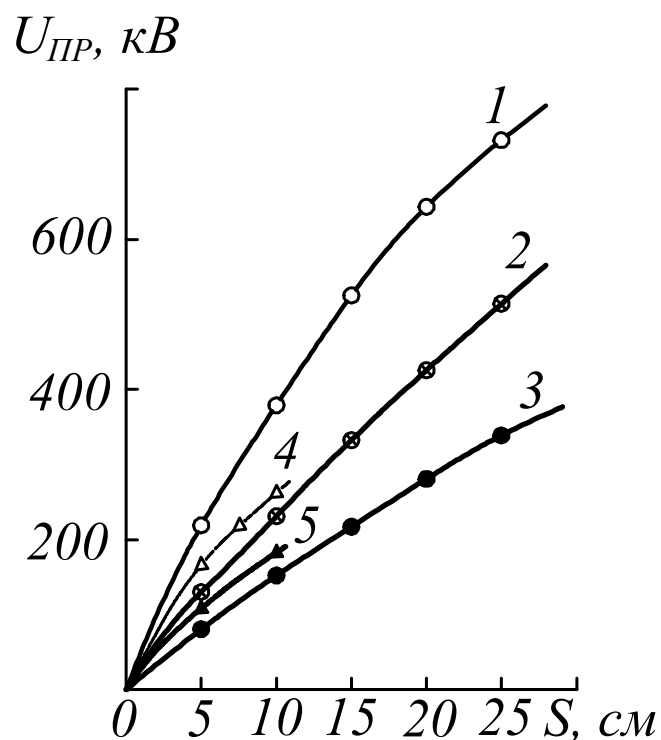


Рис.1.30. Зависимость пробивного напряжения от расстояния для трансформаторного масла, электроды острие-плоскость: 1 – стандартный импульс отрицательной полярности; 2 – стандартный импульс положительной полярности; 3 – переменное напряжение 50 Гц; 4 – постоянное напряжение отрицательной полярности; 5 – постоянное напряжение положительной полярности

По мере увеличения расстояния между электродами влияние материала электродов уменьшается и при расстоянии в несколько миллиметров прекращается. Электрическая прочность в малых промежутках зависит от высоты потенциального барьера для носителей заряда на границе металл-диэлектрик (работы выхода электронов). Как следует из рис. 1.30, пробивное напряжение зависит от полярности электрода – острия при несимметричной системе электродов. Наиболее ярко эта зависимость проявляется для полярных жидкостей. Например, для воды увеличение $U_{пр}$ при отрицательной полярности острия достигает 2,0...2,5 раз по сравнению с положительной полярностью.

Барьерный эффект

Барьеры из твердого изоляционного материала, устанавливаемые в масле между электродами, широко применяются для повышения электрической прочности масляной изоляции. Увеличение $E_{пр}$ обусловлено двумя факторами. Барьер непроницаем для ионов жидкости. Поэтому ионы, двигаясь от одного электрода к другому, оседают на барьере, «растекаются» по его поверхности и заряжают ее. Благодаря этому, электрическое поле в промежутке выравнивается, что приводит к увеличению пробивного напряжения. Кроме этого, барьер затрудняет образование сплошных проводящих мостиков из волокнистых веществ, находящихся в масле. Действие барьеров более эффективно в неоднородных полях и при длительном воздействии напряжения.

При кратковременных импульсных воздействиях напряжения барьеры менее эффективны, чем на постоянном и переменном напряжениях.

На рис. 1.31 представлено относительное изменение пробивного напряжения $U_6/U_{пр}$ ($U_{пр}$ – пробивное напряжение чисто масляного промежутка, а U_6 – пробивное напряжение того же промежутка с барьером) в зависимости от расстояния до барьера S_6/S ($S = 75$ мм – расстояние между электродами, а S_6 – расстояние от острия до барьера) в масляном промежутке, образованном электродами острие – плоскость при воздействии переменного напряжения с частотой 50 Гц.

Барьер – плоский электрокартон толщиной 5 мм. Пробивное напряжение масляного промежутка без барьера равно 1 (условных единиц). Наличие барьера приводит к увеличению пробивного напряжения. Максимальный эффект соответствует расстоянию до барьера $S_6 \approx 0,25 S$, что хорошо коррелирует с аналогичным эффектом для газа и твердых диэлектриков.

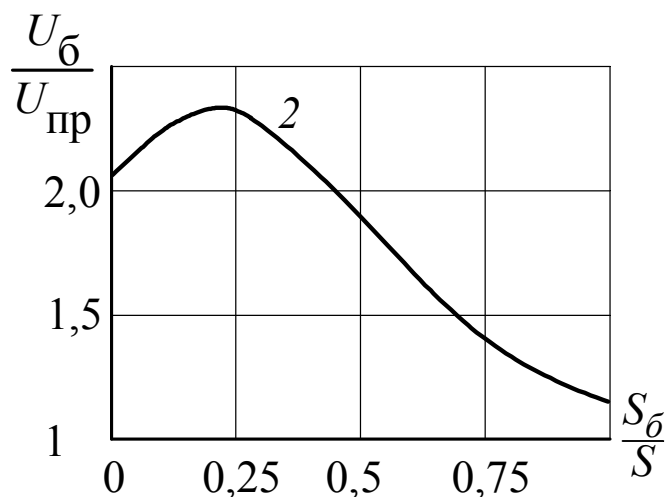


Рис. 1.31. Влияние барьера на пробивное напряжение масляного промежутка типа острие-плоскость

В 50-60-е годы XX в. появились первые работы, посвященные исследованию влияния барьеров на пробивное напряжение и время до пробоя твердых диэлектриков. Обнаружено, что для твердых диэлектриков, также как для газов и жидкостей, проявляется барьерный эффект на постоянном, переменном и импульсном напряжении. Для широкого круга исследованных материалов (щелочно-галогенидные кристаллы, слюда, бумага, парафин и различные полимерные диэлектрики) было обнаружено, что пробивное напряжение или время до пробоя возрастают при помещении барьера на расстояние $(0,1-0,3)S$ от конца острия с оптимумом при $(0,2-0,3)S$, а развитие разряда в твердых диэлектриках при достаточно больших толщинах (до 5 мм) имеет ряд аналогий с развитием разряда в газах. Барьерный эффект является воспроизводимым физическим явлением и наблюдается в диэлектриках независимо от:

– фазового состояния исследуемого диэлектрика (газы, жидкость, твердые диэлектрики);

- вида действующего напряжения (постоянное, переменное, импульсное);
- конфигурации электродов (степени неоднородности электрического поля);
- межэлектродного расстояния (миллиметровый, сантиметровый или дециметровый диапазон)

На рис. 1.7 приведена зависимость электрического поля от расстояния между электродами острие-плоскость. Видно, что напряженность электрического поля неравномерно распределяется в промежутке. Можно выделить две области: недогруженная область (ниже E_{cp}), и перегруженная область (выше E_{cp}).

Существует принципиальная возможность перераспределения напряженности электрического поля в промежутке путём формирования соответствующей функциональной зависимости $E=E(x)$. Осуществить это можно, по крайней мере, двумя способами:

- изменением условий формирования электрического поля непосредственно в изоляционном промежутке за счёт изменения параметров используемых диэлектриков при неизменной форме электродов и расстояния S между электродами;
- изменением геометрии электродов, между которыми помещён диэлектрик, при неизменном расстоянии S между электродами.

При конструировании высоковольтной изоляции для достижения максимального эффекта необходимо определить такое положение барьера между электродами, при котором коэффициент неравномерности распределения напряжённости электрического поля в промежутке минимален.

Рассмотрим коаксиальную систему электродов, которая приведена на рис. 1.32.

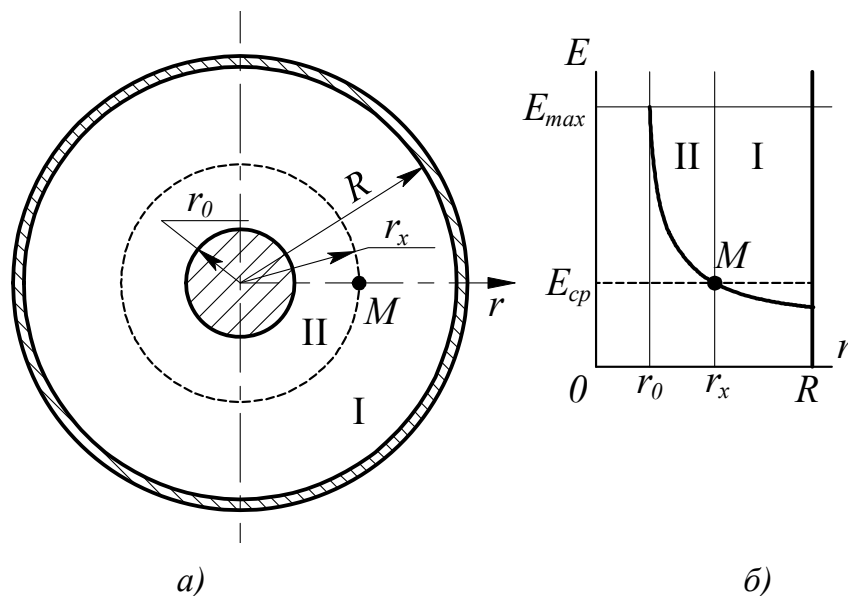


Рис. 1.32. Коаксиальная система электродов (а) и распределение поля в изотропном диэлектрике (б)

Полагаем, что между электродами находится изотропный диэлектрик с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_1 . Напряжённость поля между электродами можно записать как

$$E(r) = \frac{V}{r_x \cdot \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)}, \quad (1.51)$$

где V – разность потенциалов между внутренним и внешним электродами.

Максимальная напряжённость на внутреннем электроде E_{max} может быть рассчитана из (4.18) при $r_x = r_0$, а средняя напряжённость поля

$$E_{cp} = \frac{V}{R - r_0} = \frac{V}{d}$$

где $d = (R - r_0)$ – толщина изоляционного слоя.

Из рис. 1.32 и формулы (1.51) видно, что напряжённость электрического поля неравномерно распределяется в промежутке между электродами и изменяется по логарифмическому закону. Причем, как и для системы электродов острие-плоскость, вдоль координаты r существует точка M – точка пересечения E_{cp} с $E=f(r)$, где $E(r)=E_{cp}$. Эта точка делит промежуток на две области: недогруженная область I и перегруженная область II.

Существует принципиальная возможность перераспределить напряжённость электрического поле в промежутке – поместить между электродами, заполненными основным диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 , дополнительный слой (барьер) с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_2 > \epsilon_1$ (рис. 1.33).

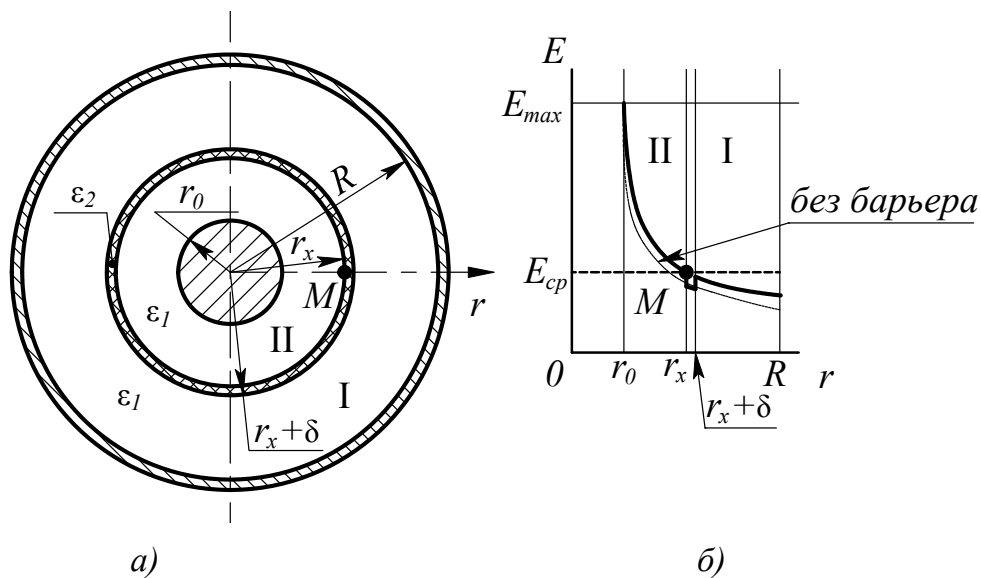


Рис. 1.33. Коаксиальная изоляционная система с барьерным слоем: а – система электродов и изоляции; б – распределение поля в диэлектрике; M – равенство $E_{cp}=E(r)$; δ – толщина барьера

Разность потенциалов между электродами можно представить как

$$V = V_I + V_b + V_{II} \quad (1.52)$$

где V_I , V_b и V_{II} – разность потенциалов на слое I, барьере и слое II:

$$\left. \begin{aligned} V_{II} &= \frac{q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_1} \ln\left(\frac{r_x}{r_0}\right); \\ V_b &= \frac{q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_2} \ln\left(\frac{r_x + \delta}{r_0}\right); \\ V_I &= \frac{q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_1} \ln\left(\frac{R}{r_x + \delta}\right). \end{aligned} \right\} \quad (1.53)$$

Когда уровень воздействующего напряжения меньше пробивного напряжения (стационарный режим нагружения), уменьшение коэффициента неравномерности распределения электрического поля при оптимальном местоположении барьера приводит к замедлению процессов разрушения первого изоляционного слоя: уменьшению интенсивности частичных разрядов и увеличению времени до зарождения дендритов в неоднородном диэлектрике. При неравномерном распределении напряженности электрического поля происходит снижение напряжения начала ионизационных процессов, вызывающих разрушение диэлектрика, что согласуется с экспериментальными данными.

Барьерный эффект является следствием перераспределения электрического поля в макроскопически неоднородных диэлектриках. Однако перераспределение поля в конденсированных средах может происходить не только за счёт инъекции носителей заряда из электродов, но и вследствие накопления объёмного заряда на границах раздела неоднородных диэлектриков за счёт миграционной, упругой (электронной и ионной) и дипольно-релаксационной поляризации.

Наибольший эффект повышения пробивного напряжения может быть достигнут при применении в качестве барьеров однородных полярных диэлектрических материалов, обладающих высокой степенью когезионного взаимодействия с основным диэлектриком.

Маслобарьерная изоляция широко применяется в высоковольтной технике при изготовлении трансформаторов, вводов, реакторов и т. п.

1.2.1.2. Механизм пробоя жидких диэлектриков

Экспериментальные результаты по пробую жидких диэлектриков показывают наличие, как минимум, двух областей, связанных со временем воздействия напряжения (рис. 1.29), появление которых объясняется различными механизмами пробоя.

При длительном воздействии напряжения присутствие влаги, газа, загрязнений в жидком диэлектрике сильно снижает его электрическую проч-

ность, причём, наиболее опасным является эмульгированное состояние влаги. Пробой наступает вследствие образования цепочек из мелких поляризованных частиц включений, которые выстраиваются вдоль силовых линий. Эти цепочки образуют более проводящие каналы, по которым протекает ток, разогревающий их и прилегающую к нему жидкость до кипения. Газ в жидкости образуется также за счет диссоциации молекул в электрическом поле и электролиза, в дальнейшем растворенный газ коагулирует в пузырьки при нагреве жидкости токами проводимости.

Образование газовых пузырьков у электрода может также иметь место и при импульсном напряжении как за счет диссоциации молекул жидкости, так и за счет локального вскипания жидкости под воздействием выделенной энергии. В газовых пузырьках развивается ударная ионизация, образуются стримерные каналы, которые развиваются к противоположному электроду. В длинных (сантиметровых) промежутках пробой, как и в газах, имеет лидерный характер.

При воздействии импульсов напряжения с длительностью $\tau < 10^{-3}$ с влияние примесей значительно ослаблено, т. к. они не успевают переместиться на заметные расстояния. Начальная стадия разряда в жидкости возникает при напряженностях около 100 кВ/см. В этом случае начинают проявляться процессы электронной эмиссии и ионизации молекул жидкости. Возможна ударная ионизация у катода и автоионизация жидкости у анода. Все перечисленные явления могут участвовать в иницировании разряда.

1.2.2. Пробой твердых диэлектриков

В зависимости от электрофизических характеристик твердого диэлектрика, вида напряжения и условий работы можно установить три основных вида пробоя.

1. Электрический пробой, возникающий в результате развития ионизации (без химических превращений и перегрева), практически не зависящий от температуры.

2. Тепловой пробой, связанный с разогревом диэлектрика вследствие выделяемой в нем энергии при протекании тока проводимости и диэлектрических потерь. При этом тепловыделение в твердом диэлектрике должно превышать теплоотдачу в окружающую среду, что обуславливает рост температуры во времени, деградацию диэлектрика и формирование проводящего канала.

3. Пробой при длительном приложении напряжении, связанный с развитием необратимых процессов: химических превращений, образованием субмикро – и микротрещин, развитием частичных разрядов.

Пробивная напряженность большинства твердых диэлектриков при электрическом пробое в однородном поле составляет $10^2 \dots 10^3$ кВ/см, при тепловом – $10 \dots 10^2$ кВ/см.

Наиболее сильное влияние на электрическую прочность твердых диэлектриков оказывает время приложения напряжения, температура, толщина диэлектрика, эффект полярности.

1.2.2.1. Влияние условий эксплуатации на электрическую прочность твёрдых диэлектриков

Влияние времени приложения напряжения

Обобщенная вольт-секундная характеристика пробоя твёрдых диэлектриков приведена на рис. 1.34. Если время приложения напряжения не превышает долей секунды, области I и II, то пробой имеет чисто электрический характер. Тепловые процессы в силу своей инерции не успевают развиться столь существенно, чтобы повлиять на $U_{пр}$.

Область III характеризуется резким спадом пробивного напряжения, что, несомненно, говорит о преобладающей роли тепловых процессов при пробое. Область IV – наиболее низкое, квазиустановившееся (очень медленно спадающее во времени) пробивное напряжение, обусловленное медленными процессами деградации (старения) твёрдого диэлектрика.

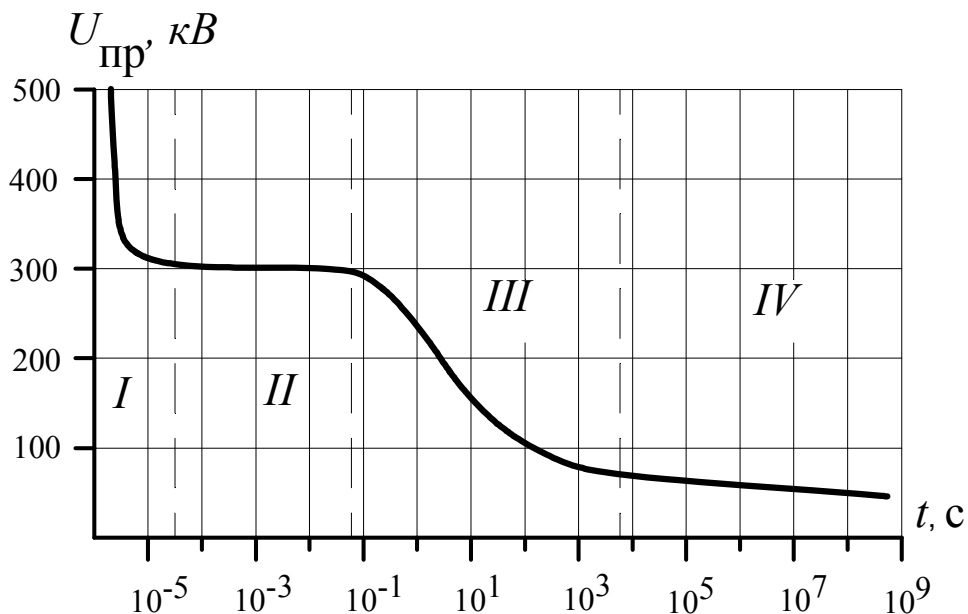


Рис. 1.34. Зависимость пробивного напряжения электрокартона от времени воздействия напряжения: поле – однородное; среда – трансформаторное масло; толщина – 2...2,5 мм

Резкое возрастание пробивного напряжения в области I связано с запаздыванием развития канала пробоя. Скорость развития разрядных каналов в твёрдом диэлектрике зависит от коэффициента перенапряжения и составляет $(0,1...1,0) \cdot 10^6$ см/с. Следовательно, время возникновения резкого возрастания пробивного напряжения будет зависеть от толщины твёрдого диэлектрика.

Зависимость пробивного напряжения от времени приложения напряжения, соответствующая электрической форме пробоя, называется вольт-секундной характеристикой (ВСХ) (на рис. 1.34 это временной интервал $t < 10^{-1}$ с), а при t более 10^{-1} с – вольт-временная.

Влияние толщины диэлектрика и полярности электродов

Электрическая прочность диэлектрика при неизменных геометрических параметрах электродов увеличивается с уменьшением толщины диэлектрика. На рис. 1.35 приведена зависимость электрической прочности $E_{пр}$ непропитанной конденсаторной бумаги от толщины на переменном напряжении 50 Гц.

На рис. 1.36 показана зависимость $U_{пр}$ от толщины диэлектрика на импульсном напряжении для разных полярностей электродов.

Наблюдается резкое возрастание $E_{пр}$ при толщинах 20 мкм и менее. Этот эффект был открыт А.Ф. Иоффе в 1928 году. Тонкие слои диэлектрика используются в изоляции конденсаторов, межвитковой и межслоевой изоляции трансформаторов, бумажно-масляной и пленочно-масляной изоляции кабелей, вводов.

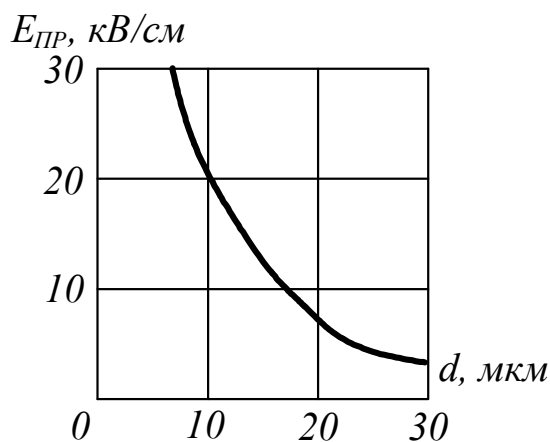


Рис.1.35. Зависимость электрической прочности непропитанной конденсаторной бумаги от толщины на переменном напряжении U_{\sim}

Увеличение пробивного напряжения с ростом толщины изоляции происходит с насыщением как для органической, так и неорганической изоляции (рис. 1.36). Характер этих зависимостей аналогичен $E_{пр}$ газов и жидкостей: снижение электрической прочности $E_{пр}$ диэлектриков с увеличением толщины в широком диапазоне изменения толщин.

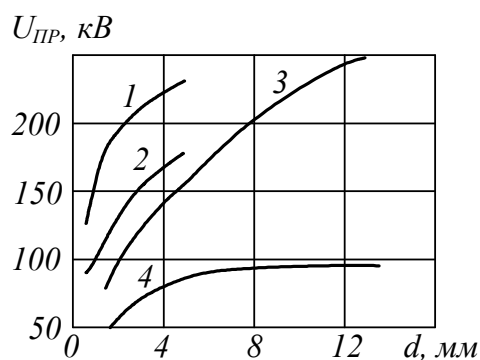


Рис. 1.36. Зависимость $U_{пр}$ от толщины диэлектрика на импульсном напряжении: поле острие-плоскость. 1,2 - оргстекло; 3,4 - NaCl; 1,3-отрицательная, 2,4-положительная полярность острия

Эффект полярности также присущ твёрдым диэлектрикам. Как видно из рис. 1.36, изменение полярности электрода-острия приводит к изменению электрической прочности диэлектрика при одной и той же его толщине. Пробивное напряжение при отрицательной полярности электрода-острия выше, чем при положительной. Эта разница возрастает с увеличением диэлектрической проницаемости ϵ (на рис. 1.36 для оргстекла $\epsilon = 3,5$; для каменной соли $\epsilon = 5,6$). В полярных диэлектриках так же, как и в жидкостях, этот эффект больше, чем в неполярных.

Влияние температуры

Пробой твёрдых диэлектриков в зависимости от температуры внутри диэлектрика имеет достаточно сложный характер и может быть разделён на две области относительно некоторой критической температуры $T_{кр}$. Наличие двух областей характерно как для органических, так и неорганических диэлектриков. На рис. 1.37 приведены подобные зависимости для полиэтилена (кривая 1) и фарфора (кривая 2). В области низких температур пробивное напряжение практически не зависит от температуры.

Начиная с критической температуры (для полиэтилена $T_{кр} \approx +30^{\circ} \text{C}$, для фарфора $T_{кр} \approx +90^{\circ} \text{C}$), происходит резкое и значительное снижение электрической прочности. Зависимости на рис. 1.37 характерны для многих диэлектриков.

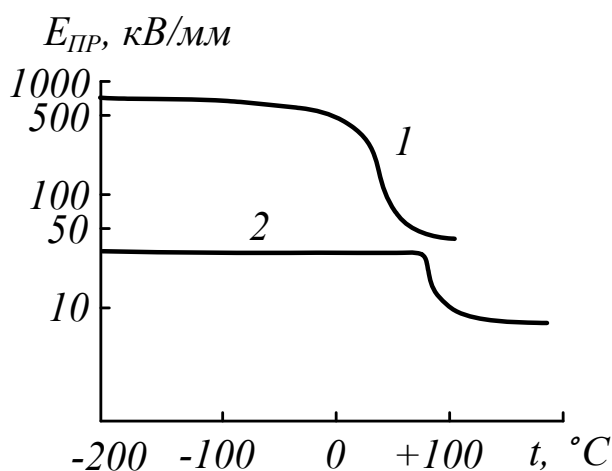


Рис. 1.37. Зависимость электрической прочности от температуры t : 1 – полиэтилен; 2 – фарфор

Следовательно, для одного и того же диэлектрика наблюдается две температурные области: область теплового пробоя – высокие температуры и область электрического пробоя – низкие температуры. Граница этих областей даже для одного и того же материала достаточно условна, поскольку она зависит от условий работы (охлаждение, вид напряжения, форма импульса, частота). При плохом охлаждении изоляции или при высокой температуре окружающей среды эта граница смещается в сторону низких температур.

1.2.2.2. Механизм электрического пробоя твердых диэлектриков

Электрический пробой твердых диэлектриков происходит в тех случаях, когда исключена возможность существенного разогрева диэлектрика или процессов старения. Весь этот процесс может быть изображен графически при помощи вольтамперной характеристики (рис. 1.38), где на участке $0a$ - проводимость диэлектрика не изменяется (соблюдается закон Ома); ab - ток быстро возрастает не пропорционально напряжению (нарушение закона Ома); bc - предпробивное состояние, после которого ток катастрофически увеличивается за счет увеличения проводимости (падение напряжения при этом на диэлектрике уменьшается).

Пробой твердых диэлектриков всегда ассоциируется с возникновением канала, обладающего высокой проводимостью и замыкающего разрядный промежуток.

Электрический пробой обычно связывают с кратковременным, импульсным воздействием на изоляцию высокого напряжения. Отсутствие научно обоснованных инженерных методов расчёта затрудняет эффективное использование твердой изоляции во всем многообразии ее современного применения.

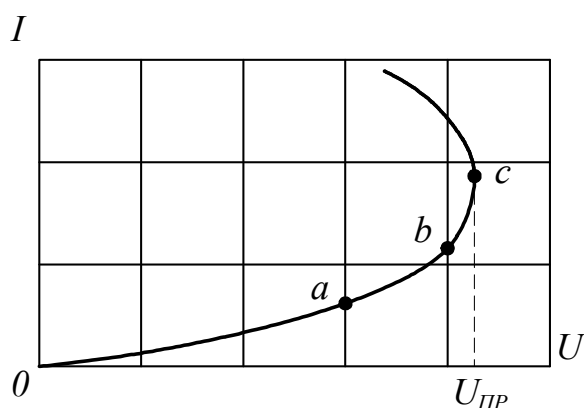


Рис. 1.38. Вольтамперная характеристика твердого диэлектрика (общий вид)

При электрической форме пробоя по аналогии с газообразными диэлектриками механизм пробоя твердых диэлектриков основывался также на ударной ионизации электронами валентной зоны. Сама же реализация этого механизма полагалась очевидной.

Вершининым Ю.Н. предложен (2000 г.) иной подход и описание механизмов электрического пробоя твердых диэлектриков, позволившие целенаправленно выбирать диэлектрики и их свойства, обеспечивающие необходимые технические требования к электрической изоляции высоковольтных устройств и установок.

Распространение каналов разряда неразрывно связано с возникновением и перемещением в объеме твердого диэлектрика фазовых переходов первого рода. При разряде с катода это переход «твердое тело-расплав», а при разряде с анода – «твердое тело-плотная плазма». Возникновение первичного канала раз-

ряда как с катода, так и с анода имеет одинаковую тепловую физическую природу. Различие состоит лишь в том, что при разряде с катода в его формировании участвуют преимущественно несобственные электроны, инжектированные из катода, а при разряде с анода - собственные электроны из мелких донорных уровней. Знание этих механизмов позволяет управлять процессом пробоя, например, методом легирования приэлектродных областей.

Предпробивной этап развития разряда в твёрдых диэлектриках состоит из двух стадий. На первой стадии происходит формирование начального участка канала – первичного канала разряда. Эта стадия является следствием возникновения в приэлектродной области разрядного промежутка электронов проводимости и развития неустойчивостей в их коллективе. При достижении в локальной области диэлектрика плотности тока j , превышающей некоторое критическое значение $j_{кр}$, там создаются условия для перехода твердого вещества диэлектрика в расплав.

Закономерности и механизм формирования разряда

Предпробивной этап развития импульсного разряда завершается при замыкании каналом всего разрядного промежутка. Этим завершается первая стадия. Вторая стадия начинается, когда электрический разряд переходит в состояние дуги, горящей в ограниченном пространстве. На этом завершающем этапе пробоя принципиально изменяются факторы, определяющие физическое содержание процесса. На предпробивном этапе определяющими факторами являются параметры импульса напряжения, свойства диэлектрика и геометрия разрядного промежутка. На втором этапе главная роль отводится электрическим параметрам разрядной цепи и источника энергии. Это одна из моделей, описывающих электрический пробой твёрдых диэлектриков. Она основана на современных достижениях физики твёрдого тела науки о процессах, происходящих в твёрдых диэлектриках при воздействии сильных электрических полей.

Предложенный Вершининым Ю.Н. подход к описанию процессов распространения разряда в твёрдых диэлектриках открывает принципиально новые возможности для исследования этого явления и управления собственно процессом электрического пробоя. В итоге, речь идёт о целенаправленном выборе диэлектриков и их свойств, обеспечивающих необходимые технические требования к электрической изоляции высоковольтных импульсных устройств и установок. Основанием для такого утверждения являются следующие соображения. Во-первых, были определены условия возникновения начального этапа пробоя – образования первичного канала разряда и факторы, позволяющие воздействовать на этот процесс. Во-вторых, в рамках предложенных механизмов процесса распространения каналов разряда впервые сформулированы соотношения, связывающие параметры импульса напряжения (U , dU/dt), пространственно-временные характеристики пробоя (v_p , r_0 , τ_3), индивидуальные свойства диэлектрика (ϵ , ρ_0 , δ , K), состав и термодинамические свойства вещества в каналах разряда (χ_e , p , T , U , H , σ).

На основании рассматриваемой теории пробоя твердых диэлектриков получены энергетические уравнения электрической прочности:

– при положительной полярности импульса напряжения

$$E_{np}^2 = C_1 \frac{dT}{n_0} e^{-\alpha d} \cdot A_c^0 \text{ (кВ/см)}, \quad (1.54)$$

– при отрицательной полярности импульса напряжения;

$$E_{np}^2 = C_2 \frac{dT}{P_0} e^{-\beta d} \cdot A_c^0 \text{ (кВ/см)}, \quad (1.55)$$

где d – толщина диэлектрика, см;

T – температура, К;

n_0 – начальное число электронов;

α – коэффициент ударной ионизации;

A_c^0 – энергетическая характеристика диэлектрика, ккал/см³;

P_0 – начальное число дырок;

β – коэффициент ударной ионизации дырками ($\beta = \alpha/3$);

C_1, C_2 – коэффициенты пропорциональности, зависящей от числа актов взаимодействия электронов (C_1) или дырок (C_2) с узлами решетки.

Поскольку подвижность электронов больше, чем дырок $n_0 < P_0$ и $\alpha > \beta$, то $E_{np}^+ < E_{np}^-$. Величина A_c^0 является индивидуальным признаком материала диэлектрика.

$$A_c = W_c + B_c, \quad (1.56)$$

где W_c – энергия каналообразования;

B_c – потенциальная энергия сил отталкивания частиц в канале;

$$W_c^0 = W_c \frac{m}{NV_0}, \quad (1.57)$$

$$B_c^0 = B_c \frac{m}{NV_0}, \quad (1.58)$$

где m – число формальных весов в элементарной ячейке;

N – число Авогадро,

V_0 – объем элементарной ячейки;

$$A_c^0 = W_c^0 + B_c^0 = A_c \frac{\gamma}{M}, \quad (1.59)$$

где γ – плотность материала,

M – молекулярный вес.

Применительно к электрическому разряду, как с катода, так и с анода впервые получены аналитические соотношения, связывающие индивидуальные свойства твёрдого диэлектрика и параметры высоковольтного импульса напряжения с пространственно-временными характеристиками импульсного разряда.

Необходимо отметить, что история исследований электрического разряда превышает полтора столетия и, тем не менее, далека до завершения. Исследования электрической прочности твёрдых диэлектриков и полупроводников в области микро- и наносекундных длительностей воздействия импульсных напряжений привело к открытию принципиально нового эффекта названного электоримпульсным.

С уменьшением времени экспозиции импульсного напряжения прочность жидких диэлектриков растёт быстрее, чем твёрдых диэлектриков, что приводит к инверсии соотношения электрических прочностей сред (рис. 1.39).

На импульсном напряжении при экспозиции напряжения менее 10^{-6} с электрическая прочность диэлектрических жидкостей и даже технической воды возрастает настолько, что становится выше прочности твердых диэлектриков и горных пород.

На рис. 1.39 дано сопоставление вольт-секундных характеристик пробы твердого тела (горной породы) и жидкой среды в одинаковом разрядном промежутке.

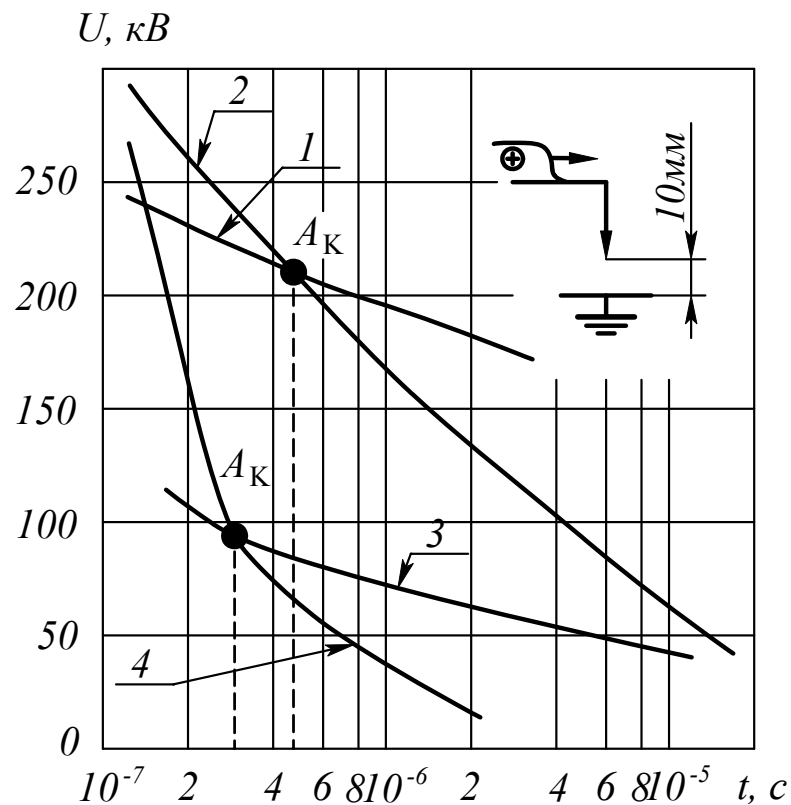


Рис. 1.39. Вольт-секундные характеристики некоторых горных пород и жидких сред на косоугольных импульсах напряжения: 1 – кварц, 2 – трансформаторное масло, 3 – песчаник, 4 – вода

Точка пересечения вольт-секундных характеристик A_k соответствует равенству прочностей и вероятности электрического пробоя сравниваемых сред. При экспозиции импульсного напряжения менее 10^{-6} с горная порода становится электрически слабее такого жидкого диэлектрика, как трансформаторное масло, а при экспозиции менее $(2-3) \times 10^{-7}$ с – слабее технической воды. В области левее A_k преобладает электрический пробой твердого тела. В диэлектрических жидкостях условия для реализации процесса более благоприятные, пробой в недиэлектрической жидкости требует импульсов напряжения с длительностью фронта на порядок меньше (10^{-7} с) и более высокого напряжения. Так как в этом случае система электродов представляет для источника импульсов низкоомную нагрузку, то формирование на породоразрушающем инструменте импульсов напряжения с требуемыми, параметрами представляет определенную техническую проблему.

Реализация отмеченного эффекта инверсии электрической прочности диэлектриков в применении к разрушению пород поясняется на рис. 1.40. Когда к электродам, установленным на одной поверхности твердого тела, прикладывается импульс напряжения $U(t)$ с параметрами, соответствующими левой части графика от точки равнопрочности A_k , пробой в промежутке с вероятностью более 50 % происходит внутри твердого тела, а не по кратчайшему пути по поверхности твердого тела. Далее это явление будет называться внедрение разряда в твердое тело.

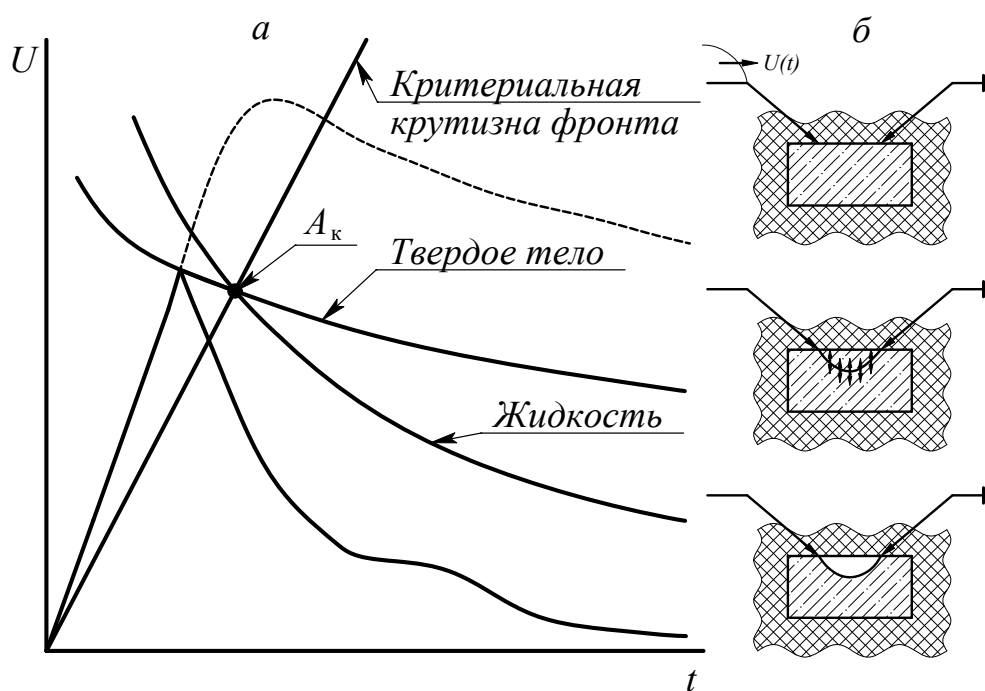


Рис. 1.40. Принцип электроимпульсного разрушения: а – сопоставление вольт-секундных характеристик различных сред, б – последовательность процессов пробоя и разрушения в системе с одной свободной поверхностью

Крутизна фронта импульса напряжения, соответствующая точке пересечения вольт-секундной характеристики (A_k), т. е. условию равнопрочности сред,

и получившая название критической крутизны импульсного напряжения, стала первым важным критерием для характеристики условий электроимпульсного внедрения.

Одним из основных факторов, влияющих на развитие канала пробоя, является объемный заряд, накапливающийся в жидкости вблизи стержневых электродов по мере развития ионизационных и лидерных процессов. Объемный заряд, в первую очередь, приводит к выравниванию электрического поля в жидкости. Процесс этот динамический и в очень сильной степени зависит от напряженности электрического поля на остром электроде и времени воздействия напряжения. При некотором значении времени приложения напряжения, заряженные частицы не успевают покинуть зону ионизации вблизи острия. Происходит накопление объемного заряда в жидкости, что приводит к уменьшению напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке между границей объемного заряда и противоположным электродом.

Это предположение подтверждается результатами экспериментальных исследований процесса пробоя жидких диэлектриков, выполненных в настоящее время. Установлено, что процесс зарождения канала разряда всегда сопровождается возникновением сферического светящегося образования вблизи острейшего электрода, которое состоит из коротких (1,5...2 мм) вспыхивающих отрезков сильно ионизированных лидерных каналов. Число заряженных частиц в этих каналах достигает $10^{14} \dots 10^{16}$ 1/см. Вследствие этого начальная картина электрического поля будет изменена – снизится напряженность поля у электрода. Например, промежуток с начальным резконеоднородным полем имел коэффициент неоднородности 375, в результате возникновения разряда преобразовался в промежуток с умеренно неоднородным полем с коэффициентом неоднородности меньшим по сравнению с начальным в 31,2 раза.

Вопрос о существовании зоны ионизации в жидкости, как самостоятельном структурном элементе разряда, обсуждается в литературе с точки зрения размеров зоны.

Лидерная стадия пробоя сопровождается значительным изменением электрических характеристик. Наиболее существенным является тот факт, что по мере роста лидеров поле в промежутке между электродами выравнивается, поскольку начальная стадия представляет, как правило, прорастание большого числа лидеров, создающих поле близкое к сферически симметричному. В области микро- и наносекундных длительностей воздействующего напряжения не выявлено качественных различий в формировании разрядов. В связи с этим дальнейшее продвижение лидерных разрядов в глубь межэлектродного промежутка замедляется или прекращается, а лидерные процессы происходят между острым электродом и границей объемного разряда. Дальнейшее продвижение канала разряда в жидкости и по поверхности твердого диэлектрика возможно при значительном увеличении напряжения. Напряженность электрического поля в твердом диэлектрике определяется радиусом головки лидера, развивающегося по поверхности раздела в зоне объемного заряда, и описывается формулой:

$$E_{\text{кан}} = \frac{U}{1,15r_{\text{кан}} \lg\left(\frac{4S}{r_{\text{кан}}}\right)}, \quad (1.60)$$

где $E_{\text{кан}}$ – напряженность электрического поля на головке канала лидера; U – приложенное к электродам напряжение; $r_{\text{кан}}$ – радиус канала лидера; S – расстояние между электродами.

При необходимой величине напряжения (напряженности) на острейшем электроде напряженность на головке лидера оказывается достаточной для зажигания разряда в твердом теле. Таким образом, вблизи острейшего электрода возникает зона, занятая объемным зарядом, в которой разряд в твердое тело не может быть внедрен. Внедрение канала разряда в твердое тело вероятнее всего начинается на границе объемного заряда. Эта зона представляет собой эллипс вокруг острейшего электрода, большая ось которого направлена в сторону противоположного электрода. Наличие такой зоны обнаружено экспериментально. Значит, можно предположить, что объемный заряд в жидкости вблизи острейшего электрода создает квазиоднородное поле, что уменьшает вероятность дальнейшего развития лидерных процессов в жидкости ввиду резкого снижения напряженности электрического поля на границе объемного заряда. А пробивное напряжение жидкого диэлектрика в пределе будет соответствовать квазиоднородному полю $U_{\text{ж.одн.}}$. В твердом диэлектрике поле будет оставаться резконеоднородным и определяться конфигурацией каналов лидерных разрядов по поверхности раздела твердое тело – жидкость. Радиус этих каналов составляет десятые или сотые доли миллиметра, что определяет минимально возможные пробивные напряжения $U_{\text{т.мин.}}$. В связи с главенствующей ролью объемного заряда в распределении электрического поля между электродами и, как следствие, в определении величины пробивного напряжения становится понятной разная скорость возрастания $U_{\text{пр}}$ на вольт-секундные характеристики. Происходит не уменьшение электрической прочности твердых диэлектриков $E_{\text{т}}$ по сравнению с жидкими, а имеет место разная скорость и величина накопления объемного заряда в диэлектриках. Оценка пробивных напряжений жидкого и твердого диэлектриков позволяет определить критерий возможного внедрения канала разряда в твердое тело, находящегося в среде жидкого диэлектрика.

Возможность пробоя твердого диэлектрика определяется условием

$$U_{\text{ж.одн.}} \geq U_{\text{т.мин.}} \quad (1.61)$$

Или, если перейти к напряженности электрического поля, пробой твердого тела возможен тогда, когда пробивная напряженность в нем $E_{\text{т.мин}}$ будет меньше или равна пробивной напряженности жидкого диэлектрика в однородном поле $E_{\text{ж.одн.}}$. Подобное условие может быть выполнено, если пробивное напряжение жидкого диэлектрика возрастает за счет выравнивания электрического поля объемными зарядами, а $E_{\text{т.мин}} = E_{\text{кан}}$ по (1.60). Это условие соответствует отношению

$$E_{т.мин}/E_{ж.одн.} \leq n_{max}. \quad (1.62)$$

При $n > n_{max}$ внедрения канала разряда в твердый диэлектрик не будет. Следовательно, критерием внедрения канала разряда в твердый диэлектрик в жидкой среде при расположении электродов на одной поверхности твердого диэлектрика является различие в изменении значения напряженности электрического поля между электродами в твердом и жидком диэлектриках в процессе развития канала разряда в результате различного механизма образования в них объемного разряда вблизи острейшего электрода. Данная гипотеза подтверждается рядом экспериментальных результатов: наличие запрещенной зоны, динамика скорости развития разряда при пробое, изменение вольт-секундной характеристик жидких и твердых диэлектриков.

Нельзя не согласиться с мнением профессора Воробьева А.А., который утверждал, что важнейшей задачей физики электрического пробоя конденсированных диэлектриков является понимание процессов, приводящих к формированию и развитию в этих диэлектриках каналов разряда. В свою очередь профессор Ретер Г. отметил: "Между катодом и анодом существует больше явлений, чем это представляется вашему воображению".

1.2.2.3. Тепловой пробой твердых диэлектриков

При всех разрешенных режимах работы изоляционной конструкции наибольшие температуры ее элементов не должны превышать допустимые значения. Необходимо, чтобы выделяющееся в ней тепло надежно отводилось в окружающую среду. В противном случае происходит ускоренное тепловое старение и сокращение ресурса изоляционной конструкции или нарушение ее тепловой устойчивости, т.е. тепловой пробой.

Для теплового пробоя характерны следующие признаки:

- 1) пробивное напряжение уменьшается с увеличением длительности приложения напряжения;
- 2) пробивное напряжение уменьшается с ростом толщины образца;
- 3) пробой происходит в том месте, где теплоотдача в окружающую среду наименьшая;
- 4) тепловой пробой наиболее часто происходит при напряженностях поля $E_{пр} = 10 \div 10^2$ кВ/см.

Развитие теплового пробоя в общих чертах может быть представлено в виде следующей последовательности:

$$U_d \rightarrow I_d \rightarrow T_d \uparrow \rightarrow \gamma \uparrow \text{ и } \text{tg } \delta \uparrow \rightarrow I_d \uparrow \rightarrow T_d \uparrow \text{ и т.д.,}$$

где U_d – напряжение, приложенное к диэлектрику;

I_d – ток, текущий через диэлектрик;

T_d – температура диэлектрика;

γ и $\text{tg } \delta$ – проводимость и угол диэлектрических потерь диэлектрика.

Нагрев изоляционной конструкции происходит, в общем случае, за счет потерь в токоведущих частях и в самой изоляции.

Мощность потерь энергии при постоянном токе

$$P_{\text{п}} = U \cdot I = I^2 \cdot R = I^2 / \gamma, \quad (1.63)$$

где R – сопротивление изоляции.

Мощность диэлектрических потерь в изоляции при синусоидальном напряжении

$$P_{\text{д}} = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot U^2 \cdot \text{tg}\delta, \quad (1.64)$$

где f – частота переменного тока;

C – емкость изоляции.

Удельная мощность потерь

$$P_{\text{д}} = 2\pi \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot \text{tg}\delta, \quad (1.65)$$

где E – напряженность электрического поля в изоляции.

Потери энергии в твердом диэлектрике приводят к повышению его температуры. С увеличением температуры увеличивается $\text{tg}\delta$ по закону

$$\text{tg}\delta(T) = \text{tg}\delta_0 \cdot e^{a(T-T_0)}, \quad (1.66)$$

где $\text{tg}\delta_0$ – тангенс угла диэлектрических потерь при заданной температуре T_0 , например, при $+20^\circ \text{C}$;

a – коэффициент, зависящий от свойств изоляции;

T_0 – исходная температура окружающей среды.

Для относительно узкого интервала возможных рабочих температур зависимость γ (ионная проводимость) от температуры T как для жидких, так и для твердых диэлектриков может быть выражена в виде

$$\gamma = \gamma_0 \cdot e^{\beta(T-T_0)}, \quad (1.67)$$

где γ_0 – проводимость при температуре T_0 ;

β – коэффициент, определяемый опытным путем.

Ионная проводимость не зависит от напряженности вплоть до предпробивных полей.

Тепловой пробой – это нарушение теплового равновесия в изоляционной конструкции, следствием которого является неограниченный рост наибольшей температуры $T_{\text{макс}}$ и разрушение изоляции. Он происходит при напряжении $U_{\text{пр}}$, когда выполняется условие

$$\frac{\partial U}{\partial T_{\text{макс}}} = 0. \quad (1.68)$$

Основу методики расчетов составляет решение дифференциального уравнения вида

$$\frac{d^2T}{dZ^2} = -\frac{P_d}{k}, \quad (1.69)$$

где Z – координата, по которой происходит основной теплоперенос от наиболее нагретой области;

P_d – удельные потери мощности;

k – коэффициент теплопроводности.

При этом необходимо задать граничные условия. Для плоского диэлектрика на постоянном напряжении граничные условия могут быть записаны в следующем виде (рис. 1.41)

$$I. k \left(\frac{dT}{dZ} \right)_{z=h} = k_1 \left(\frac{dT}{dZ} \right)_{z=h}, \quad (1.70)$$

где k_1 - коэффициент теплопроводности электродов.

Т.е. на границе раздела диэлектрик-электрод поток тепла непрерывен: сколько тепла подходит из диэлектрика, столько же отводится в электрод.

$$II. k_1 \left(\frac{dT}{dZ} \right)_{z=h+\delta} = \lambda(T_2 - T_0), \quad (1.71)$$

где λ - коэффициент теплоотдачи с поверхности электродов во внешнюю среду; сколько тепла подошло к внешней поверхности электрода, столько и отведено во внешнюю среду.

$$III. \left(\frac{dT}{dZ} \right)_{z=0} = 0. \quad (1.72)$$

Это условие показывает, что температура для симметричной конструкции нашего диэлектрика максимальна в центре его.

Рассмотрим слой однородного диэлектрика (рис. 1.41) с толщиной $2h=d$, находящегося между бесконечными плоскими электродами (конденсатор).

Дифференциальное уравнение, соответствующее равновесному тепловому состоянию системы, имеет вид

$$k \left(\frac{dT}{dZ} \right)_{z+dz} - k \left(\frac{dT}{dZ} \right)_z = \gamma_3 \cdot E^2 dZ, \quad (1.73)$$

где γ_3 – эквивалентная удельная проводимость диэлектрика; для постоянного напряжения $\gamma_3 = \gamma_0$, для переменного напряжения $\gamma_3 = \omega \cdot \varepsilon \cdot \text{tg}\delta$.

Уравнение (1.73) показывает, что поток тепла, входящий за 1 секунду в слой диэлектрика толщиной dZ и площадью 1 см^2 , будет меньше потока, выходящего из этого слоя, на количество тепла, выделяющегося в этом слое за 1 секунду вследствие диэлектрических потерь.

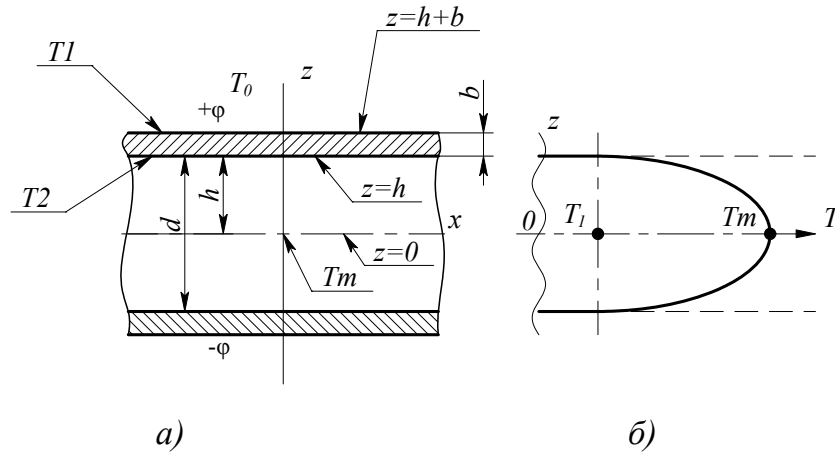


Рис. 1.41. Схема к расчету теплового пробоя диэлектрика а) и график изменения температуры внутри диэлектрика б): ϕ - потенциалы электродов; d - толщина диэлектрика; h - половина толщины диэлектрика, $h=d/2$; δ - толщина электрода; T_0 - температура окружающей среды; T_1 - температура границы электрод-диэлектрик; T_2 - температура внешней поверхности электрода; T_m - максимальная температура в центре диэлектрика

Решение дифференциального уравнения (1.70) для указанных выше граничных условий и использование условия (1.68) дает следующие выражения для пробивного напряжения:

при переменном напряжении

$$U_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{8k}{a \cdot \gamma_3}} \cdot e^{a(T-T_0)/2} \cdot \varphi(c), \quad (1.74)$$

при постоянном напряжении

$$U_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{8k}{a \cdot \gamma_0}} \cdot e^{a(T-T_0)/2} \cdot \varphi_1(c), \quad (1.75)$$

где $\gamma_3 = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \text{tg} \delta$ - для переменного напряжения,

$\varphi(c)$, $\varphi_1(c)$ - функции параметра c , графики которых приведены на рис. 1.42.

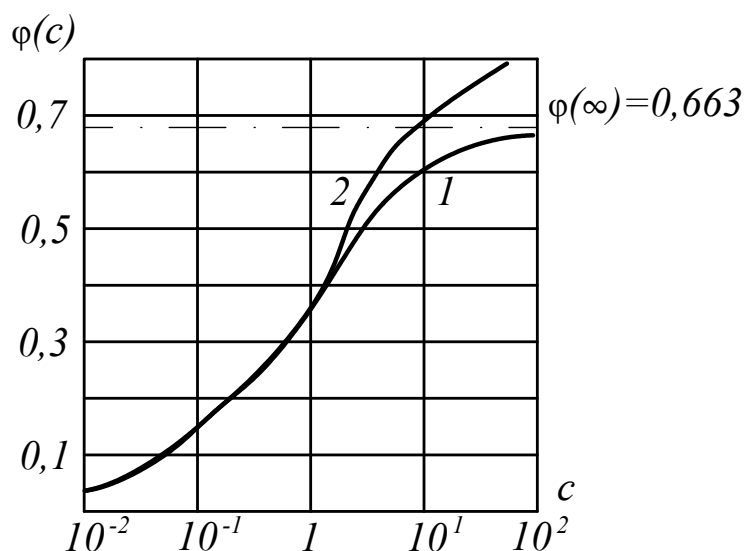


Рис. 1.42. Функция $\varphi(c)$ и $\varphi_1(c)$ к расчету теплового пробоя: 1 – переменное напряжение; 2 – постоянное напряжение

При увеличении толщины изоляции d функция $\varphi(c)$ для переменного напряжения в пределе стремится к 0,663, а функция $\varphi_1(c)$ для постоянного напряжения – $k=1,0$. Следовательно, предельно достижимые значения пробивного напряжения (при $T=T_0$) будут при переменном напряжении

$$U_{пр} = 0,663 \sqrt{\frac{8k}{a \cdot \gamma_3}}, \quad (1.76)$$

при постоянном напряжении

$$U_{пр} = \sqrt{\frac{8k}{a \cdot \gamma_0}}. \quad (1.77)$$

Сравнивая (1.74) и (1.75), получаем, что на переменном напряжении $U_{пр}$ меньше, чем на постоянном, поскольку $\varphi(c) < \varphi_1(c)$. Такое различие обусловлено неодинаковым распределением потенциалов по толщине диэлектрика и разной величиной потерь мощности в диэлектрике.

1.2.2.4. Длительная электрическая прочность

твердых диэлектриков

При длительной эксплуатации электроизоляционных устройств происходит старение твердой изоляции, которое выражается в уменьшении кратковременной электрической прочности, увеличении проводимости и диэлектрических потерь и, как следствие, в ограничении срока службы изоляционных конструкций. В связи с этим при разработке и изготовлении оборудования высокого напряжения, а также при организации его эксплуатации должны предусмат-

риваться меры, снижающие темпы старения изоляции. Изменения свойств изоляции при эксплуатации происходят за счет энергии от источников внешних нагрузок: электрические и тепловые поля, поле механических напряжений, химические взаимодействия с окружающей средой.

Причинами старения внутренней изоляции является:

- 1) старение вследствие развития частичных разрядов (независимых разрядов в имеющихся порах или образующихся дендритах) при перенапряжениях и рабочем напряжении;
- 2) тепловая деструкция материала;
- 3) увлажнение изоляции и водный триинг (рост древовидных насыщенных водой фигур);
- 4) электрохимическое старение;
- 5) механическое старение и повреждения за счет электродинамических усилий, вибраций и т.п.

Как правило, при воздействии электрического поля изоляция подвержена комплексу названных выше воздействий или, в крайнем случае, двум-трем факторам, но преобладать может какой-то один. Такое многофакторное воздействие до настоящего времени не позволяет связать «время жизни» изоляции с каким-либо одним определяющим фактором.

Старение имеет место при напряженностях электрического поля, во много раз меньших пробивных при кратковременном приложении напряжения (в 5...20 раз и более). С увеличением напряжения U , приложенного к изоляции любого типа, темпы электрического старения возрастают, а срок службы t соответственно уменьшается. Зависимость $t=f(U)$ в широком диапазоне времен имеет сложный характер. Интенсивность электрического старения любой изоляционной конструкции зависит не только от значения воздействующего напряжения, но и от ряда факторов, не поддающихся контролю, например, от количества, размеров и расположения микронеровностей на поверхности электродов и микро- и макронеоднородностей в объеме изоляции. Поэтому срок службы изоляционной конструкции любого типа при заданном напряжении является величиной случайной.

Электрическая прочность при длительном приложении напряжения характеризует способность изоляции выдерживать рабочее напряжение в течение определенного срока службы и численно определяется напряженностью электрического поля (напряжением), приводящей к разрушению изоляции к концу заданного периода эксплуатации, например, через 20...30 лет.

Для описания общего вида отказов изоляционных устройств во времени используют зависимость интенсивности отказов $\lambda(t)$. Эта важная характеристика определяет надежность работы изоляции в каждый момент времени t .

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ есть вероятность того, что электроизоляционное устройство, дожившее до момента t , откажет за следующую единицу времени. Функция $\lambda(t)$, приведенная на рис. 1.43, имеет большое практическое значение для анализа результатов времени работы объекта. На рис. 1.43 в общем виде приведена зависимость $\lambda(t)$.

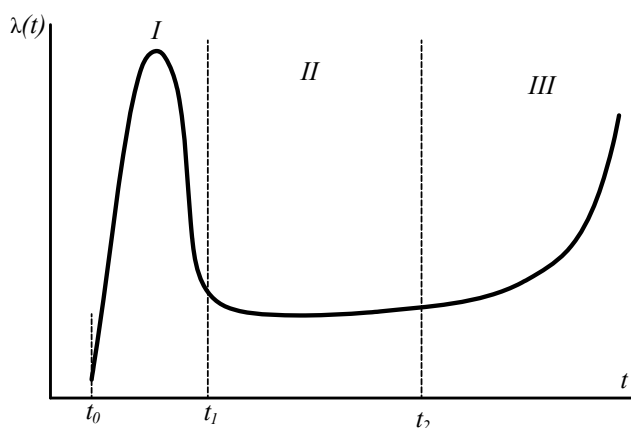


Рис. 1.43. Зависимость интенсивности отказов электроизоляционных устройств от времени работы

На рис. 1.43 различают 3 области:

I – область начальных отказов – область приработки ($t_0 - t_1$);

II – область случайных отказов – рабочая область ($t_1 - t_2$);

III – область износных отказов – старение ($t > t_2$).

Область I – приработка связана с выходом из строя (отказами) изоляции за счет грубых технологических дефектов в процессе ее изготовления. К концу периода ($t_0 - t_1$) эти дефекты полностью выявляются и интенсивность отказов резко понижается. Следовательно, при правильно проведенных предварительных заводских испытаниях можно выявить брак в изоляции и повысить надежность ее эксплуатации в работе.

Область II – внезапные случайные отказы, которые не могут быть устранены приработкой. Они возникают внезапно и определяются случайным сочетанием ряда неблагоприятных факторов, действующих на изоляцию – высокие амплитуды перенапряжений, перегрев изоляции, повышенные случайные механические нагрузки, атмосферные воздействия и др. Здесь интенсивность отказов остается величиной постоянной.

Область III – отказы вызываются общим старением изоляции, износные отказы, которые связаны с длительным приложением электрического поля к изоляции и всеми сопутствующими ему процессами. Увеличение времени работы изоляции больше t_2 нецелесообразно, т.к. это приводит к снижению надежности ее работы, к увеличению аварийности.

Наиболее желательной областью эксплуатации электроизоляционных устройств является область случайных отказов ($t_1 - t_2$). В этой области интенсивность отказов минимальна.

Задача выбора рабочей напряженности E_p для высоковольтного изоляционного устройства, обеспечивающей требуемый срок службы, достаточно сложна и требует большого объема экспериментальных исследований, поскольку в большинстве случаев расчеты базируются на эмпирических предположениях. Эффективным методом определения E_p является расчет по уравнению

"кривой жизни". Это уравнение является основной характеристикой, позволяющей экстраполировать экспериментальные результаты в область рабочих напряженностей электрического поля. Оно наиболее часто записывается в виде

$$t = A \cdot E^{-n}, \quad (1.78)$$

где t – «время жизни» изоляции при напряженности E ;

A, n – коэффициенты, определяемые экспериментально: коэффициент A – известное значение "времени жизни" t_0 при заданной напряженности E_0 , т.е. $A = t_0 \cdot E_0^n$; коэффициент n – тангенс угла наклона «кривой жизни» (рис. 1.44) – коэффициент скорости старения: $n = \text{tg } \beta$.

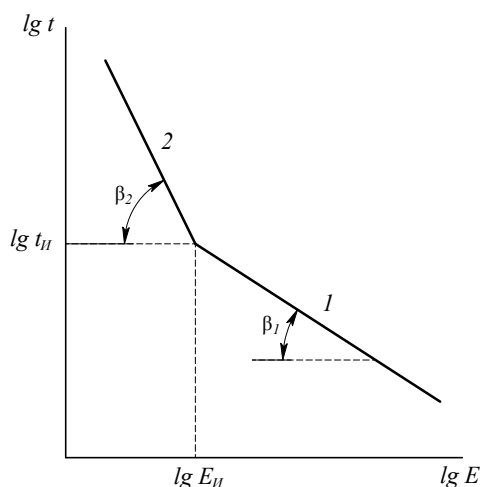


Рис. 1.44. Зависимость $\lg t = f(\lg E)$

Подставляя значения коэффициентов в (1.78), получим:

$$t = t_0 \left(\frac{E_0}{E} \right)^n. \quad (1.79)$$

Исследования поведения «кривой жизни» в широком диапазоне напряженностей электрического поля показали, что для полимеров в координатах $\lg t$ и $\lg E$ она состоит из двух прямолинейных участков (рис. 1.44), для которых A и n различны.

В этой связи уравнение (1.78) будет иметь вид:

$$t = A_i \cdot E^{-n_i}, \quad (1.80)$$

где $i = 1, 2$, т.е. для каждого участка должны быть определены свои значения A и n : A_1, n_1 относятся к $E > E_{и}$, а A_2, n_2 – к $E < E_{и}$. Точка перегиба $\lg t(\lg E_{и})$ (рис. 1.44) соответствует напряженности, при которой уменьшение E приводит к исчезновению критических частичных разрядов и к увеличению коэффициентов A и n и резкому увеличению времени до пробоя.

Выражение (1.78) имеет существенный недостаток – невозможно прогнозировать надежность работы изоляции, поскольку отсутствует вероятностная оценка отказов. При длительном воздействии электрического поля на партию идентичных электроизоляционных устройств будет иметь место большой разброс времени до пробоя, достигающий нескольких порядков.

Пробой – явление случайное, связанное с индивидуальными особенностями микро – и макроструктуры изоляции отдельных изделий. Пробой происходит в наиболее слабом месте изоляции. Концепция «слабейшего звена», которая учитывает распределение минимальных сроков службы, на сегодня является наиболее разработанной в приложении к теории пробоя электрической изоляции. С этой точки зрения наиболее приемлемым и физически обоснованным для описания «времени жизни» является вероятностное уравнение Вейбулла. Для конкретного значения испытательной напряженности электрического поля $E_{исп}$ функция распределения времени до пробоя имеет вид

$$Q(t) = 1 - \exp(-B \cdot t^b), \quad (1.81)$$

где $Q(t)$ – вероятность пробоя изоляции; B и b – параметры уравнения Вейбулла, определяемые экспериментально.

Практическая ценность выражения (1.81) заключается в возможности оценок долговечности работы изоляционного устройства с любым уровнем надежности. Для описания "кривой жизни" уравнение Вейбулла имеет вид:

$$Q(E, t) = 1 - \exp[-C \cdot E^a \cdot B \cdot t^b], \quad (1.82)$$

где C , a – определяемые экспериментально параметры уравнения Вейбулла, описывающие распределение пробивных напряженностей изоляции.

Литература к главе № 1

1. Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. Основы физики плазмы. – М.: Атомиздат, 1977. – 384 с.
2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1992. – 536 с.
3. Попков В.И. Коронный разряд и линии сверхвысокого напряжения. Избранные труды. – М.: Наука, 1990. – 256 с.
4. Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975. – 272 с.
5. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. М.: Изд-во МФТИ, 1997. – 320 с.
6. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. – М.: Наука, 1966. – 564 с.
7. Базелян Э.М., Ражанский И.М. Искровой разряд в воздухе. - М.: Наука, 1988. – 232 с.

8. Ушаков В.Я. Изоляция установок высокого напряжения. Энергоатомиздат 1994. – 230 с.
9. Адамчевский И.А. Электрическая проводимость жидких диэлектриков. - Л.: Энергия, 1972. – 295 с.
10. Воробьев Г.А. Диэлектрические свойства электроизоляционных материалов. – Томск: Изд-во ТГУ, 1984. – 312 с.
11. С. Уайтхед. Пробой твердых диэлектриков. - М.; Л.: 1957. – 272 с.
12. Воробьев А.А., Завадовская Е.К. Электрическая прочность твердых диэлектриков. – М.: Гос. Изд-во технико-теоретической литературы, 1956. – 312 с.
13. Воробьев А.А., Воробьев Г.А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. – М.: Высшая школа, 1966. – 224 с.
14. Важев В.Ф. Пробой твердых диэлектриков. – Томск: Изд-во ТПУ, 1992. – 80 с.
15. Ларионов В.П., Базуткин В.В., Сергеев Ю.Г. Техника высоких напряжений. – М.: Энергоиздат, 1982. – 296 с.
16. Ражанский И.М. Физические процессы при разряде в воздушных промежутках. Учебное пособие./ Новосибирский электротехнический институт. – Новосибирск, 1985.- 71 с.
17. Куртенков Г.Е. Разрядные процессы в газах. Учебное пособие./ Томский политехнический университет- Томск, 1993. – 96 с.
18. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения. /Под ред. Г.Н. Александрова, Л.Л. Петерсена. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 366 с.
18. Свидетельство на открытие № А-122 от 29.04.1998 с приоритетом от 14.12.1961 / А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев, А.Т. Чепиков. Закономерности пробоя твердого диэлектрика на границе раздела с жидким диэлектриком при действии импульса напряжения.
19. Вершинин Ю.Н. Электрический пробой твердых диэлектриков. – Новосибирск: Наука, 1968. – 211 с.
20. Вершинин Ю.Н. Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. – Екатеринбург: Из-во УРО РАН, 2000. – 259 с.
21. Уиди Б. Кабельные линии высокого напряжения: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 232 с.
22. Физика диэлектриков / Под ред. А.Ф. Вальтера. – М.-Л.: ГТТИ, 1932. – 560 с.
23. Воробьев Г.А., Чепиков А.Г., Важев В.Ф. Критерий внедрения канала разряда в твердый диэлектрик, помещенный в изолирующую жидкость. – Известия Высших учебных заведений. Физика. – 1988, №12, с. 110-113.
24. Гефле О.С., Лебедев С.М., Похолков Ю.П. Барьерный эффект в диэлектриках. – Томск: Изд-во ТМЛ-Пресс, 2007. 172 с.

25. Воробьев А.А., Заводовская Е.К. Еще раз о температурной зависимости электрической прочности при электрическом пробое. – Известия ТПУ, 1952, Т. 71, с. 7-16.

26. Weedy B.M. Underground transmission of electric power. – John Wiley and Sons, New York, 1980. – 232 P.

Контрольные вопросы к главе №1

1. Приведите классификацию электрических полей в технике высоких напряжений.

2. Виды ионизационных процессов в газах.

3. Виды эмиссии.

4. Дайте определение лавины электронов.

5. По какому закону происходит рост числа электронов в лавине?

6. Запишите условие самостоятельности разряда в газах.

7. В результате какого процесса происходит образование отрицательных ионов?

8. Какой электрон называется эффективным?

9. Стример. Критерий лавинно-стримерного перехода.

10. Искровой разряд. Чем определяется сопротивление канала искрового разряда?

11. Закон Пашена.

12. Особенности разряда в неоднородных полях.

13. Лидерный разряд. Условие стримерно-лидерного перехода.

14. Молния как форма газового разряда. Стадии и основные параметры молнии.

15. Дуговой разряд. Особенности эмиссии в дуговых разрядах.

16. Условие возникновения коронного разряда. Виды короны.

17. Расчет потерь на корону.

18. Разряд по поверхности диэлектрика. Виды поверхностного разряда.

19. Факторы, влияющие на напряжение зажигания поверхностного разряда.

20. Дайте определение пробоя.

21. Временная структура развития разряда.

22. Что представляет собой вольт-секундная характеристика.

23. В чем заключается эффект полярности.

24. Особенности и преимущества жидких диэлектриков.

25. Факторы, влияющие на развитие ионизационных процессов в жидких диэлектриках.

26. Механизмы пробоя жидких диэлектриков.

27. Влияние условий эксплуатации на электрическую прочность твердых диэлектриков.

28. Механизм электрического пробоя твердых диэлектриков.

29. Механизм теплового пробоя твердых диэлектриков.

30. Как происходит процесс электрическое старение твердых диэлектриков?

ГЛАВА 2

ВЫСОКОВОЛЬТНОЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

2. 1. Методы и устройства получения высокого переменного напряжения

Основным методом получения высокого напряжения переменного тока промышленной частоты является преобразование низкого напряжения в высокое с помощью повышающих трансформаторов. В высоковольтной технике используются различные трансформаторы, которые можно условно классифицировать по конструктивному исполнению:

- трансформаторы в металлическом и изоляционном корпусе с масляной изоляцией. Изоляционной и одновременно охлаждающей средой является трансформаторное масло. В качестве продольной изоляции применяется бумага, стеклоткань, полимерная пленка. Вывод высокого потенциала осуществляется через проходные фарфоровые или бумажно-бакелитовые изоляторы (вводы).

- сухие трансформаторы с твердой изоляцией. Это бескорпусные трансформаторы, залитые компаундом, выполняющим роль основной изоляции.

- сухие трансформаторы с газовой изоляцией. Эти трансформаторы в настоящее время практически не используются.

По способу включения вторичной обмотки трансформаторы бывают однофазные с одним высоковольтным выводом или с двумя высоковольтными выводами и средней точкой, соединенной с корпусом. Обмотки трехфазных трансформаторов включаются треугольником и звездой.

По назначению трансформаторы можно разделить на:

- силовые, используемые в энергосистемах. Эти трансформаторы должны обладать высокой надежностью, противостоять атмосферным перенапряжениям. Мощность достигает десятки – сотни мегавольтампер (выполняются трехфазными, реже однофазными);

- трансформаторы напряжения (измерительные). Имеют небольшую мощность, но очень надежны в работе. Могут быть использованы как источники высокого напряжения при испытании изоляции.

- испытательные трансформаторы, предназначенные для проведения испытаний электрической прочности изоляции высоковольтного оборудования. Имеют свои специфические условия работы: кратковременность работы, в том числе при номинальном напряжении, частые короткие замыкания со стороны высокого напряжения и отсутствие воздействия атмосферных перенапряжений. Такие трансформаторы имеют облегченную изоляцию, большой коэффициент трансформации, относительно небольшие мощность, габариты и вес. Выполняются, как правило, однофазными. Принципиальная электрическая схема при-

ведена на рис. 2.1, а. Конструктивно выполняются трех типов: трансформаторы в изоляционном корпусе с двумя фланцами-выводами (рис. 2.1, в, п. 4, 5), трансформаторы в металлическом корпусе с одним (рис. 2.1, б) или двумя высоковольтными выводами.

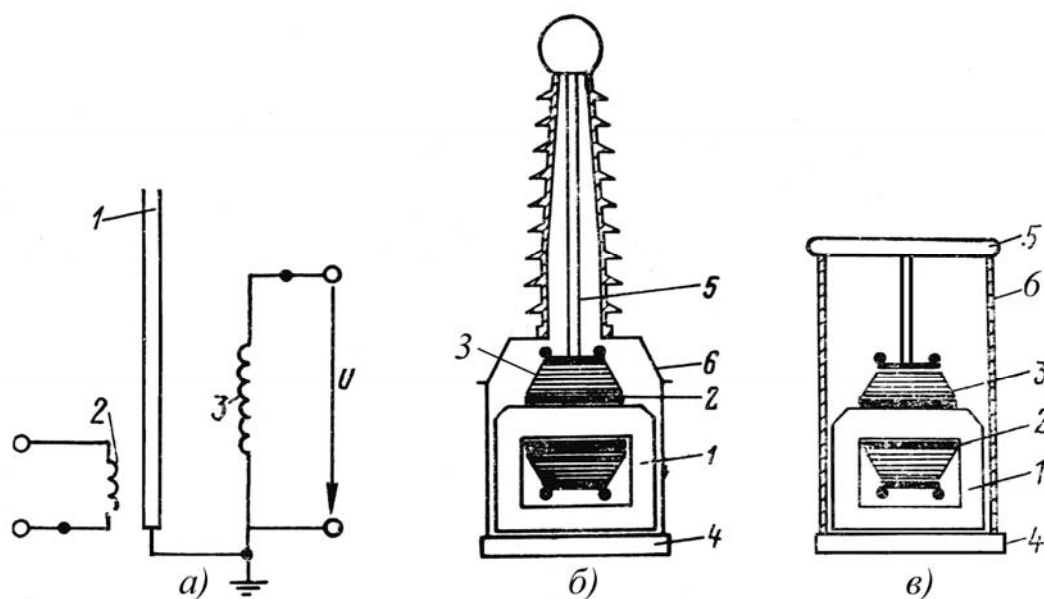


Рис. 2.1. Принципиальное устройство трансформатора: а – схема; б – с металлическим корпусом; в – с изоляционным корпусом. 1 – сердечник; 2 – первичная обмотка; 3 – обмотка высокого напряжения; 4, 6 – корпус; 5 – вывод высокого напряжения

Основными требованиями к испытательным трансформаторам являются: минимальное искажение кривой тока, отсутствие частичных разрядов в изоляции при испытательном напряжении, изоляция должна быть рассчитана на крутые срезы напряжения при замыкании на стороне высокого напряжения.

Суммарный вклад высших гармоник в кривой тока и напряжения не должен превышать 5%. Это достигается использованием сердечников из холоднокатаной стали с ориентированными зёрнами, дополнительной обработкой поверхности листа.

Отсутствие внутренних частичных разрядов в изоляции испытательных трансформаторов и снижение градиентных напряжений в изоляции при крутых срезах напряжения достигается рациональным конструированием высоковольтной обмотки в сочетании с экранами и емкостными кольцами. Современные изоляционные материалы и технологии позволяют исключить появление частичных разрядов с кажущимся зарядом $\geq 10^{-11}$ К даже при очень высоких напряжениях. В испытательных трансформаторах применяется слоистая цилиндрическая обмотка (рис. 2.1).

Выбор мощности трансформатора осуществляется в зависимости от вида нагрузки. Нагрузка испытательных трансформаторов носит емкостный характер (рис. 2.2).

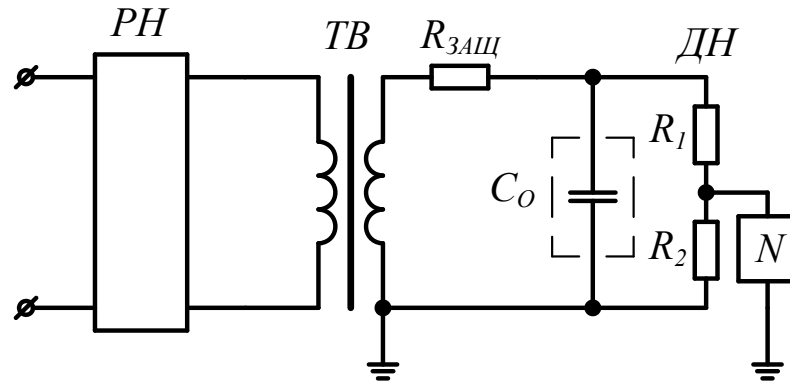


Рис. 2.2. Принципиальная электрическая схема испытания изоляции: РН – регулятор напряжения ТВ – трансформатор высоковольтный; ДН – делитель напряжения; $R_{защ}$ – защитное сопротивление; C_o – емкость объекта; R_1, R_2 – делитель напряжения; N – осциллограф или регистратор

Общая мощность нагрузки может быть оценена как $S_H = U_{исп} \cdot I_c$, где $I_c = U_{исп} \cdot \omega \cdot C_o$ – емкостный ток (ток через объект), $U_{исп}$ – испытательное напряжение. Емкость объекта зависит от типа электрооборудования и лежит в пределах единиц – сотен тысяч пикофарад. При выборе трансформатора и регулятора необходимо соблюдать условия $S_T > S_H$, $S_p > S_H$ и номинальный ток трансформатора и регулятора должен быть больше испытательного тока I_c .

При необходимости разгрузки регулятора и трансформатора (при больших I_c) осуществляют компенсацию емкостного тока индуктивным. В случае разгрузки регулятора необходимая мощность может быть оценена как

$$S_H = U_{исп}^2 \left(\omega \cdot C_{об} - \frac{1}{\kappa_T^2 \cdot \omega \cdot L} \right), \quad (2.1)$$

где κ_T – коэффициент трансформации испытательного трансформатора; L – индуктивность компенсирующего реактора, включаемого на выходе регулятора. В случае разгрузки трансформатора мощность оценивается как

$$S_H = U_{исп}^2 \left(\omega \cdot C_{об} - \frac{1}{\omega \cdot L_1} \right), \quad (2.2)$$

где L_1 – индуктивность реактора, включаемого параллельно нагрузке (C_o).

Существенное снижение массы и стоимости источника высокого напряжения можно достигнуть, используя резонансные схемы.

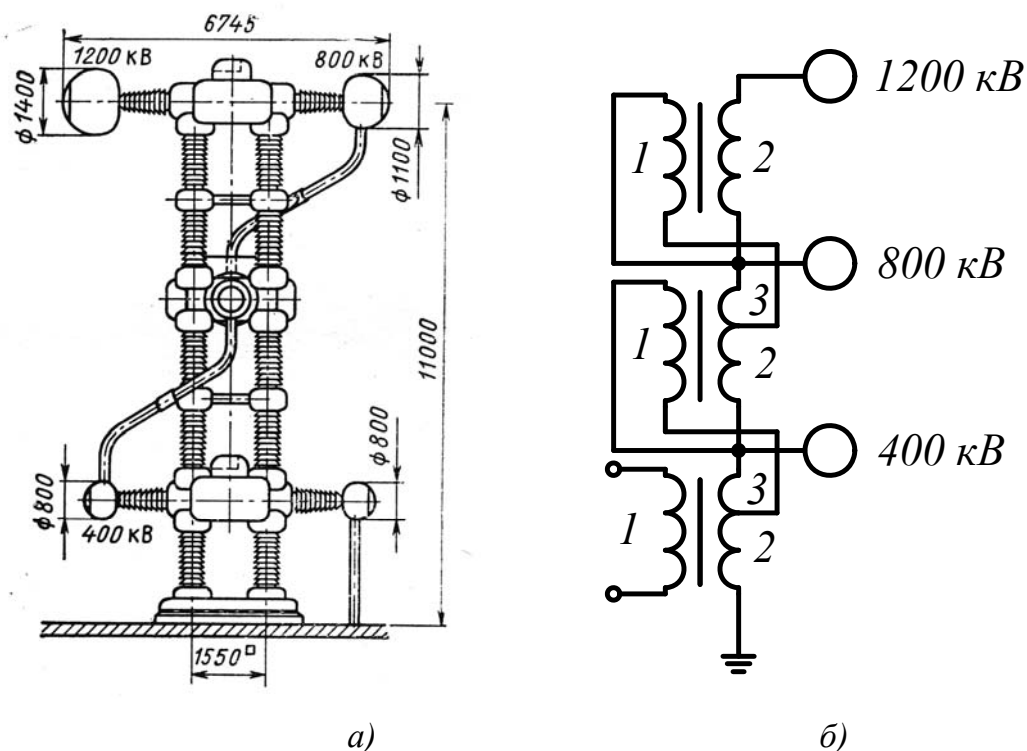


Рис. 2.3. Каскад из трех трансформаторов: а – общий вид; б – схема соединения обмоток

Достигнутый прогресс в технологии и конструировании трансформаторов позволяет изготавливать их на напряжение до 1,0...1,2 МВ. Дальнейшее повышение напряжения единичного трансформатора становится нецелесообразным и с технической, и с экономической точки зрения. Поэтому испытательное напряжение свыше 750 кВ целесообразней получать от нескольких трансформаторов, соединенных последовательно в каскад.

При создании каскадов одной из проблем является питание первичных обмоток второго и последующих трансформаторов в схеме. Это связано с тем, что потенциалы корпусов в зависимости от места расположения трансформатора в схеме каскада значительно превышают уровни изоляции вторичных и первичных обмоток относительно корпуса и друг друга. Поэтому получить высокое напряжение с помощью каскадного включения трансформаторов удастся только при использовании специальных схем питания первичных обмоток.

Обычно при каскадном соединении первичные обмотки последующих трансформаторов питаются по автотрансформаторному способу (рис. 2.3). В таких схемах (рис. 2.3, б) каждый трансформатор, помимо первичной низковольтной обмотки (1) и вторичной высоковольтной обмотки (2), имеет дополнительную обмотку возбуждения (3), по параметрам одинаковую с первичной и используемую для питания первичной обмотки последующего трансформатора. Средняя точка обмотки (2) соединяется с сердечником (4) и корпусом. Мощности трансформаторов в такой схеме не одинаковы и равны $S_k = k \cdot S_0$, где S_0 – мощность трансформатора, ближайшего к нагрузке, а k – порядковый номер трансформатора в схеме, считая от нагрузки. Каждый трансформатор в такой

схеме должен быть изолирован от земли на напряжение $U_k = U_n (n - k + 0,5)$, где U_n – номинальное напряжение высоковольтной обмотки трансформатора, а n – число трансформаторов в каскадной схеме.

Существенным недостатком каскадных схем является большая величина индуктивности рассеяния каскада в целом. Она растет быстрее, чем произведение индуктивности рассеяния одного трансформатора на их число в каскаде.

Основное преимущество каскадных схем заключается в том, что, используя трансформаторы на относительно небольшое напряжение, можно получить большое напряжение на выходе каскада. Это достигается за счет использования внешней, простой и дешевой, изоляции относительно земли каждого последующего трансформатора в каскаде.

Кроме этого, каскадные схемы обеспечивают многообразие и эксплуатационную гибкость проведения испытаний объектов на различные классы напряжения, различной мощности.

Созданные в настоящее время каскады позволяют получать переменное напряжение до 2,5 МВ при мощности до 5 МВА.

2.2. Методы и устройства регулирования высокого переменного напряжения

Эксплуатация высоковольтных испытательных установок требует регулирования напряжения на нагрузке. Это целесообразно осуществлять на зажимах низковольтной обмотки трансформатора.

Выбирая способ регулирования и регулирующее устройство, необходимо учитывать технические характеристики: мощность регулятора, величину регулируемого напряжения, скорость и пределы регулирования. Исходя из этого, к регуляторам напряжения предъявляются следующие требования:

- потери в регуляторе должны быть минимальные, и его мощность соответствовать мощности, реализуемой на нагрузке;
- обеспечивать достаточные пределы, плавность и скорость регулирования;
- регуляторы не должны вносить искажения в форму кривой напряжения;
- регулирующее устройство должно быть надежным, простым в обслуживании и иметь хорошие массо-габаритные показатели.

Наиболее простым способом регулирования является реостатный способ (рис. 2.4, *а*). Однако большие потери на сопротивлении, подгорание сопротивлений и искажение кривой напряжения ограничивают их применение при мощностях не более 0,5 кВА.

Широко применяется автотрансформаторный способ регулирования. Существуют две разновидности регулирования: со скользящими контактами (рис. 2.4, *б*) и с коротко замкнутой подвижной обмоткой (рис. 2.4, *в*). Принцип регулирования в первом случае заключается в том, что регулируемое напряжение (U_p) снимается с части обмотки, к которой приложено напряжение сети

(U_C). Такой способ обеспечивает достаточно плавное регулирование и малые потери.

Недостатком является то, что происходит подгорание скользящих контактов и обмотки. Применяется при мощностях трансформатора до 20 кВА.

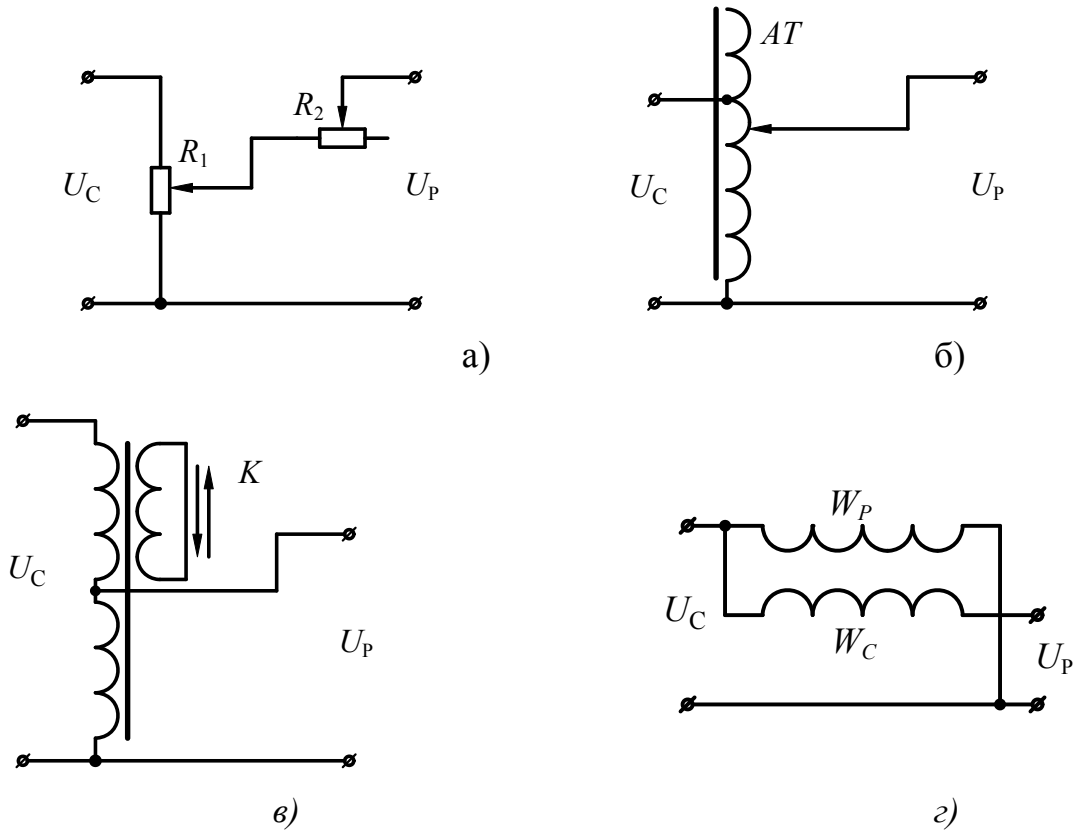


Рис. 2.4. Электрические схемы устройств регулирования напряжения: реостатный (а), автотрансформаторный со скользящими контактами (б) и короткозамкнутой обмоткой (в), индукционный (г); R_1, R_2 – сопротивления реостатов, W_P, W_C – обмотки ротора и статора, K – короткозамкнутая подвижная обмотка

Во втором случае (рис. 2.4, в) регулирование осуществляется изменением индуктивной связи между обмотками. Напряжение сети прикладывается к обмотке, состоящей из двух одинаковых секций. Регулируемое напряжение снимается с одной из секций.

Магнитный поток, создаваемый током, протекающим в секциях обмотки, частично или полностью компенсируется магнитным потоком, создаваемым током в подвижной короткозамкнутой обмотке (K) в зависимости от места расположения ее относительно секций обмотки. Отсутствие скользящих контактов и высокая плавность регулирования позволяют применять такие регуляторы при мощности до 250 кВА. Некоторым недостатком являются потери холостого хода.

Регулирование напряжения индуктивными регуляторами. Индуктивный регулятор представляет из себя электродвигатель с заторможенным фазным ротором. Обмотку ротора можно механически поворачивать на определенный

угол относительно обмотки статора. Напряжение сети подводится к обмотке ротора. На обмотке статора наводится ЭДС, величина которой зависит от взаимного расположения обмоток ротора (W_p) и статора (W_c). Регулируемое напряжение суммируется из напряжения сети и наводимой ЭДС обмотки статора (ΔU): $U_p = U_c \pm \Delta U$. Этот способ обеспечивает плавность регулирования и отсутствие скользящих контактов. Недостатком являются потери холостого хода. Используется при трансформатора до 30 кВА.

Для регулирования напряжения мощных трансформаторов и каскадов трансформаторов используют регуляторы на базе трансформаторов с подвижными обмотками (рис. 2.5).

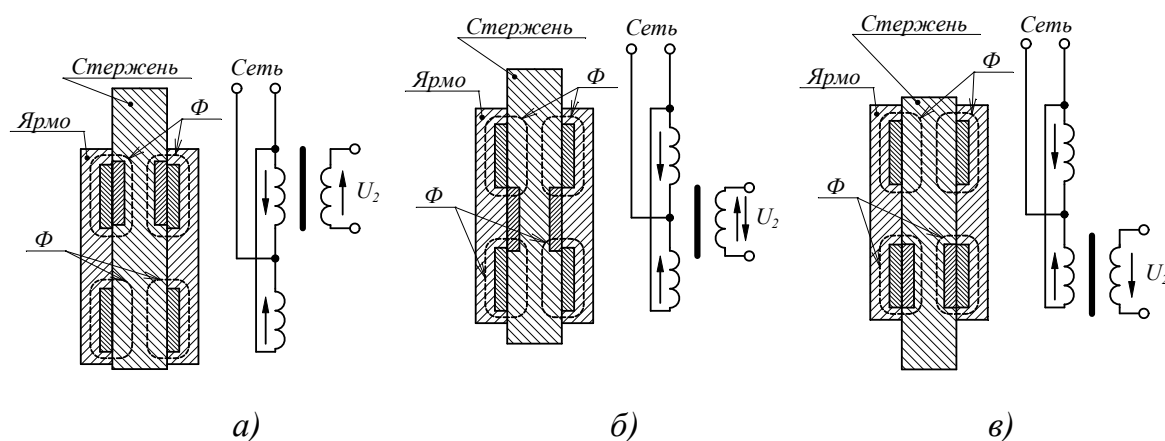


Рис. 2.5. Схема регулирования на базе трансформатора с подвижными обмотками: а – стержень в крайнем верхнем положении (магнитный поток Φ охватывает обмотки стержня и ярма с максимальным коэффициентом связи), б – стержень находится в среднем положении (магнитный поток Φ практически не охватывает обмотку стержня), в – стержень в крайнем нижнем положении (магнитный поток Φ охватывает обмотки стержня и ярма с максимальным коэффициентом связи; электродвижущая сила, индуцируемая в обмотке стержня, противоположна по направлению с электродвижущей силой по сравнению с рис. 2.5, а)

Суть способа заключается в том, что механически осуществляется перемещение стержня, на котором расположена вторичная обмотка, относительно первичной обмотки, состоящей из двух одинаковых секций, расположенных в пазах ярма (рис. 2.5, а). Вследствие этого меняется электромагнитная связь между обмотками. При перемещении стержня вторичная обмотка охватывается полностью или частично магнитным потоком одной или другой секции первичной обмотки. На вторичной обмотке наводится ЭДС в зависимости от их взаимного места положения.

Для расширения диапазона регулируемого напряжения используют регулировочный трансформатор (T_1) с дополнительным трансформатором (T_2) (рис. 2.6). Регулируемое напряжение представляет в этом случае алгебраическую сумму наводимых ЭДС на обмотках 1 и 4. Недостатком такого способа являются большие потери холостого хода, сложность конструкции регулиро-

вочного трансформатора. Может применяться при мощностях до нескольких мегавольтампер.

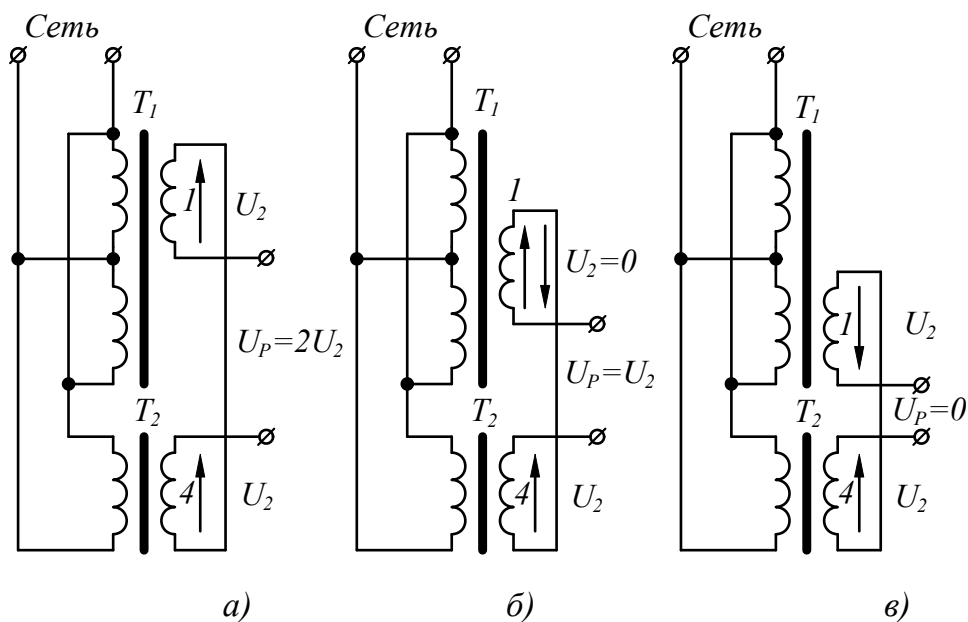


Рис. 2.6. Схема регулирования напряжения с дополнительным трансформатором: T_1 – регулировочный трансформатор, T_2 – дополнительный трансформатор, 1 – вторичная обмотка регулировочного трансформатора T_1 , 4 – вторичная обмотка дополнительного трансформатора T_2 , U_2 – напряжение на вторичных обмотках 1, 4; U_P – напряжение на выходе регулирующего устройства; а – стержень регулировочного трансформатора в крайнем верхнем положении (рис. 2.5, а), б – стержень регулировочного трансформатора в среднем положении, в – стержень регулировочного трансформатора в крайнем нижнем положении

2.3. Методы и устройства получения высокого напряжения постоянного тока

Области применения высокого напряжения постоянного тока разнообразны. Это различные отрасли электроэнергетики, электротехнологии и системы питания импульсных устройств. Основным методом получения высокого напряжения постоянного тока является выпрямление переменного тока высокого напряжения промышленной частоты. При создании источников высокого постоянного напряжения одной из основных задач является выбор вентиля и схемы выпрямления. Выбор вентиля базируется на сравнении технических, экономических и эксплуатационных характеристик. С технической точки зрения высоковольтные вентиля характеризуются основными параметрами: максимально допустимым и длительно протекающим током через вентиль; обратным напряжением на вентиле в закрытом состоянии; падение напряжения на вентиле в открытом состоянии.

С экономической и эксплуатационной точек зрения вентиля характеризуются: стоимостью основного и вспомогательного оборудования, эксплуата-

ционных расходов, стабильностью параметров, надежностью и сроком службы, временем подготовки его к работе, безопасностью, простотой и удобством обслуживания.

В высоковольтной испытательной технике широко применялись электронные и ионные выпрямители, а в последние десятилетия – полупроводниковые.

Электронный вентиль – это электровакуумный прибор с анодом и накаливаемым катодом, помещенными в керамический или стеклянный корпус с давлением $10^{-5} - 10^{-6}$ мм. рт. ст. Работа электронного вентиля основана на термоэлектронной эмиссии с накаливаемого катода. Анодный ток в проводящем состоянии, когда потенциал анода выше, чем у катода, зависит от величины приложенного напряжения, температуры, материала и размеров катода, а также от энергии выхода электронов с катода.

Увеличение рабочей температуры катода ограничивается его возможным разрушением под действием пондеромоторных сил и испарение его материала. Снижение работы выхода электронов, с целью увеличения тока, достигается использованием оксидных и торированных катодов. С увеличением номинального напряжения и тока вентиля слабым звеном становится анод. Электроны, бомбардируя анод, приводят к его разогреву. Поэтому анод выполняется массивным из тугоплавкого материала с высокой энергией выхода электронов.

При смене полярности, когда потенциал анода становится меньше, чем катода, эмиссия электронов прекращается и прибор приходит в закрытое, непроводящее, состояние.

Корпус вентиля конструируется в соответствии с законом Пашена так, чтобы пробой, если он возникнет, проходил по внешней поверхности корпуса. Это приводит к росту габаритов при изготовлении их на высокие напряжения.

Ионные вентили или газотроны представляют из себя двухэлектродный стеклянный или керамический баллон. Внутри баллона находятся пары ртути или инертный газ под давлением $10^{-2} - 10^{-3}$ мм. рт. ст. В высоковольтной технике получили распространение газотроны с накаливаемым катодом в режиме тлеющего разряда.

При отрицательной полярности катода электроны, получаемые за счет термоэмиссии с катода, двигаясь к аноду, вызывают ионизацию молекул газа и образуют газоразрядную плазму. Поэтому плотность тока в газотронах значительно выше, чем в электронных вентилях, и средний ток может достигать десятков ампер. Напряжение зажигания (U_3) зависит от рода газа, конструкции лампы и мощности накала и обычно не превышает (5-20) % от $U_{обр}$.

При изменении полярности эмиссия электронов прекращается, усиливается процесс рекомбинации и плазма разваливается.

Газотроны по размеру значительно больше электронных вентилях при одинаковых $U_{обр}$ и создавать их на $U_{обр} \geq 50$ кВ становится нецелесообразно. Кроме этого, газотроны устойчиво работают только в узком температурном интервале $(10-40)^{\circ}C$.

Достижения физики твердого тела и технологии получения сверхчистых материалов в последние десятилетия позволили полупроводниковым вентилям занять доминирующее положение. В высоковольтной технике полупроводниковые выпрямители в ряде случаев полностью заменяют электронные, ионные и ртутные вентили.

Полупроводниковый вентиль представляет собой электронный прибор, состоящий из кристалла полупроводника с «*p-n*» переходом, двух омических контактов, двух выводов и корпуса.

Не анализируя процессы образования и работы «*p-n*» перехода, достаточно освещенные в научной и учебной литературе, рассмотрим зависимость тока диода от приложенного к нему напряжения. Вольтамперная характеристика диода (рис. 2.7) определяется свойствами полупроводниковых материалов, состоянием поверхности, конструкцией диода и температурой перехода.

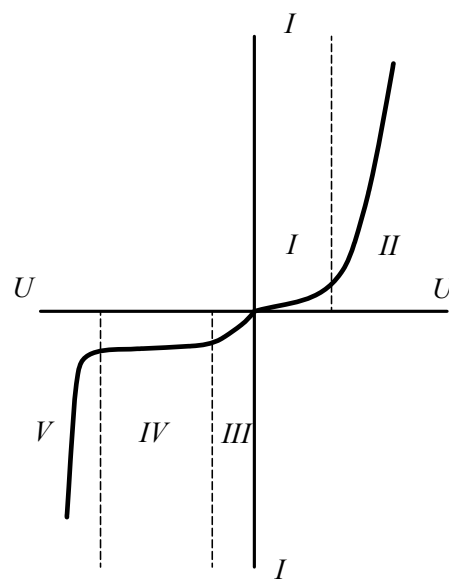


Рис. 2.7. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода

Правая ветвь вольтамперной характеристики соответствует вентилю в открытом состоянии, определяя протекание прямого тока (I_{cp}). Участок I соответствует началу открытия полупроводникового вентиля. Рост тока на этом участке ограничен объемным зарядом в зоне «*p-n*» перехода. Участок II – рабочий участок, определяющий протекание прямого тока. Этот участок определяет падение напряжения на диоде в прямом направлении. Левая ветвь вольтамперной характеристики содержит три характерных участка и построена в другом масштабе. Для оценки масштаба отметим, что у современных полупроводниковых диодов отношение прямого тока к обратному лежит в пределах $10^3 - 10^6$, а отношение обратного напряжения к падению напряжения при протекании прямого тока лежит в пределах $10^2 - 10^4$. Левая ветвь характеризует вентиль в закрытом состоянии. Участок III – рост обратного тока за счет диффузии неосновных носителей заряда и за счет тепловой генерации неосновных носителей. Участок 4 – замедление (насыщение) обратного тока, связанное с установлением температурного равновесия. Обычно обратный ток на этом участке для полупровод-

никовых вентилей составляет ($10^{-5} \dots 10^{-2}$ А). Высоковольтные вентили выполняются на базе кремния и селена.

Полупроводниковые вентили при номинальных режимах стабильны, достаточно надежны, срок службы $10^4 - 10^8$ часов, просты и безопасны в работе. Однако при незначительных отклонениях от номинальных режимов (особенно кремниевые вентили) часто выходят из строя.

В силу того, что единичные «*p-n*» переходы имеют относительно небольшие прямые токи и обратные напряжения, в высоковольтной технике используют последовательное или параллельное включение нескольких вентилей. Последовательное включение вентилей больше 5-10 «*p-n*» переходов требует выравнивания напряжения вдоль столбов емкостными или омическими делителями напряжения.

2.3.1. Схемы выпрямления тока высокого напряжения

Выбор схемы выпрямления базируется на ряде факторов как технологического, так и экономического плана, исходя из требований нагрузки и имеющегося в наличии оборудования.

Все схемы установок получения высокого напряжения выпрямленного тока можно классифицировать по следующим признакам: по форме выпрямленного напряжения (одно – и двухполупериодные схемы); по числу фаз вторичной обмотки трансформатора (однофазные, двух – и трехфазные схемы); по отношению выходного напряжения к входному (схемы выпрямления и схемы выпрямления с умножением напряжения).

Основными элементами схем выпрямления являются: источник высокого напряжения, выпрямительное устройство, сглаживающий фильтр и нагрузка.

Из всего разнообразия схем выпрямления (рис. 2.8), подробно рассматриваемых в учебной и научной литературе, рассмотрим принцип работы и параметры выходного напряжения на примере двухполупериодной схемы (рис. 2.7, б).

В этой схеме выпрямители V_1 и V_4 открыты и пропускают ток, когда потенциал точки 1 больше, чем потенциал точки 2. Выпрямители V_2 и V_3 открыты, если потенциал точки 2 больше потенциала точки 1.

Диаграммы напряжения на трансформаторе и на нагрузке показаны на рис 2.9.

Такая схема обладает рядом недостатков при работе без фильтра, а именно большая пульсация напряжения и тока, и малые их значения на нагрузке. Эффективное и среднее значение напряжения за период соответственно равны: $U_{эф} \approx U_m \sqrt{2}$, $U_{ср} \approx 2U_m / \pi$, где U_m – амплитудное значение фазного напряжения трансформатора. Использование емкостного фильтра ($C_{ф}$) позволяет устранить эти недостатки. Величина пульсации и напряжения в этом случае будет зависеть от сопротивления нагрузки и емкости фильтра. Значительно лучшие параметры выходного напряжения можно получить при использовании трехфазных схем (рис. 2.8, в, г). Однако в этом случае схемы усложняются.

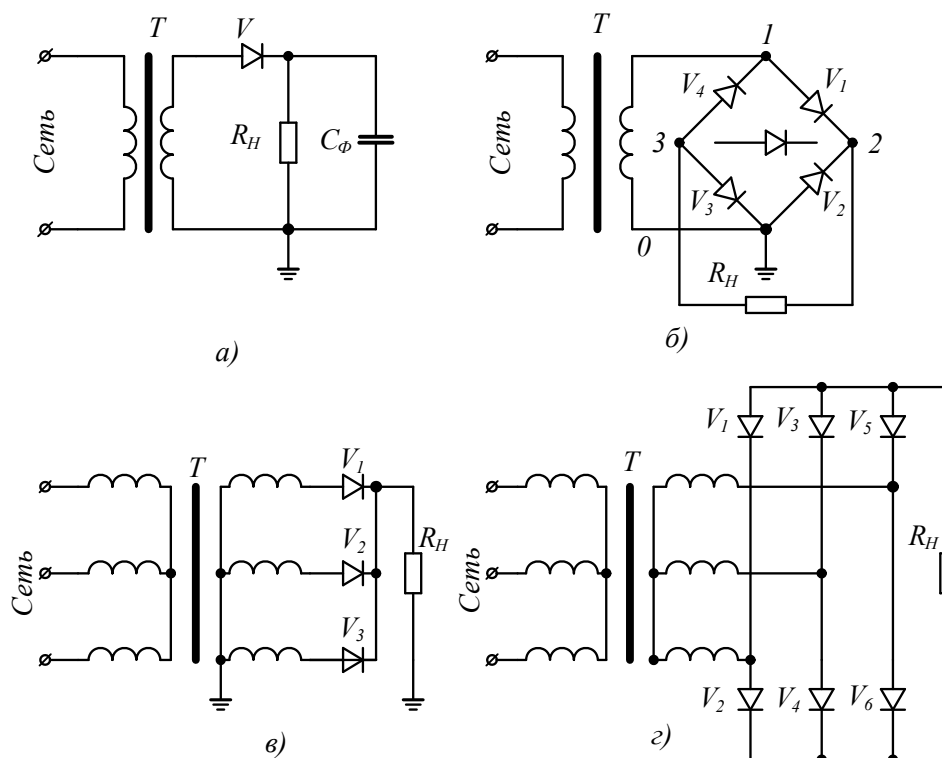


Рис. 2.8. Схемы выпрямления: а – однополупериодная, б – двухполупериодная, в – однополупериодная трехфазная, г – двухполупериодная трехфазная

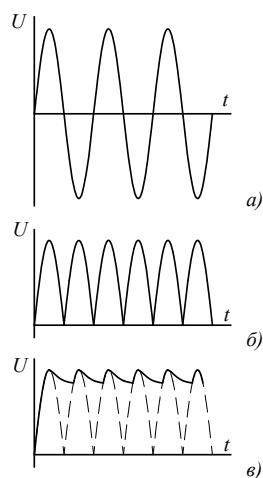


Рис. 2.9. Диаграммы напряжения для схемы рис. 2.8, б: а – напряжение на вторичной обмотке трансформатора, б – напряжение на нагрузке, в – напряжение на нагрузке при подключении параллельно нагрузке емкости (фильтра)

Общим недостатком схем выпрямления является то, что их целесообразно использовать только при получении напряжения не выше 100 кВ. Для получения более высоких напряжений используют схемы выпрямления с удвоением, утроением и многократным увеличением напряжения на нагрузке относительно входного напряжения (рис. 2.10).

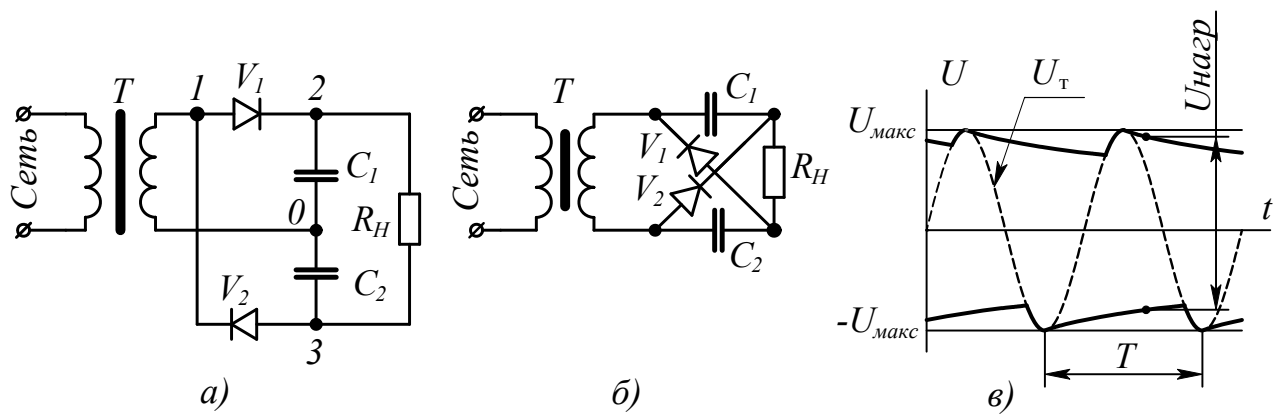


Рис.2.10. Электрические схемы выпрямления с умножением напряжения: а – удвоение напряжения; б – утроение напряжения; в – диаграмма напряжения для схемы а

Необходимость таких схем диктуется экономической целесообразностью. Используя элементы с относительно низким рабочим напряжением и обеспечивая жесткое распределение потенциалов по элементам, можно получать напряжения в сотни и тысячи киловольт.

Ниже рассмотрим принцип работы схемы выпрямления с удвоением напряжения (рис. 2.11), которая является основной для получения многократно увеличенного напряжения в схеме каскадного генератора постоянного тока (КГПТ).

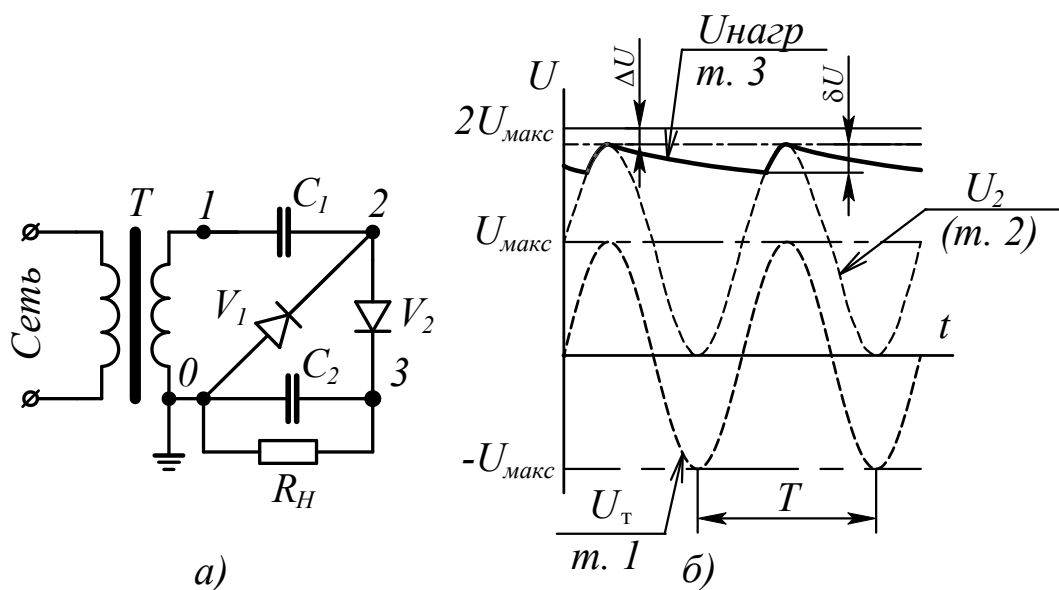


Рис. 2.11. Двухполупериодная схема выпрямления с удвоением напряжения (ступень каскада): а – электрическая схема умножения, б – диаграмма напряжения на выходе схемы $U_{нагр}$ (точка 3) и диаграммы напряжения в точках 1 (напряжение на выходе трансформатора – $U_T = U_1$) и в точке 2 (U_2)

В этой схеме выпрямители V_1 и V_2 работают в течение разных полупериодов колебания напряжения трансформатора. Выпрямитель V_1 открыт тогда, когда потенциал точки 2 меньше потенциала точки 0, а V_2 открыт, когда потенциал точки 2 больше потенциала точки 3. Конденсатор C_2 , выполняющий роль

фильтра в схеме, заряжается напряжением, которое создается между точками 2-0, равное сумме напряжений трансформатора и конденсатора C_1 . Это напряжение пульсирует от 0 до $2U_m$. Нетрудно убедиться и в том, что напряжение между точками 2-3 пульсирует также от 0 до $2U_m$, но по времени сдвинуто на 180° относительно напряжения на вентиле V_1 .

В этой схеме выпрямители V_1 и V_2 работают в течение разных полупериодов колебания напряжения трансформатора. Выпрямитель V_1 открыт тогда, когда потенциал точки 2 меньше потенциала точки 0, а V_2 открыт, когда потенциал точки 2 больше потенциала точки 3. Конденсатор C_2 , выполняющий роль фильтра в схеме, заряжается напряжением, которое создается между точками 2-0, равное сумме напряжений трансформатора и конденсатора C_1 . Это напряжение пульсирует от 0 до $2U_m$. Нетрудно убедиться и в том, что напряжение между точками 2-3 пульсирует также от 0 до $2U_m$, но по времени сдвинуто на 180° относительно напряжения на вентиле V_1 .

Заряд конденсатора C_2 до полного напряжения ($2U_m$) при $R_n \rightarrow \infty$ идет в течение некоторого количества периодов колебания переменного тока.

При реальной нагрузке ($R_n \neq \infty$) конденсатор C_2 в промежутке между подзарядками, когда закрыт клапан V_2 , разряжается частично на нагрузку и напряжение на нем снижается на величину $\delta U \approx \Delta Q/C_2 \approx I_{cp} \cdot T/C_2$, где I_{cp} – средний ток через нагрузку за период T (рис. 2.11, б).

После открытия клапана V_2 конденсатор C_2 будет подзарядаться избыточным зарядом на конденсаторе C_1 . Одновременно с подзарядом конденсатора C_2 частично идет разряд конденсатора C_1 на нагрузку. В результате чего напряжение на C_2 не достигнет максимального значения, т. е. в схеме возникнет падение напряжения $\Delta U \approx I_{cp} \cdot T/C_1$ (рис. 2.11, б). Таким образом, видно, что пульсация и падение напряжения зависят от тока нагрузки и частоты питающего напряжения. Кроме этого, пульсация зависит от величины емкости C_2 , а падение напряжения от величины емкости C_1 .

2.3.2. Каскадный генератор постоянного тока высокого напряжения

Из анализа предыдущей схемы (рис. 2.11, а) нетрудно видеть, что напряжение на выпрямителях V_1 и V_2 пульсирует от 0 до $\approx 2U_m$. Причем эти напряжения сдвинуты во времени на полпериода переменного напряжения трансформатора. Используя это, можно через дополнительные клапаны (V_3, V_4 и т.д.) заряжать дополнительные конденсаторы (C_3, C_4 и т.д.), включенные по схеме (рис. 2.12). Такая схема представляет набор из N модулей, состоящих из двух клапанов и двух конденсаторов.

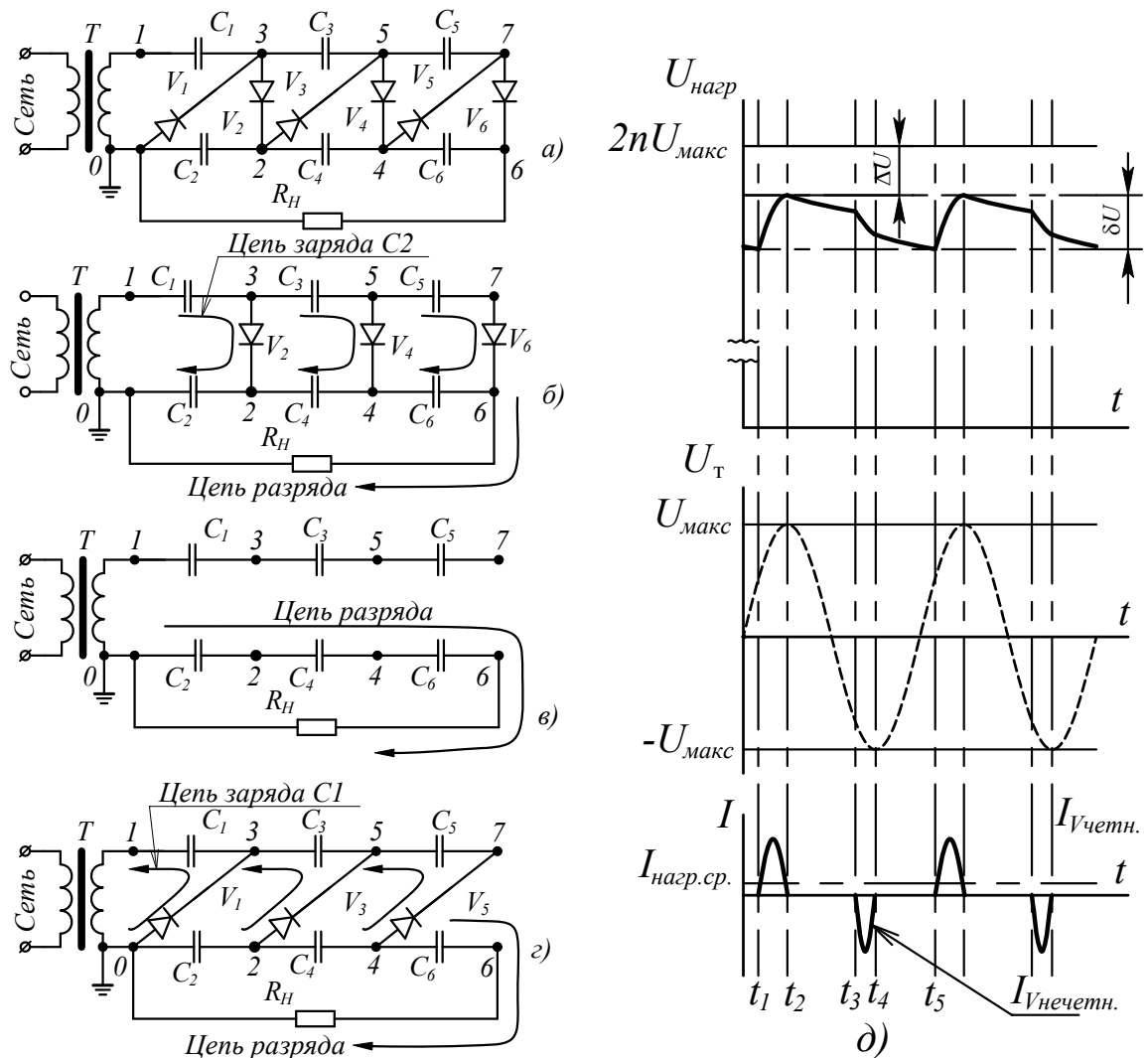


Рис. 2.12. Каскадный генератор постоянного тока: а – схема каскадного генератора, б, в, г – состояние схемы для различных моментов времени в течение периода изменения напряжения на трансформаторе (Т), д – диаграммы напряжения на вторичной обмотке трансформатора (U_T), на нагрузке ($U_{нагр}$) и ток через четные и нечетные вентили

Когда будут закрыты нечетные вентили (V_1, V_3, V_5) (рис. 2.12, б, $t_1 - t_2$), пульсирующее напряжение через открытые четные вентили (V_4, V_6) подзаряжает четные емкости (C_4, C_6) в пределе до $\approx 2U_m$. Затем четные и нечетные вентили закрываются, в этот промежуток времени ($t_2 - t_3$) наступает пауза в подзарядке четных и нечетных емкостей (рис. 2.12, в). Нетрудно убедиться, что когда в следующий промежуток времени ($t_3 - t_4$) четные вентили (V_2, V_4, V_6) закрыты (рис. 2.12, г, $t_3 - t_4$), а нечетные вентили (V_1, V_3, V_5) открываются и напряжение на четных емкостях (C_2, C_4, C_6) через открытые нечетные вентили (V_3, V_5) подзаряжает нечетные емкости (C_3, C_5) в пределе до $2U_m$. Следовательно, при отсутствии нагрузки (холостой ход) напряжение на правой колонке в конечном счете достигнет значения $2NU_m$, где N – число модулей, а U_m – амплитудное значение напряжения трансформатора.

Все выпрямители и конденсаторы, кроме первого, должны быть рассчитаны на напряжение $2U_m$. Конденсатор C_1 работает в схеме при напряжении не больше U_m .

При конечной величине $R_n \neq \infty$ в установившемся режиме четные емкости выходной колонны непрерывно отдают заряд в нагрузку. Это количество заряда восполняется на четных емкостях выходной колонны в период подзарядки ее от нечетных емкостей входной колонны и трансформатора. Таким образом, каскадный генератор работает по одной из схем, приведенных на рис. 2.12, б, в, г. Не рассматривая подробно анализ работы схемы, достаточно полно изложенный в учебной и научной литературе, отметим, что пульсация напряжения (δU) связана, во-первых, с разрядом на нагрузку четных емкостей выходной колонны (рис. 2.12, в, $t_2 - t_3$) и подзарядом нечетных емкостей входной колонны (рис. 2.12, г, $t_3 - t_4$) и, во-вторых, последующим подзарядом четных емкостей выходной колонны от нечетных емкостей входной колонны (рис. 2.12, б, $t_1 - t_2$). Падение же напряжения (ΔU) обусловлено тем, что при заряде четных емкостей выходной колонны нечетные емкости входной колонны одновременно разряжаются на нагрузку. В силу этого напряжение на выходе генератора не достигает максимального значения $2NU_m$.

Оценить значение δU можно по формуле (2.3).

$$\delta U \approx \frac{I_{cp}}{fC} \cdot \frac{N(N+2)}{2}, \quad (2.3)$$

ΔU можно оценить по формуле (2.4).

$$\Delta U \approx \frac{I_{cp}}{6Cf} \cdot (4N^3 + 3N^2 - N), \quad (2.4)$$

где N – количество модулей, C – емкость отдельного конденсатора в схеме рис. 2.12, а, I_{cp} – средний ток через нагрузку и f – частота питающего напряжения.

Из анализа зависимости δU и ΔU нетрудно видеть, что для их снижения необходимо в разумных пределах увеличивать емкость конденсаторов, частоту питающего напряжения и использовать каскадный генератор для работы на высокоомную нагрузку.

Необходимо также отметить, что увеличение выходного напряжения за счет увеличения числа модулей не всегда целесообразно. На практике обычно используют генераторы с числом модулей $N = (0.6 \div 0.8)N_{кр}$, где $N_{кр} \approx (f \cdot C \cdot U_m / I_{cp})^{1/2}$ и токами $I \leq 10^{-3}$ А.

2.4. Методы и устройства получения высоковольтных импульсов напряжения

Импульсное высокое напряжение используется для имитации грозовых и коммутационных перенапряжений при испытании изоляции электрооборудования, в ускорительной технике, рентгенографии, в электроразрядных и пучково-плазменных технологиях.

При грозовых разрядах в элементы энергосистем на линейной изоляции возникает апериодический импульс напряжения. На электрооборудовании подстанций, защищаемом разрядниками, возможно появление "срезанного" импульса. Исходя из *вероятности* появления перенапряжения той или иной формы, стандартизован грозовой апериодический импульс напряжения. Полный грозовой импульс имеет параметры $t_{\Phi} = 1,2 (\pm 0,36)$ мкс и $t_u = 50 (\pm 10)$ мкс. (рис. 2.13, а). Срезанный грозовой импульс характеризуется временем среза $t_{cp} = (2 \div 5)$ мкс.

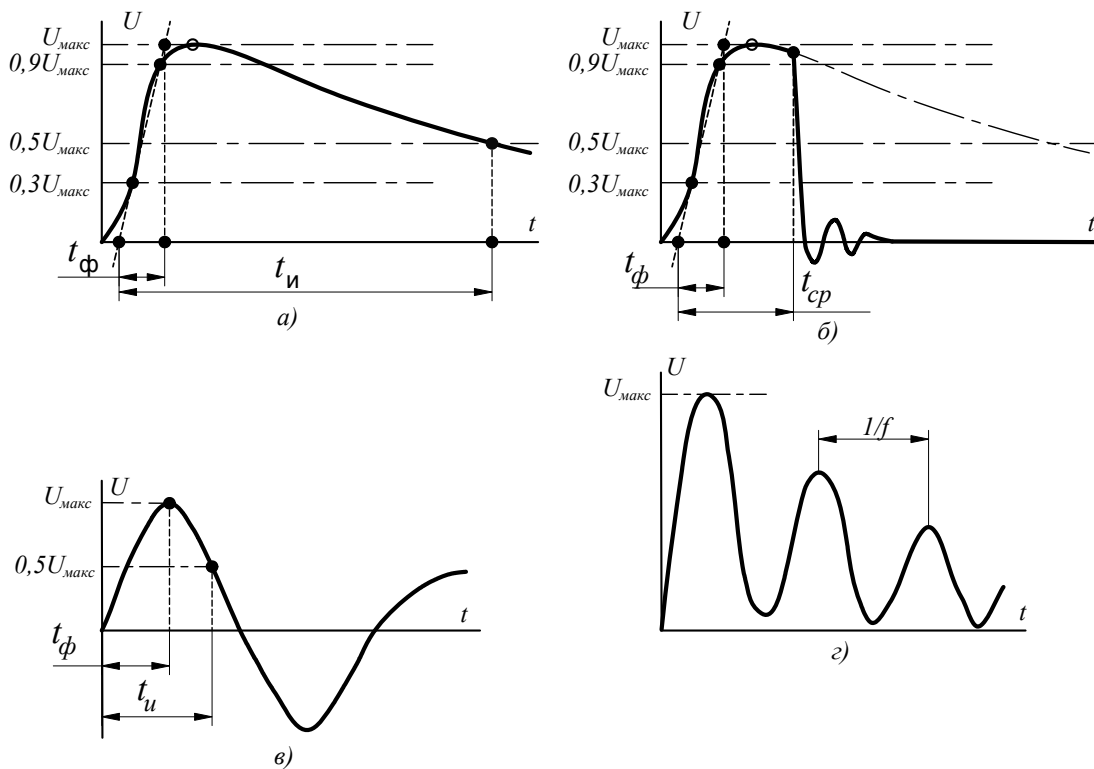


Рис. 2.13. Типичные формы импульсов перенапряжения: а – стандартный грозовой импульс, б – срезанный грозовой импульс, в – коммутационный периодический импульс, г – коммутационный апериодический импульс

Коммутационные перенапряжения обусловлены плановыми или аварийными переключениями в энергосистемах. Параметры и формы импульсов коммутационных перенапряжений являются случайными величинами и изменяются в широких пределах (рис. 2.13, в, г). Для энергосистем с напряжением свыше

220 кВ коммутационные перенапряжения являются более критичными для изоляции, чем грозовые, ввиду значительной величины максимальных значений и длительности воздействия. Это обстоятельство объясняет использование для испытаний и исследований изоляции как апериодических, так и колебательных импульсов. В качестве основного испытательного импульса рекомендован апериодический импульс с $t_{\phi} = 250 (\pm 50)$ мкс и $t_{и} = 2500 (\pm 1500)$ мкс. Другими рекомендованными импульсами являются апериодические с параметрами 100/2500 мкс, 500/2500 мкс, 1000/5000 мкс и колебательные с параметрами $(4000 \pm 1000)/7500 \pm 2500$, 100/1000 и 50/500 мкс. Формы коммутационных импульсов приведены на рис. 2.13, *в, г*.

Испытаниям коммутационными импульсами в последнее время придается большое значение, поскольку возможно их применение вместо одномоментных испытаний напряжением промышленной частоты.

Для получения апериодических импульсов напряжения используются генераторы импульсов (ГИН), основанные на принципе, предложенном В.К. Аркадьевым (Россия) и Э. Марксом (Германия). Принцип работы ГИН основан на том, что вначале группа конденсаторов заряжается в параллельной схеме соединения до определенного напряжения, а затем с помощью высоковольтных коммутаторов конденсаторы переключаются в последовательную схему включения. В результате напряжение между началом и концом этой цепочки конденсаторов суммируется, достигая величины NU_0 , где N – число конденсаторов и U_0 – напряжение, до которого они были заряжены. В качестве коммутирующих высоковольтных устройств используются обычно газовые разрядники F (рис. 2.14, *а*).

В настоящее время существует большое количество различных схем и конструкций генераторов, описание которых можно найти в литературе. Работу ГИН поясним на примере схемы с односторонней однополупериодной зарядкой (рис. 2.14, *а*). Конденсаторы ступеней C заряжаются от источника выпрямленного напряжения через защитное сопротивление R_3 и разделительные сопротивления R_0 .

Для обеспечения практически одинаковой зарядки всех конденсаторов необходимо соблюдать условие: $R_3 \gg \sum R_0$. К концу зарядки потенциалы точек 0, 2, 4, ... равны нулю, а потенциалы точек 1, 3, 5... равны $+U_0$. Расстояние между шаровыми электродами F_1, F_2, \dots, F_n устанавливаются так, чтобы при напряжении U_0 пробивался только F_1 . После пробоя промежутка F_1 точка 1 соединяется через сопротивление искры с «землей». В результате потенциал точки 1 станет равен 0, а потенциал точки 2 станет равен $-U_0$, т.к. паразитная емкость $C_{п}$ практически мгновенно через малое сопротивление зарядится до напряжения, близкого к U_0 .

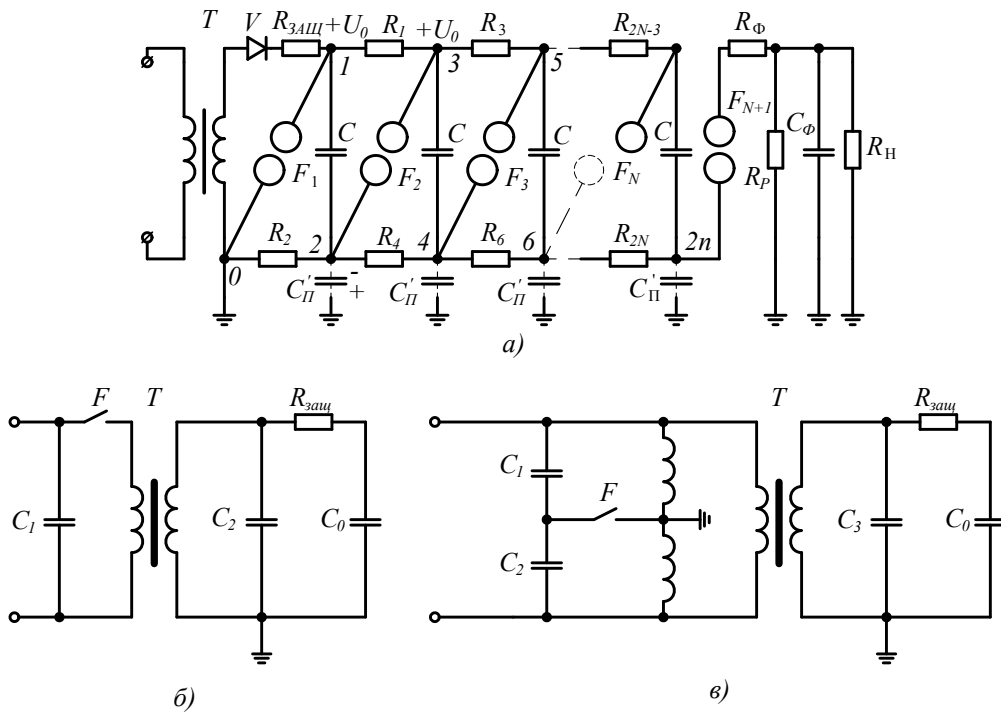


Рис. 2.14. Принципиальная электрическая схема ГИН (а) и генераторов коммутационных импульсов (б, в)

Потенциал точки 3 в течение некоторого времени сохраняется равным примерно $+U_0$, т. к. эта точка отделена от точки 1 большим сопротивлением R_0 . В результате искровой промежуток F_2 окажется под напряжением, близким к значению, равному $2U_0$, что вызовет его пробой, после чего потенциал точки 3 станет равным $-U_0$, а точки 4 – равным $-2U_0$. Промежутку F_3 окажется под напряжением, близким к $3U_0$. Проведя аналогичные рассуждения, можно убедиться, что произойдет быстрый последовательный пробой всех разрядников ГИН. После пробоя промежутка F_{n+1} , который исключает подачу напряжения на объект в процессе зарядки генератора, вывод ГИН (точка $2n$) подключается к элементам R_Φ , C_Φ и R_P , обеспечивающим формирование импульса с необходимыми параметрами.

Формирование фронта импульса определяется значениями R_Φ и C_Φ , а длительность импульса – R_P . Изменение амплитуды импульса регулируется изменением зарядного напряжения и соответствующими расстояниями между шаровыми электродами F_1, F_2, \dots, F_n . При этом для получения максимального коэффициента использования ГИН необходимо соблюдать условия: $R_P \gg R_\Phi$, $C_T \gg C_\Phi$, где $C_T = C/N$.

В генераторах с шаровыми разрядниками при изменении напряжения на выходе в широком диапазоне требуется перестройка разрядников. Для этого используются механические изоляционные системы, позволяющие одновременно во всех ступенях изменять расстояние между шаровыми электродами. Все это усложняет конструкцию генератора.

В современных генераторах для достижения стабильности работы в широком диапазоне напряжений и исключения механической настройки разряд-

ников при переходе к другому испытательному напряжению используются управляемые, в том числе многозачерные разрядники. Управляемые разрядники устанавливаются в нескольких или во всех ступенях ГИН.

Рассмотренные схемы обеспечивают испытания изоляции аperiodическими импульсами, в том числе и коммутационными (рис. 2.14, а и б).

Более полное соответствие форме коммутационных перенапряжений имеют колебательные импульсы (рис. 2.14, в и г). Такие импульсы чаще всего получают на базе испытательных трансформаторов или каскадов трансформаторов. Однако частота колебаний импульса в этом случае зависит от индуктивности трансформатора и емкости объекта и изменяется в узких пределах.

Большой диапазон колебательных импульсов по форме и частоте колебаний можно получить на базе ГИН с двухсторонней зарядкой (рис. 2.15). В этом режиме вместо разрядных сопротивлений включаются индуктивные дроссели L_0 .

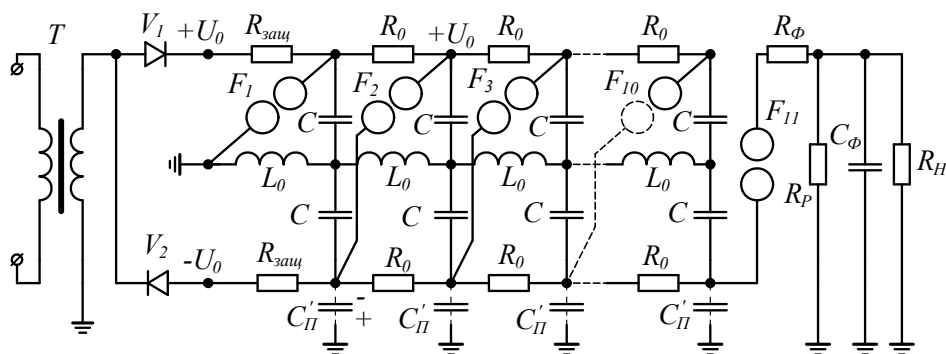


Рис. 2.15. Схема ГИН с двухсторонней зарядкой для получения коммутационных импульсов различной формы (вместо сопротивлений R_0 включены индуктивности L_0)

Диапазон импульсных напряжений, которые можно получить от ГИН с двухсторонней зарядкой, весьма широк – от десятков до нескольких тысяч киловольт. Максимальным напряжением и типом используемых конденсаторов определяется и конструкция генератора. Конструктивно ГИН бывают лестничного, этажерочного, башенного и колонного типов.

2.5. Методы получения импульсных токов

При проведении различных физических исследований: создание сильных магнитных полей, получение ударных волн высокотемпературной плазмы и т.д. требуются импульсные токи, величина, форма и длительность которых меняется в широких пределах. Широко применяются импульсные токи при испытании коммутационной аппаратуры для энергосистем и различных электрофизических установок. Представление о разнообразии применения импульсных токов можно получить из научной литературы.

Любой источник или генератор импульсов представляет собой один из видов накопителей энергии с коммутатором. К наиболее распространенным

накопителям в настоящее время относятся емкостные (рис. 2.16), индуктивные, электромеханические (ударные генераторы), химические (импульсные аккумуляторы), а также различные комбинации нескольких накопителей.

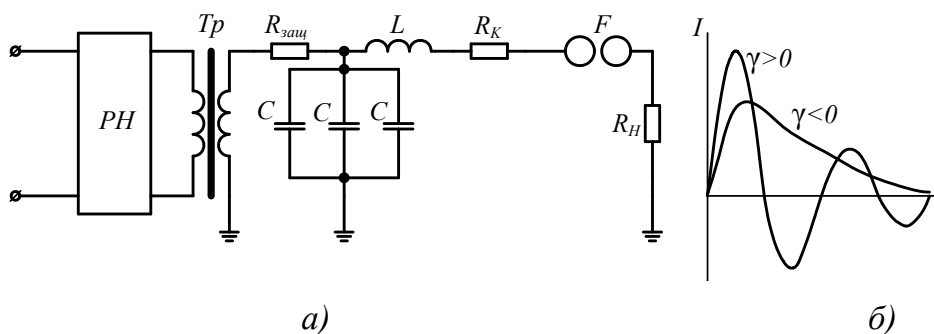


Рис. 2.16. Схема емкостного накопителя тока (а) и стилизованная диаграмма тока (б): $R_{защ}$ – защитное сопротивление, $R_{к}$ – сопротивление контура, $R_{н}$ – сопротивление нагрузки, C – емкость конденсатора, из которых состоит емкостный накопитель, $РН$ – регулятор напряжения, $Тр$ – высоковольтный трансформатор, L – индуктивность разрядного контура, I – ток разряда,

Цепь импульсного тока ГИТ (разрядная цепь) состоит из последовательно соединенных и заряженных до напряжения U_0 емкостей C , индуктивности L и активного сопротивления $R_{к}$. Индуктивность L и активное сопротивление $R_{к}$ включают в себя соответственно индуктивность и сопротивление накопителя, коммутатора и соединительных шин.

Переходный процесс может носить колебательный или апериодический характер, в зависимости от величины $\gamma \approx 0,5 R(C/L)^{0,5}$, зависящего от соотношения параметров разрядного контура ГИТ и нагрузки (рис. 2.16, б).

При разработке и создании ГИТ на базе емкостного накопителя стремятся уменьшить индуктивность и активное сопротивление разрядного контура и накопителя. Достигается это путем применения параллельных разрядников, соединительных шин большого сечения и кабелей, а также сокращения длины шин и кабелей, соединяющих накопитель с нагрузкой.

Конструктивно ГИТ должен выполняться компактно с возможно минимальными расстояниями между блоками конденсаторов, нагрузкой и разрядником. Как правило, это расположение блоков конденсаторов по периметру окружности или многоугольника с расположением нагрузки и разрядника в центре. Конструкции ГИТ могут отличаться типом ошиновки, сборных шин и разрядников, количеством блоков конденсаторов в них и т.д. (рис. 2.17).

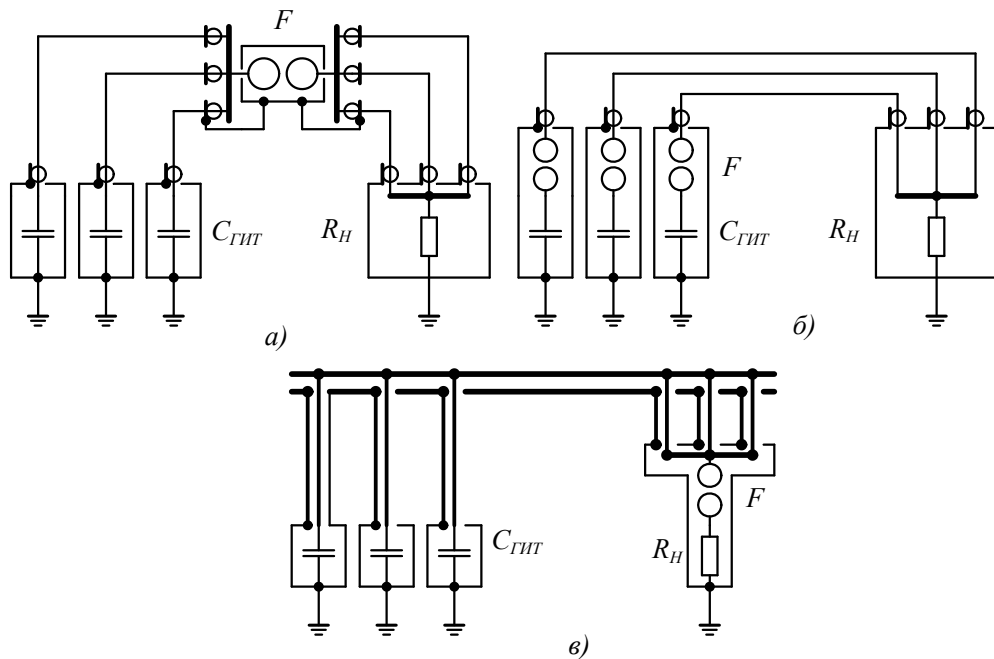


Рис. 2.17. Схемы конструктивных компоновок ГИТ: а) – блок накопителя с кабельной ошиновкой и одним разрядником на блок; б) – блок накопителя с кабельной ошиновкой и с разрядником на каждый конденсатор блока; в) – накопитель с плоской ошиновкой и одним разрядником; $C_{ГИТ}$ – емкостный накопитель, F – разрядник, $R_н$ – сопротивление нагрузки

Помимо ГИТ на емкостных накопителях энергии перспективными являются ГИТ на основе индуктивных накопителей энергии, в которых энергия накапливается в магнитном поле индуктивности (рис. 2.18).

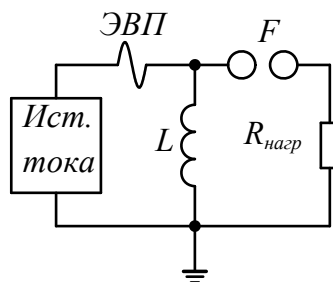


Рис. 2.18. Схема индуктивного ГИТ: ЭВП – электрически взрываемый проводник, L – индуктивный накопитель энергии, F – разрядник, $R_{нагр}$ – сопротивление нагрузки

Источник тока через ЭВП создает ток в индуктивности L , при определенном значении тока ЭВП взрывается, энергия накопленная в ЭВП с помощью разрядника F переключается в нагрузку $R_{нагр}$. Плотность энергии, запасаемая в магнитном поле, примерно на три порядка больше плотности энергии запасаемой в электрическом поле.

2.6. Измерение высоких напряжений и импульсных токов

Для проведения в лабораториях испытаний изоляции и экспериментальных исследований в области изоляции и разрядных процессов в изоляционных средах необходимы не только источники высоких напряжений и больших токов, но и разнообразные измерительные устройства. Для измерений на высоком напряжении используются шаровые разрядники, делители напряжений, амплитудные вольтметры, токовые шунты, широко- и узкополосные трансформаторы тока и т. п.

Общей особенностью измерений на высоком напряжении является то, что они должны проводиться в условиях сильных электрических и магнитных полей, которые вызывают в измерительных цепях помехи. Кроме этого, существенное влияние оказывают такие факторы, как емкостные связи между элементами измерительной системы, собственная индуктивность этих элементов, коронный и частичные разряды, сопротивление утечки и т.п. Влияние этих факторов не представляется возможным полностью исключить, поэтому их необходимо учитывать при проведении измерений.

Измерение высоких напряжений требует, как правило, применения специальных устройств, позволяющих или непосредственно определять измеряемое напряжение, или согласовать обычный измерительный прибор с источником высокого напряжения.

В дальнейшем кратко рассмотрим наиболее часто применяемые устройства для измерения переменного, постоянного и импульсного напряжений.

Электростатические высоковольтные вольтметры используются для непосредственного отсчета измеряемого напряжения. Принцип измерения основан на измерении сил электрического поля, возникающих между электродами измерительной системы (рис. 2.19, *a*).

Принцип измерения электростатическим вольтметром основан на измерении сил электрического поля, возникающих между электродами измерительной системы. Электростатический вольтметр имеет две пластины 1 и 2, к которым прикладывается измеряемое напряжение. Под воздействием приложенного напряжения между этими пластинами возникает электростатическая сила F , стремящаяся сблизить эти пластины. Если одна из пластин подвижна, то она начнет перемещаться. Перемещение подвижной пластины можно уравновесить механической силой, которую будет создавать, например пружина. На приведенной схеме электростатического высоковольтного вольтметра в качестве подвижного электрода используется пластина 3, которая расположена в отверстии электрода 2. Электроды 2 и 3 имеют одинаковый потенциал (в данном случае они оба заземлены), а пружина 4 уравновешивает силу, возникающую от электрического поля между пластинами 1 и 3. Свет от электрической лампы 5 падает на зеркало 6 жестко соединенное с электродом 3 и, отражаясь от него, падает на шкалу 7, которая отградуирована в киловольтах. Сила F пропорциональна квадрату измеряемого напряжения. Коэффициент пропорциональности

зависит от параметров электродной системы (электроды 1, 2, 3) и пружины 5. К этому классу киловольтметров относятся, например, С-96, С-100, С-101.

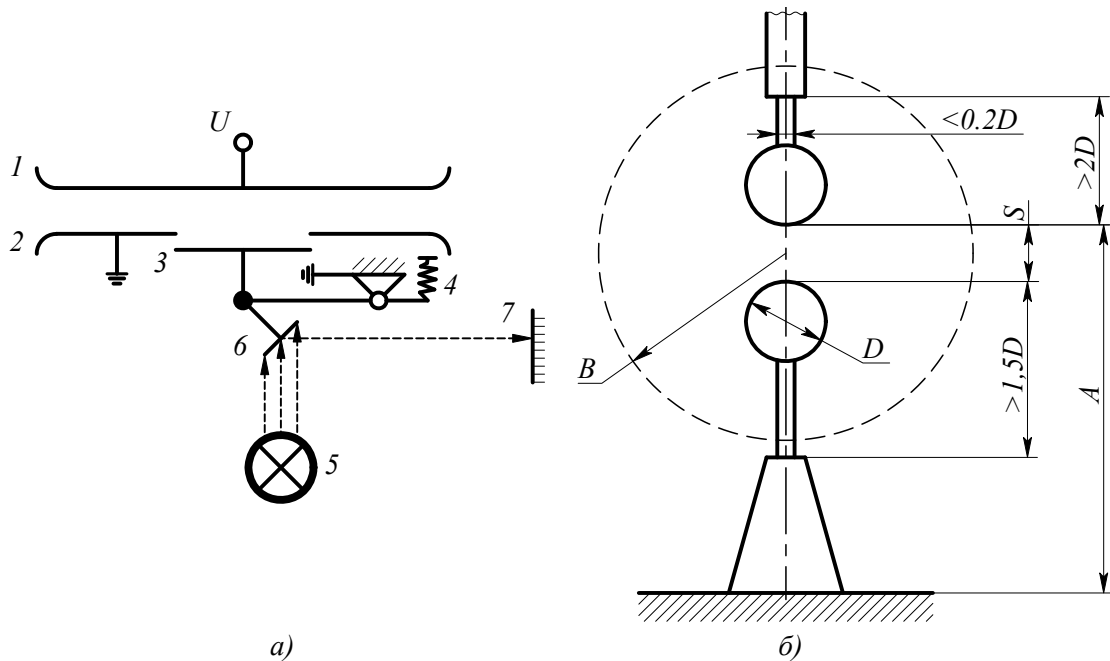


Рис. 2.19. Устройство электростатического киловольтметра (а) и шарового измерительного разрядника: A , B – расстояние от места разряда до окружающих предметов, D – диаметр измерительных шаров, S – расстояние между измерительными шарами; 1, 2, 3 – электроды, 4 – пружина, 5 – электрическая лампа, б – зеркало, 7 – шкала киловольтметра

Рассмотренные приборы имеют относительно малую погрешность измерения, небольшую входную емкость и позволяют измерять действующее значение напряжения и постоянное напряжение в пределах до 300 кВ.

Другим широко распространенным устройством измерения высоких напряжения является шаровой измерительный разрядник, благодаря простоте устройства и приемлемой для практики точности при правильной методике измерения с соблюдением определенных требований (рис. 2.19, б).

Измерение основано на использовании зависимости пробивного напряжения воздушного промежутка между шаровыми электродами от расстояния между ними. Для измерения следует использовать промежутки с однородным или слабонеоднородным полем, в которых напряжение пробоя имеет линейную зависимость от расстояния. Шаровые разрядники позволяют измерять высокое напряжение в широком диапазоне величин – от единиц киловольт до нескольких мегавольт. В приложении П2 приведены таблицы для определения пробивных напряжений при помощи шарового измерительного устройства.

При измерении пользуются градуировочными таблицами, дающими связь пробивного напряжения с диаметром шаровых электродов и расстоянием между ними. В таблицах даны амплитудные значения пробивного напряжения для нормальных атмосферных условий.

Шаровые разрядники устанавливаются вертикально или горизонтально. При вертикальном расположении нижний шар всегда заземляется. Чтобы погрешность измерения не превышала $\pm 3\%$ необходимо соблюдать условия: $S \leq 0,5D$, где D – диаметр шаров, а S – расстояние между ними. Кроме этого, расстояние до окружающих предметов не должно быть меньше установленного нормативом. Поэтому шаровые разрядники при больших диаметрах требуют значительного пространства.

При измерении постоянных и переменных напряжений, с целью снижения эрозии поверхности шаров и для демпфирования колебаний в цепи разряда, последовательно с шарами включается сопротивление от 10 кОм до 1 Мом. При измерении импульсных напряжений рекомендуется включать сопротивление не более 250...500 Ом.

Методика измерения постоянных и переменных напряжений состоит в следующем. После подключения шаровых разрядников к источнику измеряемого напряжения изменяют расстояние между ними до возникновения пробоя промежутка.

При измерении импульсного напряжения расстояние между шарами изменяют, добиваясь того, чтобы половина поданных импульсов вызывала пробой промежутка. Зная расстояние между шарами и их диаметр, по таблицам (Приложение 2) определяют величину пробивного напряжения. В тех случаях, когда измерения проводятся в условиях, отличных от нормальных, вводится поправочный коэффициент $\delta = 0,386P/(273+t)$, где P и t – соответственно давление в мм. рт. ст и температура в градусах Цельсия окружающей среды при проведении измерений, тогда искомое значение напряжения будет равно $U_{и} = U_T \cdot \delta$, где U_T – табличное значение пробивного напряжения.

Для измерения переменного и импульсного напряжения применяют емкостно-выпрямительные схемы (рис. 2.20).

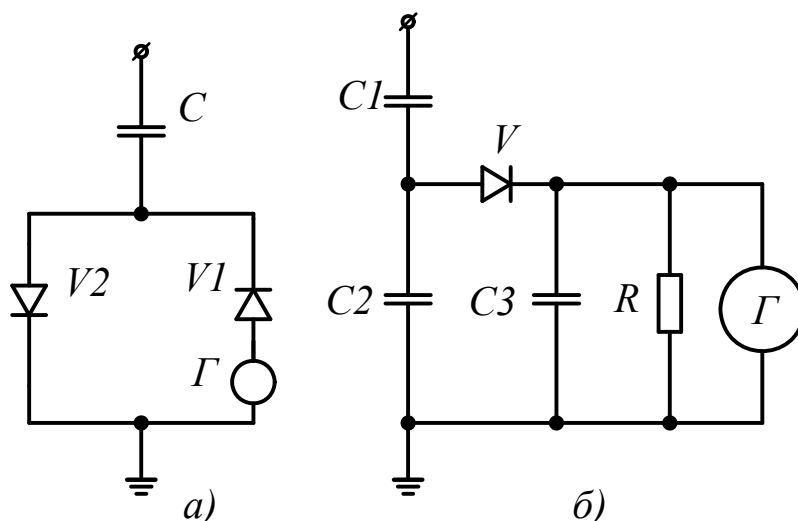


Рис. 2.20. Принципиальные электрические схемы для измерения амплитудных значений напряжения

В схеме рис. 2.20, а при измерении переменного напряжения ток I_c протекает в течение одного полупериода через вентиль V_1 и гальванометр, а в течение другого полупериода через вентиль V_2 . Средний ток через гальванометр за период будет равен $I_{cp} = Q/T$, где $Q = 2CU_m$ – интеграл тока за период T . Следовательно, величина амплитудного значения напряжения $U_m = k \cdot I_{cp}$, где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от частоты и величины емкости конденсатора.

Погрешность измерения будет зависеть от точности измерения величины емкости и частоты напряжения, а также от конечного значения сопротивления вентиля в открытом и закрытом состоянии. Кроме этого, погрешность зависит от наличия высших гармоник в кривой тока и напряжения.

Другой разновидностью устройства для измерения амплитудного значения переменного напряжения является схема амплитудного вольтметра (пик-вольтметра). Схема простейшего пик-вольтметра с использованием емкостного делителя показана на рис. 2.20, б. Параллельно плечу низкого напряжения емкостного делителя $C_1 - C_2$ подключается через вентиль V конденсатор C_3 . Напряжение на измерительном конденсаторе может быть измерено вольтметром электростатической системы или электронным вольтметром с большим входным сопротивлением.

При измерении амплитудными вольтметрами возникает погрешность, связанная с неидеальностью элементов измерительной схемы: конечное значение сопротивления вентиля в открытом и закрытом состоянии и конечное значение сопротивления R_y . Кроме этого, возникает погрешность, связанная с влиянием схемы измерения на коэффициент деления делителя. Снижение этой погрешности можно добиться, соблюдая условие $C_{и} \ll C_2$.

2.6.1. Делители для измерения высоких напряжений

Одним из способов измерения высоких напряжений различного вида являются делители напряжения. Использование делителей напряжения с электронными осциллографами позволяет получить обширную информацию о параметрах измеряемого напряжения.

Применяются делители следующих типов: омические, емкостные и омическо-емкостные. Делитель, представляя собой цепочку последовательно включенных активных или реактивных сопротивлений, является своеобразным передаточным звеном в цепи измерения и определенным образом должен оказывать влияние на точность измерения. В связи с этим к делителям напряжения предъявляется достаточно жесткое основное требование: напряжение на низковольтном плече делителя должно по форме повторять измеряемое напряжение. Это значит, что коэффициент деления не должен зависеть от частоты и величины измеряемого напряжения. Кроме этого, на коэффициент деления не должны влиять внешние электростатические и электромагнитные поля, корона и утечки по изоляционной конструкции делителя.

Передаточным отношением (коэффициентом деления) делителя, состоящего из N однородных элементов с сопротивлением Z_0 , называют отношение напряжения, подводимого к делителю (U_1) к величине напряжения, снимаемого с низковольтной части делителя (U_2), т. е.

$$K = U_1 / U_2 = (Z_1 + Z_2) / Z_2 \text{ (рис. 2.21, а).}$$

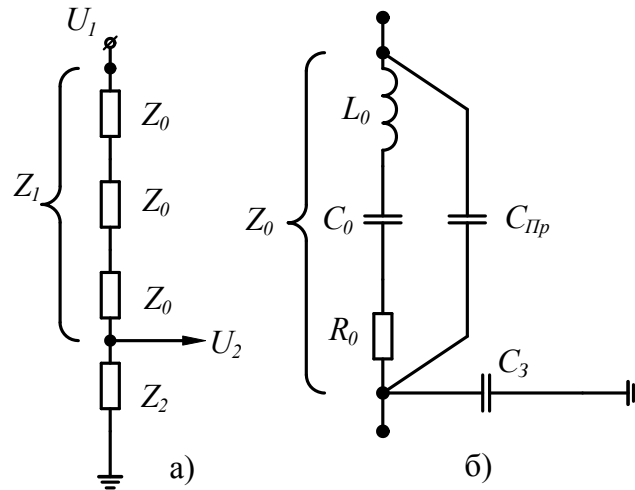


Рис. 2.21. Принципиальная схема делителя напряжения (а) и схема замещения ступени высоковольтного плеча делителя (б): Z_1 – эквивалентное сопротивление высоковольтного плеча делителя, Z_2 – эквивалентное сопротивление низковольтного плеча делителя

Эквивалентная схема одного из N элементов высоковольтного плеча делителя Z_0 в общем случае имеет вид, представленный на рис. 2.21, б. Обозначения на схеме соответствуют: R_0 , C_0 и L_0 – собственное сопротивление, емкость и индуктивность одного из N элементов; $C_{пр}$ – продольная емкость единицы длины делителя; а C_3 – емкость единицы длины делителя относительно земли. Из этой общей схемы можно получить практические схемы любого типа делителя (омического, емкостного или емкостно-омического), как частные случаи. Вопросам теории делителей напряжения и их применения в технике высоких напряжений посвящено достаточное количество работ. Ниже мы рассмотрим некоторые принципиальные вопросы работы делителей при измерении высоких напряжений.

При измерении высоких постоянных напряжений чаще всего используются стрелочные приборы (микро- и миллиамперметры) с добавочными сопротивлениями, либо омические делители напряжения, схему замещения которого можно получить положив $C_0 = \infty$, $L_0 = 0$, $C_{пр} = 0$, $C_3 = 0$ (рис. 2.21, б).

Влияние токов утечки по изоляции резисторов делителя можно учесть сопротивлением утечки единицы длины (R_y), включенным вместо $C_{пр}$. Точность измерения такого делителя будет определяться в основном параметрами используемых резисторов: собственная индуктивность резистора, проходная емкость между выводами, зависимость сопротивления от температуры и частоты проходящего тока, зависимость сопротивления от напряжения на резисторе. С увеличением измеряемого напряжения погрешность возрастает из-за влияния

токов утечки по изоляционной конструкции делителя, возможного возникновения коронного разряда, зависимости сопротивления резистора от температуры и нелинейность резисторов от напряжения.

При создании делителей для измерения постоянных напряжений используют проволочные или керамические резисторы. Проволочные сопротивления изготавливаются из манганина, константана, нихрома и других металлов с высоким удельным сопротивлением или используют выпускаемые промышленностью проволочные резисторы С5-23 ÷ С5-25 и ряд других. В качестве сопротивлений могут использоваться керамические объемные (ТВО) и с пленочным проводящим покрытием резисторы КЭВ.

При измерении переменных и импульсных высоких напряжений используются омические, емкостные и емкостно-омические делители. Причиной появления погрешностей при измерении меняющихся во времени напряжений являются паразитные параметры, а именно C_3 , $C_{\text{пр}}$ и L_0 (рис. 2.21, б). Наличие этих элементов вызывает увеличение времени нарастания напряжения, появления колебаний и неравномерность распределения напряжения по элементам делителя, связанного с токами на зарядку емкостей C_3 .

Омический делитель напряжения ($C_0 = \infty$, рис. 2.21, б). Индуктивность делителя является нежелательным, но неизбежным параметром, присущим любому делителю. Величина ее зависит от конструктивного исполнения делителя и пропорциональна его длине. Причем коэффициент пропорциональности имеет порядок ($10^{-6} \div 10^{-5}$) Гн/м.

При измерении переменных напряжений промышленной частоты влиянием индуктивности на точность измерения можно пренебречь.

При измерении импульсного напряжения погрешность, связанная с индуктивностью, начинает возрастать. Эта погрешность связана с возникновением колебаний. Влияние индуктивности существенно для низкоомных делителей, у которых сопротивление порядка 400 Ом и меньше. Для высокоомных делителей влиянием индуктивности можно пренебречь. Условием отсутствия колебаний, связанных с индуктивностью, является неравенство $R \geq 2\pi \sqrt{L_0 / C_3} / \sqrt{1 + C_3 \cdot \pi^2 / C_{\text{пр}}}$. Необходимо отметить, что выполнение этого условия можно добиться только одновременным уменьшением L_0 и $C_{\text{пр}}$. Уменьшить влияние индуктивности на измеряемое напряжение можно, используя малоиндуктивные сопротивления и проволочные сопротивления с бифилярной намоткой.

На характер передачи формы напряжения решающее влияние оказывает емкость делителя на землю C_3 . Эта емкость неравномерна по длине делителя и ее наличие приводит к неравномерному распределению напряжения вдоль его длины.

При измерении напряжений промышленной частоты возникают погрешности, которые определяются в основном произведением RC_3 . Выделяют амплитудную δU и угловую $\delta \varphi$ погрешности, которые могут быть выражены $\delta U = -0,3(\omega\tau_c)^2$ и $\delta \varphi = \text{arc tg}(\omega\tau_c)$. Анализ показывает, что применение делителей ма-

лого сопротивления и малых габаритов позволило бы уменьшить погрешности. Однако габариты делителя будут определяться максимальной допустимой напряженностью вдоль делителя, а уменьшение сопротивления приводит к отбору мощности и влиянию делителя на измеряемое напряжение.

При измерении импульсных и высокочастотных напряжений омическим делителем возникают еще более сложные проблемы, связанные с высокой скоростью нарастания напряжения. Переходная функция омического неэкранированного делителя при воздействии прямоугольного импульса с учетом некоторых допущений имеет вид

$$h(t) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{n}{N} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \cdot e^{-t/\tau_k} \right], \quad (2.5)$$

где n/N – величина, обратная коэффициенту деления.

Второе слагаемое представляет сумму экспонент с постоянной времени $\tau_k = RC_3 / (k\pi)^2$ и характеризует нелинейность распределения напряжения, т. е. погрешность измерения. Для уменьшения погрешностей необходимо уменьшить τ_k , т. е. использовать малогабаритные низкоомные делители, что ограничивается, как уже выше говорилось, максимальной допустимой напряженностью и отбором мощности. Кроме этого, сопротивление делителя является разрядным для импульсных генераторов и не может быть выбрано произвольно малым, ибо оно определяет форму импульса.

Одним из путей снижения погрешностей омических делителей является увеличение собственной продольной емкости $C_{Пр}$, т. е. выравнивание распределения напряжения по длине. Этого можно добиться либо включением емкости параллельно высокоомному плечу (компенсированный делитель), либо использованием экранов. Влияние экранов связано с выравниванием электрического поля и компенсацией оттекающих токов через емкость относительно земли. Для такого делителя переходная функция при воздействии прямоугольного импульса в первом приближении имеет вид

$$h(t) = \frac{n}{N} \left(1 - \frac{C_3}{6C_{Пр}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (2.6)$$

где $\tau = RC_{Пр}$.

Нетрудно убедиться, что идеальная передаточная характеристика будет при максимально большом отношении $C_{Пр}/C_3$. В практике создания таких делителей достаточно иметь соотношение $C_{Пр}/C_3 > 3 \div 5$, т. к. при больших значениях делитель будет представлять большую емкостную нагрузку импульсным установкам и влиять на измеряемое напряжение.

Емкостный делитель ($R_0 = 0$, $L_0 = 0$, рис. 2.21, б). Как отмечалось при рассмотрении омического делителя, снижение погрешности можно добиться увеличением продольной емкости $C_{Пр}$. С ростом частоты при достаточно большом отношении $C_{Пр}/C_3$ распределение напряжения будет определяться токами через

емкостную проводимость. Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности применения чисто емкостного делителя для измерения быстроизменяющегося напряжения. Переходная функция такого делителя имеет вид

$$h(t) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}, \quad (2.7)$$

где C_1 – емкость высоковольтного плеча, C_2 – емкость низковольтного плеча.

Как видно из этого выражения, емкостный делитель воспроизводит процесс с постоянной погрешностью, не зависящей от частоты. Однако реальные емкостные делители, собранные из конденсаторов, всегда обладают сопротивлением утечки, которое не позволяет использовать такие делители для измерения медленно меняющихся или постоянных напряжений, т. к. в этом случае распределение напряжения будет не по емкостям, а по сопротивлениям утечки. Кроме того, наличие собственной индуктивности конденсаторов ($L_0 \neq 0$) вызывает возникновение колебаний в делителе, что ограничивает применение таких делителей.

2.6.2. Измерение больших импульсных токов

Во многих областях науки и техники необходимо производить измерения импульсов тока большой амплитуды до $10^5 \div 10^6$ А при скоростях нарастания тока до $10^9 \div 10^{13}$ А/с. Запись таких кратковременных процессов требует создания специальных измерительных устройств. В настоящее время широкое распространение при измерении импульсных токов получили, в основном, два способа: использование низкоомных измерительных сопротивлений (токовых шунтов) и специального трансформатора тока (катушки Роговского). В обоих случаях получают напряжение, которое в большей или меньшей степени пропорционально изменению измеряемого тока во времени.

Измерение тока с помощью токовых шунтов основано на включении небольшого по величине сопротивления в цепь измеряемого тока. Создаваемое падение напряжения $U_{ш}(t)$ будет пропорционально $I_{ш}(t)$, если измерительное сопротивление для заданного диапазона частот является активным. Однако это требование нелегко реализовать у шунтов для измерения больших по амплитуде токов. При измерении быстроизменяющихся во времени токов необходимо считаться с изменением сопротивления шунта за счет поверхностного эффекта, влияния способа и места подключения, собственной индуктивностью шунта и влиянием посторонних магнитных полей на контур подсоединения шунта. В общем виде напряжение шунта можно представить как $U_{ш}(t) = I_{ш}(t) \cdot R_{ш} + L \cdot dI/dt$, где последнее слагаемое правой части представляет из себя индуктивную составляющую, обусловленную потокоцеплением с контуром ABCD (рис. 2.22, а) собственного магнитного поля токовой цепи шунта и посторонних магнитных полей, создаваемых прилегающими к шунту участками токопровода, и собственной индуктивностью.

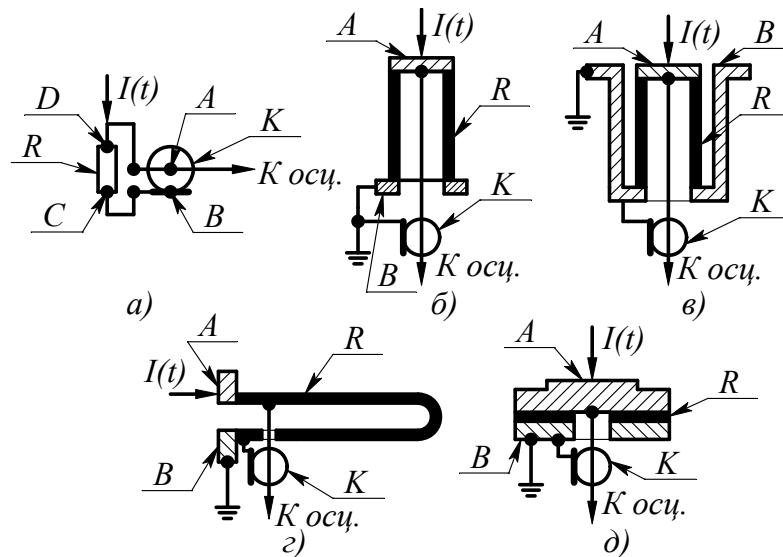


Рис. 2.22. Принципиальное устройство токовых шунтов: а – простейший стержневой, б – трубчатый, в – трубчатый коаксиальный, г – ленточный, д – дисковый; R – тело шунта, А – подвод тока, В – отвод тока, К – коаксиальный кабель для подключения осциллографа

Исключение неравномерности распределения тока по сечению шунта можно добиться, заменяя стержневой шунт на трубчатый. Наиболее пригодными являются ленточный (из тонкой ленты, сложенной в петлю (рис. 2.22, г), трубчатый (рис. 2.22, б) трубчатый коаксиальный (рис. 2.22, в), дисковый (рис. 2.22, д). В качестве сопротивления шунта используются материалы с высоким удельным сопротивлением (нихром, манганин, константан и др.). Материалы с большим удельным сопротивлением обладают более равномерным распределением тока по сечению. Эти материалы, обладая низким температурным коэффициентом сопротивления, обеспечивают практически независимость сопротивления шунта от температуры.

Принцип измерения тока с помощью катушки Роговского (трансформатора тока) можно объяснить из закона полного тока, когда интеграл магнитной индукции берется по контуру кривой намотки катушки (рис. 2.23, а), т. е. $\oint B dS = \mu I_1$. Если представить, что по кривой "С" длиной l , охватывающей проводник с током $I_1(t)$, намотана катушка с числом витков "n" с одинаковым шагом Δl и площадью витка S , то при изменении магнитного поля в катушке будет индуцироваться напряжение $U_2(t) \approx M dI_1(t) / dt$, где M – коэффициент взаимной индукции между проводником с током I_1 и катушкой. Получить напряжение $U_2(t)$, пропорциональное току $I_1(t)$, можно при помощи пассивной схемы, состоящей из LR или RC контура (рис. 2.23, б, в), если $I_2(t) \ll I_1(t)$. При измерении тока по схеме рис. 2.23, б с минимальной погрешностью необходимо соблюдать условие: падение напряжения на индуктивности L катушки должно быть много больше падения напряжения на сопротивлении R . В этом случае $U_2(t) \approx RMI_1(t)/L$, т.е. пропорционально току $I_1(t)$.

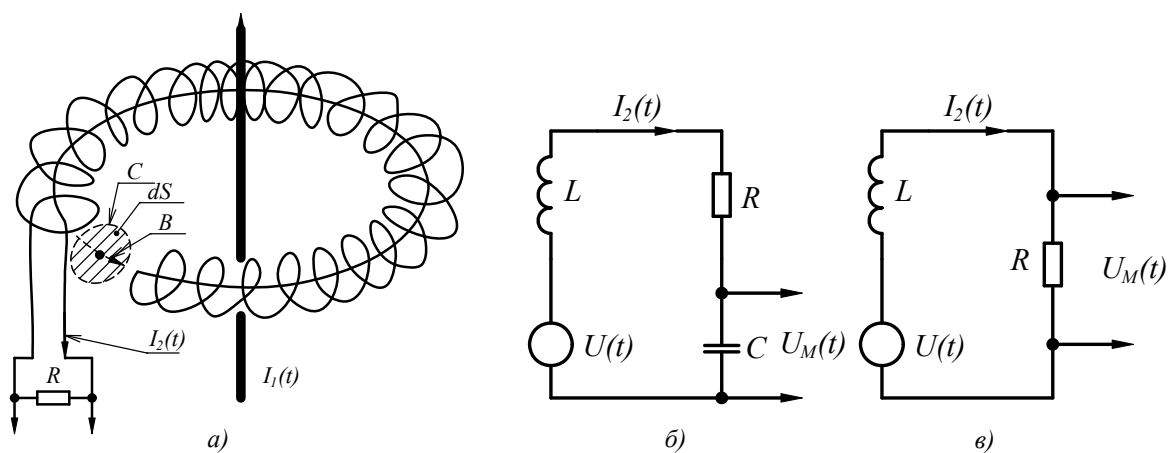


Рис. 2.23. Принципиальные схемы измерения импульсного тока поясом Роговского: а – пояс Роговского, б – схема замещения пояса Роговского при интегрировании сигнала с помощью емкости C , в – схема замещения пояса Роговского с интегрированием с помощью сопротивления R

Необходимо, однако, помнить, что быстроизменяющиеся магнитные поля всегда связаны с быстроизменяющимися электрическими полями. Чтобы избежать нежелательных емкостных связей, измерительные катушки экранируются.

Литература к главе № 2

- 2.1. Высоковольтное испытательное оборудование и измерения/ Под ред. А.А. Воробьева. М.-Л.: ГЭИ, 1960. – 584 с.
- 2.2. Техника высоких напряжений/Под ред. Г.С. Кучинского. – СПб.:ПЭИПК, 1998 – 700 с.
- 2.3. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения. Перевод с нем./ М. Байер, В. Бек, К. Меллер, В. Цаенгль. Под ред. В.П. Ларионова. – М.:Энергоиздат, 1989 – 555 с.
- 2.4. Авруцкий В.А., Кужекин И.П., Чернов Е.Н. Испытательные и электрофизические установки. Техника эксперимента. – М.: МЭИ, 1983. –262 с.
- 2.5. Техника высоких напряжений/ Под ред. М.В. Костенко. – М.: Высшая школа, 1973 – 528 с.
- 2.6. Шваб А. Измерения на высоком напряжении. – М.: Энергия, 1973. – 233 с.
- 2.7. Болотин И.Б., Эйдель Л.З. Измерения в режимах короткого замыкания. –Л.: Энергия, 1973. – 181 с.
- 2.8. Техника больших импульсных токов и магнитных полей/ Под ред. В.С. Комелькова. М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
- 2.9 Альбертинский Б.И., Свиньин М.П. Каскадные генераторы. – М.: Атомиздат, 1980 – 196 с.
- 2.10. Аншер А.М. Получение и измерение импульсного высокого напряжения. – М.: Энергия, 1979 – 120 с.
- 2.11. Кужекин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. – М.: Энергия, 1980 – 136 с.

2.12. Смирнов С.М., Терентьев П.В. Генераторы импульсов высокого напряжения. - М.: Энергия, 1964.-239 с.

2.13. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. ГОСТ 1516.2-76. – М.: Издательство стандартов, 1987 – 56 с.

2.14. Электрооборудование переменного тока на напряжение от 1 кВ до 750 кВ. ГОСТ 1516.3 - 96. – М.: Издательство стандартов, 1998 – 50 с.

Контрольные вопросы к главе № 2:

- 2.1. Как классифицируются трансформаторы в высоковольтной технике?
- 2.2. Какие требования предъявляются к испытательным трансформаторам?
- 2.3. В силу, каких причин повышение напряжения трансформатора более 750 кВ оказывается нецелесообразным?
- 2.4. Способы получения напряжения постоянного тока.
- 2.5. Какие существуют схемы выпрямления?
- 2.6. Основные элементы схемы выпрямления.
- 2.7. Виды выпрямителей. Их преимущества и недостатки.
- 2.8. Приведите схему и диаграмму напряжений каскадного генератора постоянного тока.
- 2.9. Каким образом можно получить высокое импульсное напряжение? Где и для чего используется высокое импульсное напряжение?
- 2.10. Приведите схему и поясните принцип работы генератора Аркадьева-Маркса.
- 2.11. Каким образом можно получить большие импульсные токи? Где и для чего они применяются?
- 2.13. Приведите схему и поясните принцип работы генератора импульсных токов.
- 2.14. В чем состоит принципиальное различие в работе ГИН и ГИТ?
- 2.15. Назовите способы измерения высоких напряжений. В чем состоят сложности при измерении на высоком напряжении?
- 2.16. Каким образом осуществляется измерение больших импульсных токов?
- 2.17. Приведите схему и поясните принцип работы токового шунта.
- 2.18. Объясните принцип работы измерительного трансформатора тока.
- 2.19. В каких областях современной индустрии используется высоковольтное испытательное оборудование?

ГЛАВА 3

ИЗОЛЯЦИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

3.1. Классификация электрической изоляции

Электрическая изоляция является одним из важнейших элементов, обеспечивающих безаварийность и долговечность работы высоковольтных аппаратов и конструкций. Кроме электрического изолирования проводников, находящихся под различными потенциалами, изоляция должна выдерживать большие механические, тепловые и другие нагрузки (воздействия), которые могут возникать в эксплуатации.

Изоляция высоковольтных конструкций подразделяется на внешнюю и внутреннюю.

Внешняя изоляция – это воздушные промежутки и поверхность твердой изоляции в атмосферном воздухе, которые подвергаются влиянию атмосферных и других внешних воздействий (загрязнение, увлажнение и т.п.). Они существенно затрудняют условия работы изоляции в открытой атмосфере.

Внутренняя изоляция – это твердая, жидкая газообразная изоляция (или их комбинации) внутренних частей электрооборудования, не подвергающаяся непосредственному влиянию атмосферного и других видов внешних воздействий (загрязнение, увлажнение, воздействие птиц и микроорганизмов).

После пробоя и снятия напряжения газовая изоляция (воздух, высокопрочные газы) полностью восстанавливает свою первоначальную электрическую прочность, т.е. этот процесс является обратимым. Жидкая изоляция после пробоя восстанавливает свою прочность частично, т.к. пробой приводит к ухудшению ее характеристик. Пробой твердой и комбинированной изоляции (бумажно-масляная, маслобарьерная) – явление необратимое, изоляция подлежит замене.

Электрооборудование, предназначенное для работы в электрических сетях, подразделяется на классы напряжения. Классом напряжения называется номинальное междуфазное (линейное) напряжение электрической сети, для работы в которой предназначено электрооборудование. Каждый класс напряжения характеризуется своим уровнем изоляции, под которым понимается совокупность испытательных напряжений, установленных стандартом (например, ГОСТ 1516.1-76) или техническими условиями для внутренней и внешней изоляции данного оборудования.

Электрическая изоляция работает как в однородном (достаточно редко), так и в неоднородном (гораздо чаще) электрических полях.

В однородном поле вектор напряженности вдоль силовых линий сохраняет свое значение ($E = const$), а в неоднородном - вектор напряженности изменяется ($E = var$). При этом силовые линии поля в однородном поле параллельны

друг другу (электроды Роговского или плоский конденсатор), а в неоднородном силовых линии поля, как правило, не параллельны (острие-плоскость).

3.2. Условия работы и требования, предъявляемые к электрической изоляции высоковольтного оборудования

В процессе эксплуатации изоляция электрооборудования подвергается воздействию разнообразных факторов.

Воздействующие напряжения. Условия работы электрической изоляции высоковольтного оборудования определяются в первую очередь действующими напряжениями. Степень влияния напряжения на электрическую прочность и долговечность изоляции зависит от его амплитуды, длительности, формы.

При эксплуатации высоковольтных установок можно выделить три группы действующих напряжений: рабочее напряжение; внутренние (коммутационные) перенапряжения (ВПН); атмосферные (грозовые) перенапряжения (АПН).

Рабочее напряжение. Длительно воздействует на изоляцию высоковольтных конструкций в течение всего срока службы (20 – 30 лет). Величина этого напряжения устанавливается в соответствии с ГОСТ 1516.1-76 номинальным напряжением электрической сети и может отличаться от последнего, в зависимости от режима электропередачи, в большую или меньшую сторону. Для каждого класса напряжения наибольшее рабочее действующее напряжение (линейное) определяется как

$$U_{\text{раб.возд.}} = K \cdot U_{\text{ном}}, \quad (3.1)$$

причем значение коэффициента K принимается равным в зависимости от класса напряжения согласно таблице 1.

Таблица 1. Наибольшее рабочее действующее напряжение

Класс напряжения, кВ	3-20	35-220	330	500-1150
K	1,20	1,15	1,10	1,05

При выборе изоляции электрооборудования, предназначенного для работы в сетях с изолированной или резонансно-заземленной нейтралью ($U_{\text{ном}} \leq 35$ кВ) за расчетное напряжение обычно принимается наибольшее рабочее линейное напряжение сети.

Для оборудования, предназначенного для работы в сетях с эффективно заземленной нейтралью, наибольшее рабочее фазное напряжение сети равно

$$U_{\text{ф.н.}} = \frac{K \cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}. \quad (3.2)$$

При однофазных замыканиях на землю и внезапных сбросах нагрузки, в соответствии с характеристиками отечественных вентильных разрядников, кратность перенапряжений промышленной частоты для классов 110-500 кВ не должна превышать $1,38U_{\text{Ф.н}}$ (заземленная нейтраль) и $1,73U_{\text{Ф.н}}$ в сетях с изолированной нейтралью.

При отключении ненагруженных трансформаторов кратность ВПН может достигать $(3,5 - 4,0)U_{\text{Ф.н}}$ при длительности до 100 мкс с частотой до 10 кГц.

Величины воздействующих напряжений при ВПН ограничиваются вентильными разрядниками. Для внутренних перенапряжений уровень воздействующих напряжений оценивается как

$$U_{\text{возд.ВПН}} = 1,07U_{\text{раз}}, \quad (3.3)$$

где $U_{\text{раз}}$ – наибольшее пробивное напряжение разрядника при промышленной частоте; 1,07 – коэффициент, учитывающий статистический разброс пробивных напряжений разрядника.

Атмосферные перенапряжения. АПН возникают на изоляции электрооборудования как при прямых ударах молнии в провод или опору ЛЭП, так и при разряде молнии вблизи линии.

Для защиты оборудования от набегающих волн на подстанции устанавливаются грозозащитные вентильные разрядники.

Величины воздействующего напряжений на изоляцию оборудования при АПН

$$U_{\text{возд.АПН}} = K_{\text{Г}} \cdot U_{\text{раз.ост}}, \quad (3.4)$$

где $U_{\text{раз.ост}}$ – остаточное напряжение на разряднике при токе молнии 5 кА для изоляции класса напряжения 110 – 220 кВ и при токе 10 кА для класса напряжения более 300 кВ; $K_{\text{Г}}$ – коэффициент, учитывающий перепад напряжения между разрядником и защищаемым объектом за счет индуктивности ошиновки между ними.

При ограничении крутизны набегающей волны и рациональным расположением разрядников на подстанции можно принять для силовых трансформаторов $K_{\text{Г}} = 1,2$ и для остального оборудования $K_{\text{Г}} = 1,3 - 1,4$.

Нелинейные ограничители перенапряжений имеют существенно меньшее остающееся напряжение при токах координации. Поэтому применение этих ограничителей позволяет существенно снизить значения воздействующих не только внутренних, но и грозовых перенапряжений.

Электрические факторы. При нарушении нормального режима эксплуатации ЛЭП, приводящего к резкому увеличению напряжения, а также при ухудшении свойств изоляции, в связи с изменением окружающих условий, могут возникать такие нежелательные явления как корона, скользящие разряды, частичные разряды, трекинг, триинг, снижающие надежность и долговечность высоковольтных установок.

Механические факторы. Механические усилия в изоляции возникают как при нормальной работе (усилия при плановых коммутациях, ветровые нагрузки и т.д.), так и в аварийных режимах (рост электродинамических сил между токоведущими частями аппаратов при коротких замыканиях).

Тепловые воздействия. Тепловые воздействия в изоляции возникают из-за нагрева изоляции за счет тепла, выделяющегося в проводниках при протекании длительного номинального тока, а также диэлектрических потерь в изоляции при приложении электрического поля.

При протекании по проводникам токов короткого замыкания в аварийном режиме изоляция испытывает кратковременный перегрев («тепловой удар»).

Атмосферные воздействия. При эксплуатации в открытой атмосфере изоляция подвергается воздействию дождя, тумана, росы, снега, гололеда, природных и промышленных загрязнений, колебаний температуры, давления и т.д. Как правило, все эти факторы приводят к снижению электрической прочности изоляции и ее надежности.

Фактор времени. С течением времени даже при нормальных условиях эксплуатации электроизоляционные и механические свойства изоляции постепенно ухудшаются, происходит «старение» изоляции.

Воздействующие среды. При эксплуатации высоковольтных установок на изоляцию могут воздействовать агрессивные газы и жидкости, приводящие к преждевременному ухудшению ее свойств.

В ряде случаев необходимо учитывать специфические условия работы изоляции. Так при работе оборудования в тропиках на изоляцию воздействует повышенная влажность и температура, повышенная солнечная радиация, деятельность некоторых микроорганизмов и животных.

Надежная и безаварийная работа высоковольтного оборудования может быть обеспечена, если изоляция будет иметь высокую импульсную и кратковременную электрическую прочность при грозовых и внутренних перенапряжениях, соответственно, а также при условии отсутствия таких факторов, как корона, частичные и скользящие разряды, трекинг при длительном воздействии рабочего напряжения.

Создание надежной изоляции непосредственно связано с вопросами координации, т. е. с согласованием характеристик защитной аппаратуры со свойствами изоляции. Комплексное решение этих вопросов при выполнении выше изложенных требований, позволяет выбрать так называемый уровень изоляции.

Уровень изоляции означает такое качество изоляции, при котором она в состоянии выдерживать коммутационные перенапряжения заданной кратности относительно наибольшего фазного рабочего напряжения и импульсные воздействия, ограниченные соответствующими разрядниками. Обычно под этим понимают испытательные напряжения изоляции, закрепленные ГОСТ 1516.1-76. Испытательное напряжение является некоторым эквивалентом воздействующих напряжений и выбирается с учетом характеристик вентильных разрядников. Для внешней и внутренней изоляции электрооборудования эквивалентом воздействующих напряжений при АПН являются импульсные испытательные

волны ($U_{\text{исп.имп}}$) при полном (1,2/50 мкс) и срезанном (2...3 мкс) стандартном импульсе.

Проверка стойкости внутренней изоляции электрооборудования к воздействию ВПН производится путем приложения к объекту одномоментного испытательного напряжения ($U_{1\text{мин}}$). ГОСТ 1516.1-76 устанавливает также испытательное напряжение промышленной частоты, выдерживаемое внешней изоляцией электрооборудования в сухом состоянии ($U_{\text{схв}}$ – суховыдерживаемое напряжение) и под дождем ($U_{\text{мв}}$ – мокровыдерживаемое напряжение).

Изоляция электрооборудования на класс напряжения 330 кВ и выше испытывается также коммутационными волнами различной формы, в зависимости от типа оборудования, с целью проверки стойкости изоляции к воздействию коммутационных перенапряжений.

Требованиями по механической прочности изоляции на напряжение до 35 кВ в соответствии с правилами устройства электроустановок (ПУЭ) предусматривается допустимая нагрузка на изолятор

$$P_{\text{доп}} \leq \frac{1}{3} P_{\text{разр}}, \quad (3.5)$$

где $P_{\text{разр}}$ – разрушающая нагрузка, КГс.

На классы напряжения более 110 кВ допустимые нагрузки не установлены, и они определяются техническими условиями на изделие, выпускаемое предприятием.

3.3. Наружная изоляция электроустановок

Наружная высоковольтная изоляция работает в непосредственном контакте с атмосферным воздухом. В условиях эксплуатации такая изоляция (изоляторы) подвергается воздействию электрического поля, механических усилий и вибрации, метеорологических (атмосферных) факторов.

По назначению изоляторы делятся на линейные и стационарно – аппаратные, которые, в свою очередь, делятся на опорные и проходные.

Стационарно-аппаратные изоляторы могут изготавливаться не только для наружных, но и для внутренних установок, предназначенных для работы в закрытых помещениях. Для наружной установки изоляторы изготавливают с нормальной и усиленной внешней изоляцией, т.е. с увеличенной длиной пути утечки тока по поверхности изолятора (за счет применения ребер). Изоляторы внутренней установки имеют обычно гладкую или слаборебристую поверхность.

Изолятор состоит из диэлектрика (фарфор, стекло, стеатит, ситалл) и металлической арматуры для крепления изолятора в условиях эксплуатации. В последнее время в качестве наружной изоляции применяются полимерные изоляторы на основе эпоксидных компаундов, кремнийорганических и полиэфирных смол с минеральными наполнителями. Такие изоляторы имеют высокую

электрическую прочность, малый вес и достаточную трекингостойкость. С целью повышения механической прочности изоляторов производится их армирование стекловолокном (стеклопластиковые изоляторы).

Наибольшее распространение в электроэнергетике получили изоляторы из фарфора и стекла.

3.3.1. Изоляция воздушных линий электропередачи

Провода линий электропередачи крепятся на металлических, железобетонных, деревянных и смешанного типа опорах при помощи линейных изоляторов. По конструктивному исполнению линейные изоляторы делятся на штыревые и подвесные.

Штыревые изоляторы. Применяются на ЛЭП до 35 кВ и монтируются на опорах с помощью специальных штырей или крюков.

Конструкция штыревого изолятора на напряжение 6-10 кВ представлена на рис. 3.1.

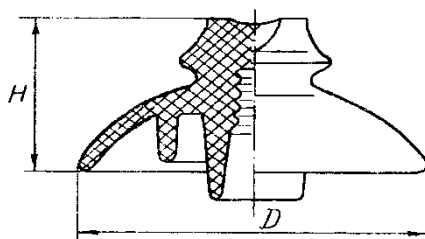


Рис. 3.1. Конструкция линейного штыревого изолятора на напряжение 6-10 кВ типа ШФВ 10-В

Изолятор крепится в вертикальном положении на специальном штыре или крюке с помощью специального полиэтиленового колпачка. Провод крепится в верхней или боковой канавке посредством проволоочной вязки. Штыревые изоляторы выполняются с резко выступающими ребрами, обращенными книзу, что повышает мокроразрядное и сухоразрядное напряжения изолятора.

Подвесные изоляторы. При $U_{\text{ном}} \geq 35$ кВ на ЛЭП применяют подвесные изоляторы, которые можно разделить на тарельчатые (шарнирные), стержневые (с кольцевыми или винтовыми ребрами) и стержневые гладкие (или палочные) изоляторы.

Подвесной шарнирный изолятор с конусной головкой (рис. 3.2) состоит из фарфора или закаленного стекла 1, армированных металлическими элементами – шапкой 2 из ковкого чугуна и стержня 3 из стали, которые во избежание коррозии оцинковываются.

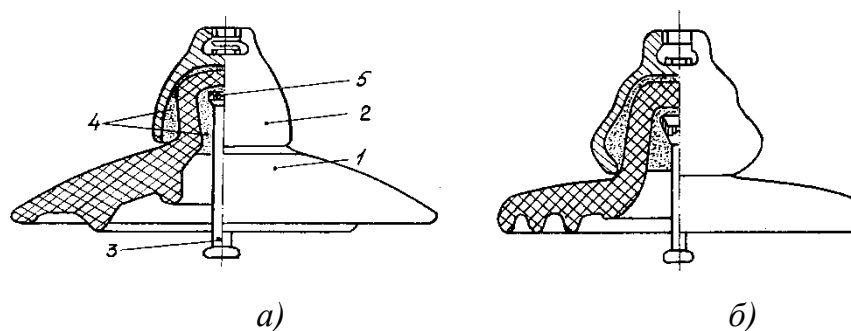


Рис. 3.2. Подвесные шарнирные изоляторы, а – с конусной головкой, б – с цилиндрической головкой: 1 – фарфор или закаленное стекло, 2 – шапка, 3 – стержень, 4 – цементно-песчаная смесь, 5 – демпферная прокладка из картона, пробки или кирпичи

Металлическая арматура соединяется с изоляционной «тарелкой» посредством армировочных цементно-песчаных связей 4. Во избежание повреждения тела изолятора при ударах между арматурой и изоляционным телом помещаются демпферные прокладки 5 из картона, пробки или кирпичи. Изоляторы из фарфора в процессе их изготовления покрываются глазурью (белая, коричневая), что улучшает их механические свойства на 15-20 %, повышает влагостойкость, способствует самоочистке под действием ветра и дождя, повышает электрические характеристики, улучшает внешний вид. Все более широкое распространение находят изоляторы с цилиндрической головкой (рис. 3.2, б).

Изоляторы с цилиндрической головкой имеют более высокую механическую прочность, более высокие технико-экономические показатели, меньшую строительную высоту. Процесс изготовления таких изоляторов легче поддается механизации.

При разряде по загрязненной и увлажненной поверхности изолятора важным параметром является длина пути утечки изолятора – кратчайшее расстояние вдоль поверхности изолятора между металлическими частями, находящимися под различными потенциалами.

На рис. 3.3 представлены некоторые типы изоляторов, предназначенных для работы в условиях интенсивного загрязнения атмосферы.

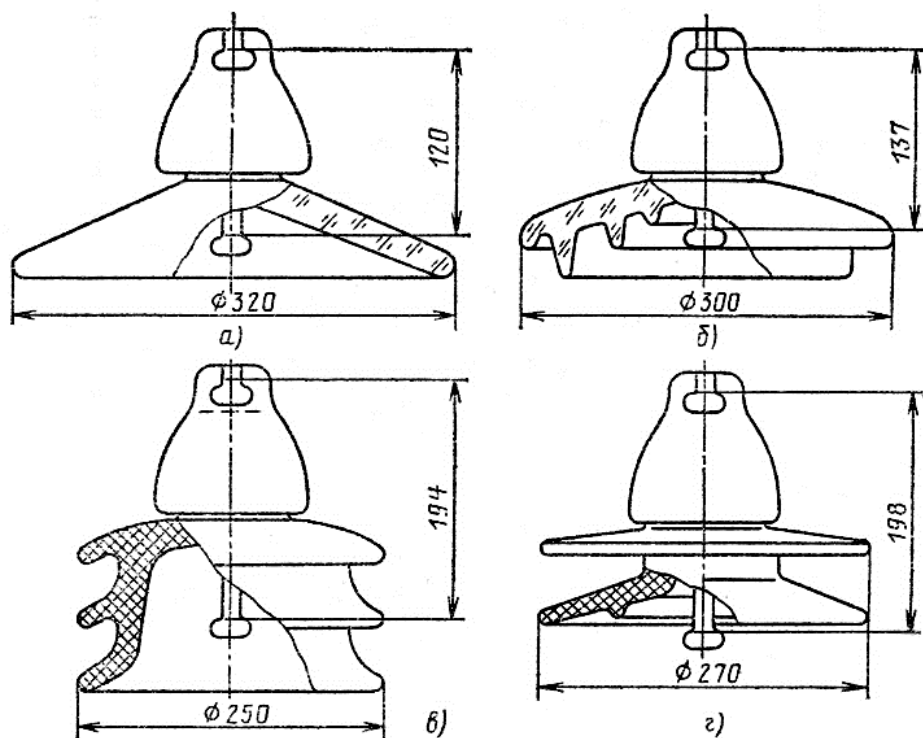


Рис. 3.3. Подвесные тарельчатые изоляторы: а – ПС70-В; б – ПСГ120-А; в – ПФГ50-А; г – ПФГ60 – А

Подвесной стержневой изолятор (рис. 3.4, а) представляет собой сплошную стержень из изоляционного материала (фарфор, ситаллы, стекло), армированный с обоих концов металлическими шапками с помощью цементной связки с применением демпферных прокладок.

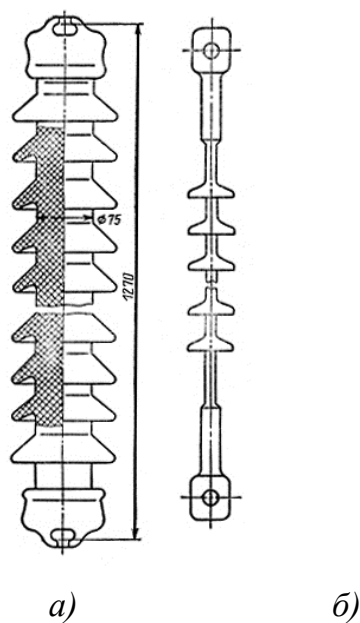


Рис. 3.4. Стержневой фарфоровый изолятор типа СФ-110/2,25 (а) и стеклопластиковый стержневой изолятор (б)

Технология изготовления таких изоляторов весьма проста, но трудно изготовить изолятор на большие разрушающие нагрузки, т. к. изоляционный материал (чаще используется фарфор) работает на разрыв.

Особенностью таких изоляторов является то, что они непробиваемы в отличие от тарельчатых изоляторов. Недостатком стержневых изоляторов является возможность их полного разрушения и падения провода на землю. В нашей стране такие изоляторы применяются, в основном, для оттяжек воздушных выключателей, а также в качестве фиксаторных изоляторов для электрифицированного железнодорожного транспорта. В последние годы разработаны стеклопластиковые длинностержневые изоляторы (гладкие и с ребрами на $U = 35 \dots 220$ кВ), которые имеют незначительный вес и обладают хорошей стойкостью к удару, в частности, к расстрелу из ружей (рис. 3.4,б).

Для защиты стеклопластикового стержня от образования науглероженных дорожек на поверхность изолятора наносится трекингостойкое покрытие из фторопласта или кремнийорганической резины.

Крепление фланцев производится путем опрессовки. Изоляторы могут использоваться как в качестве поддерживающих, так и натяжных изолирующих подвесок при рабочем напряжении 35-220 кВ.

Гирлянды изоляторов и выравнивающая арматура. На линиях 35 кВ и выше для обеспечения заданного изоляционного расстояния подвесные изоляторы тарельчатого типа соединяются в гирлянды. Строительная высота гирлянды (рис. 3.5)

$$H_{\Gamma} = n \cdot H, \quad (3.6)$$

где n – число элементов (изоляторов) в гирлянде; H – строительная высота изолятора. Благодаря шарнирному соединению изоляторов гирлянда приобретает гибкость, которая способствует снижению механических нагрузок на изоляторы при сильном ветре и обрыве провода.

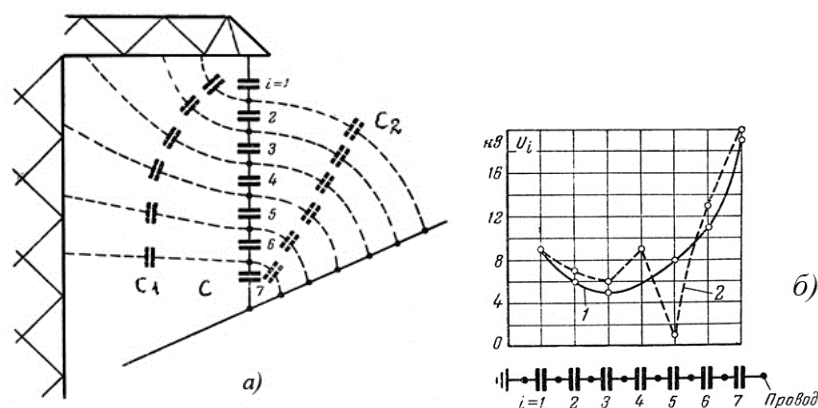


Рис. 3.5. Схема замещения гирлянды изоляторов (а) и диаграмма распределения напряжения по гирлянде

На промежуточных опорах используются поддерживающие гирлянды, воспринимающие вес прикрепленного провода, а на анкерных, угловых и кон-

цевых опорах – натяжные, которые воспринимают тяжесть провода. Гирлянду изоляторов можно представить в виде цепочки емкостей (рис. 3.5, а), где продольная емкость C имитирует емкость изолятора, а C_1 и C_2 – емкость изолятора на металлическую опору (землю) и на провод, соответственно. Поскольку частичные емкости изоляторов C_1 на землю больше, чем емкость на провод C_2 , распределение напряжения по изоляторам гирлянды неравномерно и наибольшее падение напряжения приходится на ближайшие от провода изоляторы (рис. 3.5, б).

Повышенное падение напряжения на изоляторах вблизи провода может приводить к коронированию, вызывающему старение изоляционного тела изолятора и окислительные процессы на металлической арматуре. Из опыта установлено, что по указанной причине максимальное напряжение на изоляторе не должно превышать 25...30 кВ. Для выравнивания распределения напряжения вдоль гирлянды на ЛЭП напряжением 220 кВ и выше применяется защитная арматура в виде колец, восьмерок, овалов, рогов. Но при $U_n \geq 750$ кВ защитная арматура не применяется, т. к. выравнивание напряжения вдоль гирлянды достигается за счет наличия расщепленных проводов в фазе и специальной («утопленной») подвески гирлянды, при которой провода фазы располагаются на уровне тарелки первого изолятора или выше.

Разрядное напряжение гирлянды подвесных изоляторов не представляет собой сумму разрядных характеристик отдельных элементов, т. к. разряд по гирлянде развивается несколько иначе, чем на отдельном элементе (рис. 3.6).

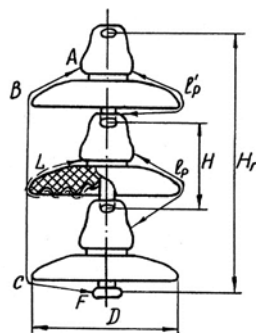


Рис. 3.6. Путь разряда и путь утечки подвесных изоляторов

Из рис. 3.6 видно, что путь разряда изолятора в гирлянде l_p несколько отличается от пути разряда одиночного изолятора l'_p и от длины пути утечки изолятора L . Разрядное напряжение гирлянды зависит от числа и типа изолятора, а также от наличия защитной арматуры. Для увеличения разрядного напряжения гирлянды на практике принимают $l_p/H \geq 1,3$. В этом случае разряд пойдет по пути АВСF, т.е. по воздуху. Выдерживаемое напряжение гирлянды в сухом состоянии ($U_{схв}$) при этом будет наибольшим.

Перспективные разработки в области линейной изоляции. В настоящее время в отечественной и зарубежной энергетике разрабатываются и успешно внедряются новые изоляционные конструкции на воздушных ЛЭП,

которые принципиально отличаются от традиционных конструкций, используемых в качестве изоляции линий электропередачи.

В ряде стран (Италия, ФРГ, СНГ и др.) используются изоляционные траверсы на основе стеклопластиков, которые позволяют отказаться от традиционно применяемых изоляторов и уменьшить массу и габариты опор.

Разновидностью изоляционных траверс являются траверсы из электроизоляционного бетона, разработанные в СибНИИЭ (г. Новосибирск). Траверсы различной формы (трехлучевая звезда, треугольная рама) крепятся на железобетонных опорах. В настоящее время линии с такими траверсами на 10, 35 и 110 кВ проходят опытную проверку.

Применение изоляционных траверс позволяет предотвратить гибель птиц от поражения электрическим током.

В связи с освоением сверхвысоких и ультравысоких напряжений все острее ставится вопрос о путях развития воздушных ЛЭП. Уже сейчас отдельные варианты ЛЭП на металлических опорах с подвесной изоляцией имеют габариты по высоте и ширине до 50 м и более, а масса опоры достигает более 20 тонн. Поэтому предлагается решение о замене подвесной изоляции на таких линиях опорной, т.е. изоляция каждой фазы и закрепление ее на определенном расстоянии от земли осуществляется с помощью отдельных изолирующих колонн (стоек) из электроизоляционного бетона. Для большей устойчивости «опора – изолятор» крепится к земле с помощью изоляционных растяжек.

Применение стеклопластиковых полых опор (Япония, США) позволяет увеличить срок годности стоек ЛЭП до 100 лет. Масса опоры при высоте 10,5 м составляет 60 кг.

3.3.2. Опорные изоляторы

Опорные изоляторы предназначены для механического крепления шин, проводов, деталей аппаратов и проводов, находящихся под различными потенциалами, и для изолирования их от заземленных конструкций и между собой в закрытых и открытых РУ.

В зависимости от условий работы опорные изоляторы бывают внутренней и наружной установки.

Опорные изоляторы внутренней установки. Изоляторы внутренней установки являются изоляторами стержневого типа, которые можно разделить на изоляторы с внутренней (рис. 3.7, а) и наружной (рис. 3.7, б) заделкой арматуры. Они изготавливаются из фарфора и применяются до напряжения 35 кВ.

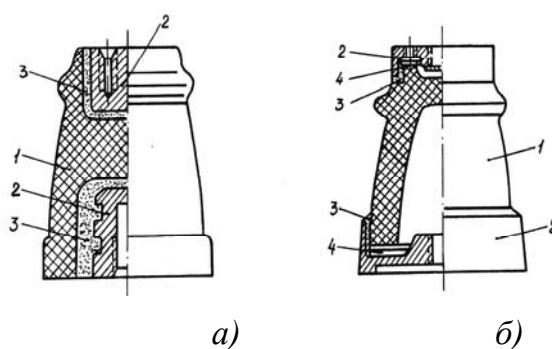


Рис. 3.7. Опорные стержневые изоляторы для внутренней установки: 1 – тело изолятора, 2 – металлическая арматура изолятора, 3 – цементно-песчанная заделка, 4 – прокладка

Арматура у изоляторов с внутренней заделкой выполняет роль внутреннего экрана. Внутренний экран и ребро увеличивают разрядное напряжение изолятора. Как наружная, так и внутренняя поверхности изолятора покрываются белой глазурью. Изоляторы с внутренней заделкой арматуры на 35...40 % меньше по высоте, чем изоляторы с наружной заделкой, они имеют меньшую массу фарфора и арматуры.

Опорные изоляторы наружной установки. Опорные изоляторы для наружной установки делятся на штыревые и стержневые. Основным материалом таких изоляторов является фарфор, но имеются штыревые изоляторы из стекла на напряжение 6-10 кВ и полимерных материалов.

Опорные изоляторы, предназначенные для наружной установки, имеют развитые ребра, существенно повышающие мокроразрядное напряжение. Форма ребер показана на рис. 3.8 а.

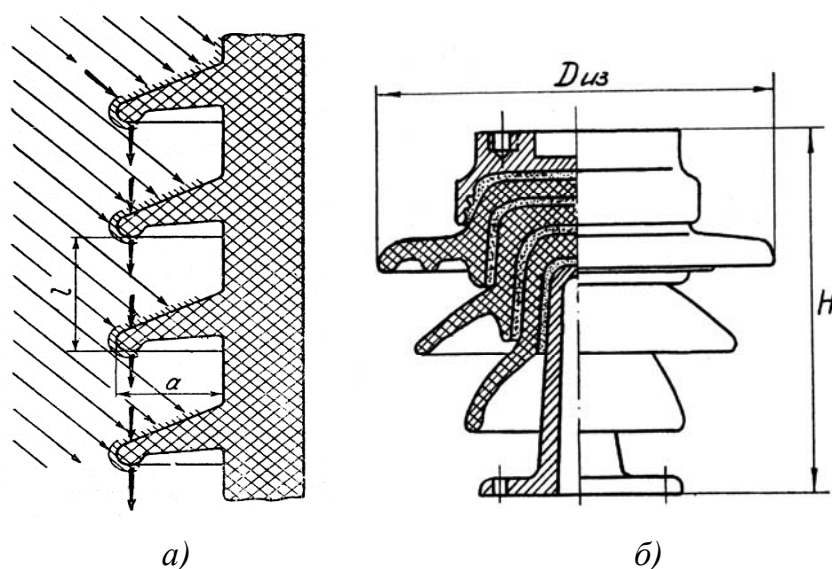


Рис. 3.8. Изоляторы для наружной установки: а – ребра опорных изоляторов наружной установки (a – вылет ребра изолятора, l – расстояние между ребрами); б – штыревой опорный изолятор наружной установки типа ОНШ-35 (H – высота изолятора, $D_{из}$ – диаметр изолятора)

Кромки ребер отогнуты книзу, образуя так называемую капельницу. Вода с капельницы скатывается, как показано на рисунке, жирными стрелками, оставляя сухой нижнюю поверхность ребер. При наклонном дожде верхние ребра частично защищают от влаги нижние ребра. Оптимальное соотношение между вылетом ребра a и расстоянием между ребрами l лежит в пределах $0,5 < \frac{a}{l} < 1,0$.

Штыревые опорные изоляторы. Такие изоляторы используются в тех случаях, когда требуется большая механическая прочность на изгиб, которая обеспечивается, в основном, штырем из стали 1 (Рис. 3.8, б). Изолятор состоит из изоляционной детали 2, которая с помощью цементной связки 4 скрепляется с металлической арматурой – штырем и колпачком или шапкой 3. Изолирующая деталь опорных штыревых изоляторов на напряжение 6-10 кВ выполняется одноэлементной, а на напряжение 35 кВ – двух – или трехэлементной (рис. 3.8, б).

В установках на напряжение 110 кВ и выше используются колонки, состоящие из нескольких, установленных друг на друга, опорных изоляторов на 35 кВ.

Стержневые опорные изоляторы. На напряжение 35 кВ и выше применяются опорные изоляторы в виде сплошных фарфоровых стержней (рис. 3.9, а).

Такие изоляторы являются практически непробиваемыми, и поэтому для них отсутствует расчет электрической прочности фарфора. Выбор числа ребер ведется по формуле $n = 1,5 \div +0,065 U_n$, шт. (U_n – номинальное напряжение, кВ). С учетом загрязнения атмосферы число ребер может быть увеличено. Между вылетом ребра a и расстоянием l желательно выдерживать соотношение $a \approx 0,5 l$.

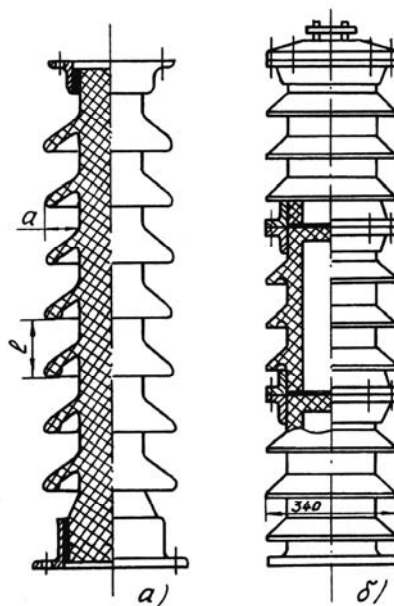


Рис. 3.9. Эскизы опорно-стержневых изоляторов: а – сплошной стержневой типа ОНС; б – колонка из пустотелых стержневых изоляторов типа КО

На $U \geq 110$ кВ собираются колонки из отдельных пустотелых стержневых изоляторов (рис. 3.9, б).

Для предупреждения возникновения разрядов в полости изоляторы, собираемые в колонки, изготавливают с фарфоровыми перегородками. Иногда внутренние полости заполняются трансформаторным маслом, компаундом или газом.

Отечественная промышленность освоила выпуск стержневых опорных изоляторов до 110 кВ из комбинированной полимерной изоляции, состоящей из стеклопластикового цилиндра с оребренным покрытием из кремнийорганической резины.

В приложении П4 даны примеры полимерных подвесных и опорных изоляторов на напряжение 35 кВ и 220 кВ.

На напряжение 500 кВ и выше для одиночных опорных колонок требуются изоляторы весьма высокой механической прочности, изготовление которых представляет большие трудности. В связи с этим в установках напряжением 500 кВ и выше применяются опорные конструкции, состоящие из нескольких параллельных колонок опорных изоляторов.

Обычно применяются конструкции с тремя колонками, образующими конусообразный треножник.

В основании, на верхушке и в середине по высоте треножник укрепляется на рамах, скрепляющих все три колонки. Изоляторы в таких конструкциях испытывают механические усилия не только на изгиб, но и на растяжение и сжатие.

За рубежом с целью увеличения механической прочности на изгиб разработаны изоляторы типа «Мультикон», представляющие собой изолирующие колпачки, поставленные друг на друга и склеенные между собой (рис. 3.10). Эти изоляторы достаточно сложны и дороги.

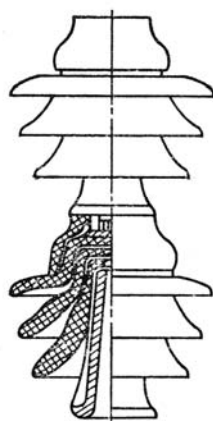


Рис. 3.10. Опорный изолятор типа «Мультикон»

В АОТ "СибНИИЭ" разработаны опорные конструкции из электроизоляционного бетона для конденсаторных батарей на подстанциях 110 и 500 кВ, что позволяет существенно снизить капитальные затраты при строительстве.

3.3.3. Проходные изоляторы

Проходные изоляторы (вводы) применяются для изолирования и механического крепления токоведущих частей (шин, проводов), проходящих сквозь заземленные крышки аппаратов, перегородки, стены распределительных устройств и т. д. Поэтому проходные изоляторы должны обладать достаточной электрической и механической прочностью и обеспечивать пропускание тока определенной величины.

Высоковольтные проходные изоляторы, предназначенные для работы при напряжении выше 35 кВ, называются вводами.

Проходные изоляторы (в частности, вводы в высоковольтных аппаратах и конструкциях) в отличие от других типов изоляторов имеют неблагоприятное расположение электродов (рис. 3.11), при котором радиальная (нормальная) составляющая напряженности электрического поля E_N вблизи фланца намного превосходит тангенциальную составляющую E_τ , что приводит к крайне неравномерному распределению поля и резкому снижению разрядных напряжений.

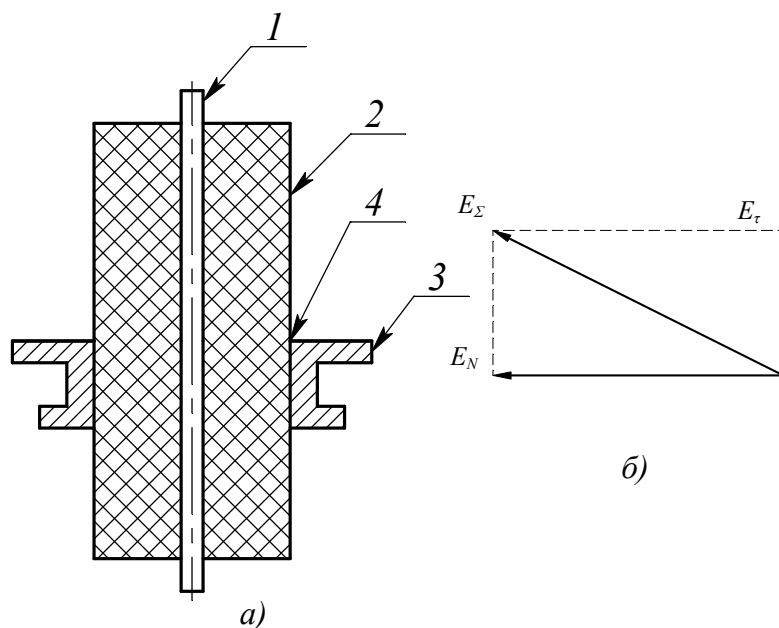


Рис. 3.11. а – эскиз проходного изолятора, б – векторная диаграмма напряженностей в т. 4: 1 – токоведущий стержень, 2 – изолятор, 3 – фланец, 4 – точка с максимальной напряженностью

Проходные изоляторы изготавливают для внутренней и наружной установок, поэтому последние должны быть рассчитаны на мокроразрядное напряжение. Различают проходные изоляторы со сплошной фарфоровой изоляцией и изоляторы с полостью, которая может быть заполнена газом (воздухом), минеральным маслом или компаундом.

Проходной изолятор со сплошной фарфоровой изоляцией (рис. 3.12) состоит из фарфорового элемента 1, внутри которого проходит стержень (шина) 2, двух фланцев (колпачков) 3 на концах изолятора для крепления токоведущей

части и опорного фланца 4, служащего для механического крепления изолятора к конструкции аппарата или стенки распределительного устройства, через которую осуществляется ввод высокого напряжения. Опорный фланец соединяется с фарфором с помощью цементной связки 5. Между колпачком и фарфором помещаются амортизирующие картонные прокладки и уплотнения.

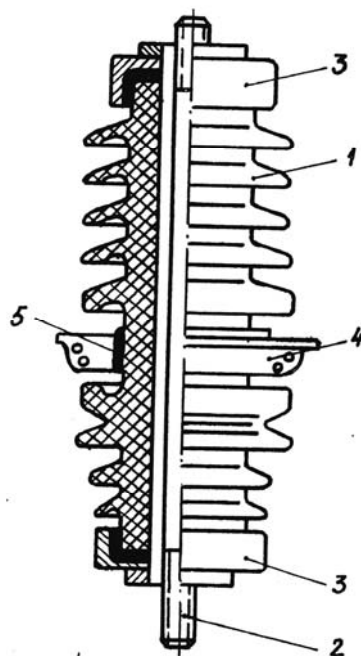


Рис. 3.12. Проходной изолятор из фарфора со сплошной изоляцией: 1 – фарфоровый изолятор, 2 – токопроводящий стержень, 3 – фланец высокого напряжения, 4 – фланец для крепления изолятора (опорный фланец), 5 – уплотняющая прокладка

Изоляторы для наружной установки имеют ребристую поверхность, а для внутренней – гладкую или волнистую. Для увеличения сухоразрядного напряжения опорный (средний) фланец экранируют ребрами, обращенными к фланцу, с металлизированной поверхностью, электрически соединенной с металлическим фланцем. Применение промежуточных ребер также позволяет повысить разрядные напряжения.

Нижняя часть аппаратных изоляторов помещается в масло, имеет гладкую поверхность и приблизительно вдвое короче воздушной (наружной) части.

Для исключения ионизационных процессов в воздушном зазоре между токоведущим стержнем и внутренней стенкой изолятора последняя может металлизироваться и соединяться с токоведущим стержнем.

Расчет сплошных фарфоровых проходных изоляторов ведется в направлении определения толщины стенки изолятора, обеспечивающей необходимый запас электрической и механической прочности при заданных воздействующих факторах. Наиболее часто сплошные фарфоровые изоляторы применяются на напряжение 6-10 кВ.

Проходные изоляторы с полостью находят применение в установках напряжением до 35 кВ. С точки зрения электрической прочности наиболее слабым местом такого изолятора (рис. 3.13) является полость, заполненная газом, маслом или компаундом.

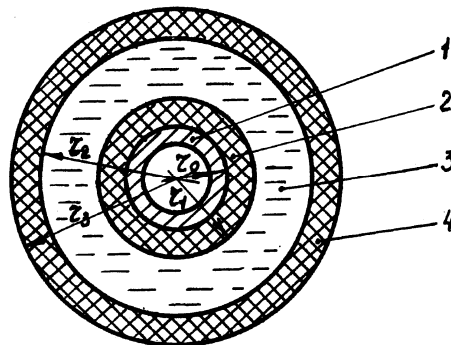


Рис. 3.13. Сечение проходного изолятора с полостью: 1 – токоведущий стержень (труба); 2 – изоляционное покрытие; 3 – полость; 4 – фарфор

Пробой полости ведет к полному пробое изолятора. Поэтому максимальная напряженность поля в полости изолятора не должна превышать допустимых значений для выбранной среды, т.е. $E_{\max} \leq E_{\text{доп}}$, при этом $E_{\text{доп}}$ должна быть меньше пробивной напряженности полости $E_{\text{пр}}$.

3.3.4. Высоковольтные вводы

При напряжении выше 35 кВ применяются вводы с маслобарьерной, бумажно-бакелитовой и конденсаторной бумажно-масляной внутренней изоляцией. Наружной изоляцией таких вводов являются фарфоровые покрышки, в которые помещаются остовы вводов. В последнее время для комплектных распределительных устройств выпускаются вводы с элегазовой изоляцией на напряжение 110-220 кВ.

Маслобарьерные вводы (МБВ). МБВ являются устаревшими конструкциями и применяются в энергетических установках на напряжение до 400 кВ. Конструктивное исполнение вводов с маслобарьерной изоляцией показано на рис. 3.14.

Основной изоляцией таких вводов является трансформаторное масло, в котором между токоведущим стержнем и фланцем расположены бумажно-бакелитовые цилиндры с конденсаторными обкладками из медной или алюминиевой фольги толщиной 0,01...0,015 мм, с бумажным покрытием толщиной до 3...5 мм. Применение конденсаторных обкладок позволяет выравнивать поле как в радиальном, так и в аксиальном направлениях при соответствующем законе изменения длины и радиуса обкладок. Изоляционные цилиндры крепятся с помощью дистанционных распорок из дерева (красного бука) или пластмассы. Трансформаторное масло, циркулируя в кольцевых зазорах (толщиной 2-5 см) между барьерами, охлаждает токоведущий стержень и способствует отводу тепла от изоляционных перегородок.

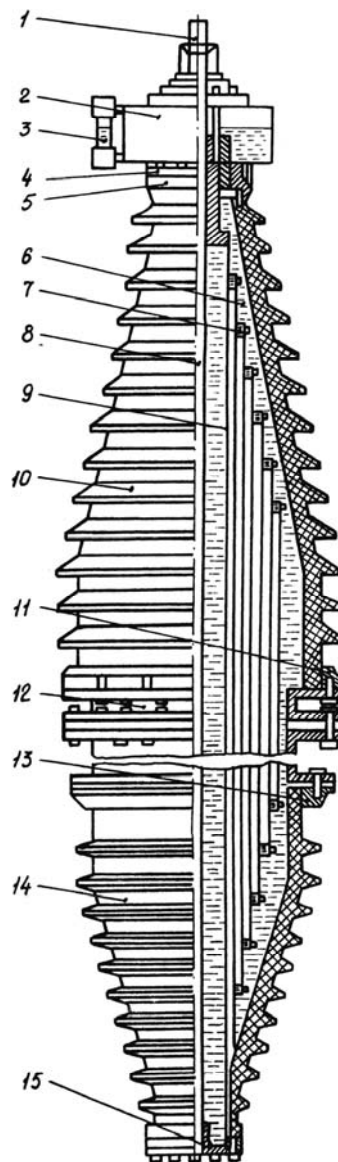


Рис. 3.14. Маслобарьерный ввод на напряжение 220 кВ: 1 – токовый зажим; 2 – расширитель; 3- указатель уровня масла; 4 – поддон; 5 – фланец; 6 – трансформаторное масло; 7– распорки дистанционные; 8 – токоведущий стержень; 9 – бумажно-бакелитовые цилиндры; 10 – крышка верхняя; 11 – фланец; 12 – соединительная втулка; 13 – фланец; 14 – крышка нижняя; 15 – стакан

Ввод снабжен расширителем и указателем уровня масла. МБВ отличаются высокой надежностью, но имеют большие габариты из-за относительно больших масляных зазоров между цилиндрическими барьерами. В зависимости от толщины масляного канала и размеров конденсаторных обкладок допустимые напряженности в масле не должны превышать 40...65 кВ/см.

Диаметр токоведущего стержня (трубы) и его сечение должны обеспечить необходимую величину максимальной напряженности на стержне ($E_{\max} \leq E_{\text{доп}}$) и пропускание тока заданной величины с учетом допустимой плотности тока.

Вводы конденсаторного типа. Применение во вводах маслобарьерной изоляции дало возможность повысить их электрическую прочность, но габариты вводов остаются значительными, что существенно затрудняет их использование при напряжении 220-500 кВ и выше. Поэтому на высших классах напряжения применяются технически более совершенные вводы конденсаторного типа, к которым относятся бумажно-бакелитовые и бумажно-масляные конденсаторные вводы. В качестве основной изоляции в бумажно-бакелитовых вводах (вводы с твердой изоляцией) используется бакелизированная бумага толщиной 0,06 мм, которая наматывается на токоведущий стержень или трубу в горячем состоянии при температуре до 160 °С.

Между слоями бумаги через определенные промежутки закладываются уравнивающие обкладки из алюминиевой фольги. Полученная втулка запекается, концы остова обтачиваются на станке с целью придания изолятору определенной формы (чаще конусной), а затем поверхность изоляционного остова покрывается влагостойким лаком (рис. 3.15). Такие вводы отличаются простотой изготовления, компактностью, высокой механической прочностью.

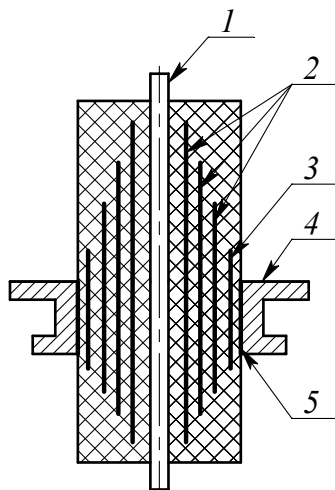


Рис. 3.15. Конденсаторный бумажно-бакелитовый ввод для внутренней установки: 1 – токоведущий стержень; 2 – конденсаторные обкладки; 3 – бакелизированная бумага; 4 – металлический фланец; 5 – цементная заделка

К недостаткам их следует отнести гигроскопичность изоляции, вследствие чего она может отсыревать из-за растрескивания лака, низкую трекинговую стойкость, возможность теплового пробоя.

Бумажно-бакелитовые изоляторы для наружной установки помещают в фарфоровые крышки, а пространство между крышкой и изоляционным остовом заливают специальной мастикой. Если нижняя часть ввода работает в масле (трансформаторы, масляные выключатели), то нижняя фарфоровая крышка отсутствует. В этом случае нижняя часть изолятора короче наружной.

Московский завод «Изолятор» выпускает вводы с бумажно-бакелитовой изоляцией до 500 кВ (RIP-изоляция: англ. resin impregnated paper – бумага пропитанная смолой). В последние годы это предприятие выпускает кремнийорганические вводы типа ГТПВ–35/1000 с полимерной внешней изоляцией

(рис. 3.16). Внешняя изоляция (покрышка) изготовлена из трекингостойкой силиконовой резины в грязестойком исполнении. Покрышка на 35 кВ имеет 7 тонких ребер. Тонкие гибкие ребра позволяют выдерживать большие ударные механические нагрузки за счет их эластичности.

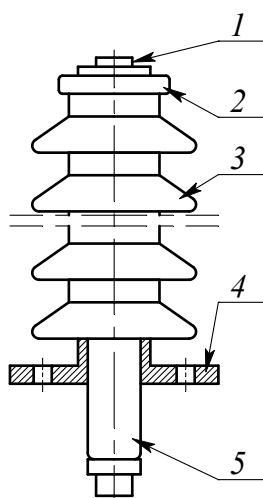


Рис. 3.16. Бакелитовый ввод с полимерной крышкой: 1 – токоведущий стержень; 2 – верхний колпачок; 3 – крышка из силиконовой резины (верхняя часть изолятора); 4 – средний фланец; 5 – нижняя (масляная) часть изолятора

В настоящее время широкое распространение получили наиболее совершенные вводы с конденсаторной бумажно-масляной изоляцией. В данной конструкции ввода на токоведущий стержень (трубу) или на бумажно-бакелитовый цилиндр наматывается кабельная бумага марки КВ-120 шириной 100...150 мм по способу спиральной намотки с положительным перекрытием. Через определенные промежутки между слоями бумаги закладываются конденсаторные обкладки из перфорированной алюминиевой фольги толщиной 0,01 мм.

При более совершенной технологии применяется намотка в два слоя бумаги: одного – чистого, а другого – с печатным металлическим покрытием. Затем производится тщательная вакуумная сушка остова ввода и последующая пропитка дегазированным трансформаторным маслом. Изоляционный остов ввода помещается в фарфоровые чехлы (верхняя и нижняя крышки), залитые трансформаторным маслом. Для соединения верхней и нижней частей ввода используется металлическая соединительная втулка.

В верхней части ввода (рис. 3.17) к фланцу крепится маслорасширитель с указателем уровня масла, который может снабжаться гидрозатвором для предотвращения увлажнения масла.

Современные конструкции вводов выполняются герметичными, что позволяет избежать увлажнения и окисления масла атмосферным воздухом. Такие вводы имеют встроенные (вводы 110-220 кВ) или выносные (вводы 220 кВ и выше) баки давления (компенсаторы), которые соединяются медным трубопроводом длиной 3...6 м с внутренней полостью ввода через соединительную втулку.

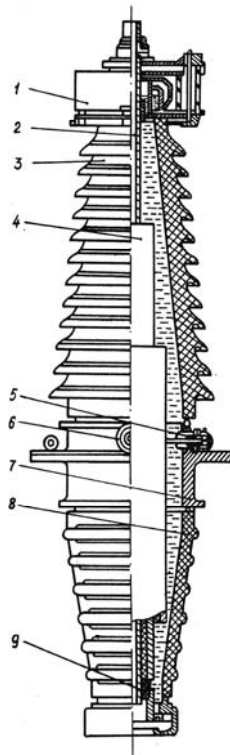


Рис. 3.17. Конденсаторный бумажно-масляный ввод типа БМТ- 110/630: 1 – расширитель с гидрозатвором; 2 – токоведущая труба; 3 – верхняя крышка; 4 – изоляционный остов; 5 – измерительный ввод; 6 – маслоотборник; 7 – соединительная втулка; 8 – нижняя крышка; 9 – стакан

В последние годы завод «Изолятор» освоил выпуск новых трансформаторных вводов на 330-500 кВ с компенсатором давления в верхней части ввода.

Некоторые маслонаполненные вводы снабжены приспособлением для измерения напряжения (ПИН). Для присоединения ПИН используются две уравнивательные обкладки сердечника – последняя заземленная и предпоследняя, которая присоединяется к выводу ПИН. Эти две обкладки ввода образуют низковольтное плечо емкостного делителя. В современных конструкциях вводов вывод для присоединения ПИН может быть использован для измерения $tg \delta$ и емкости ввода. Для контроля качества масла вводы имеют маслоотборное устройство, расположенное на соединительной втулке.

Фарфоровые крышки ввода конструируются таким образом, чтобы получить наибольшее значение разрядных напряжений в эксплуатационных условиях.

Изготовление вводов с бумажно-масляной изоляцией является сложным процессом и требует большой тщательности. ЗАО «АББ Электроизолит Бушинг» освоило выпуск высоковольтных вводов (по швейцарской технологии) с твердой RIP-изоляцией на $U = 500$ кВ, $I_n = 800 \dots 2500$ А (абсолютно сухие) с заполнением компаундом типа «Микагель».

RIP-изоляция изготовлена на основе бумаги, пропитанной в вакууме эпоксидным компаундом. Такая изоляция сочетает в себе высокие диэлектрические характеристики, присущие бумажно-масляной изоляции, и удобство в эксплуа-

тации, характерное для твердой изоляции. RIP-изоляция обладает высокой термической и механической стойкостью. Недостатком вводов с RIP-изоляцией является их достаточно высокая стоимость по сравнению с бумажно-масляными вводами (OIP-изоляция: oil impregnated paper).

Вводы с элегазовой изоляцией. Применение высокопрочных газов в качестве электрической изоляции позволяет существенно упростить конструкцию вводов и уменьшить их массу и габариты. Газ, используемый в качестве внутренней изоляции, должен обладать не только высокой электрической прочностью, но и достаточной термической стойкостью, малой токсичностью, стойкостью к электрическим разрядам, низкой температурой сжижения, приемлемой стоимостью. Конструкция ввода с газовой изоляцией приведена на рис. 3.18.

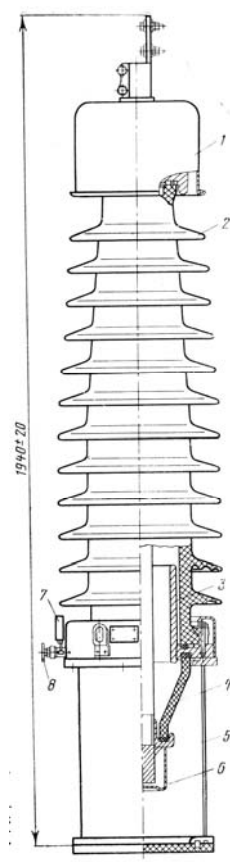


Рис. 3.18. Газонаполненный ввод на напряжение 110 кВ: 1 – защитный кожух; 2 – верхняя фарфоровая крышка; 3 – экран внутренний; 4 – нижняя изолирующая крышка; 5 – защитный кожух; 6 – экран наружный; 7 – манометр; 8 – вентиль

Наиболее полно указанным требованиям отвечает элегаз (SF_6 – шестифтористая сера). Элегаз прочнее воздуха в 2,3...2,6 раза и не разлагается по действием воды, кислот, щелочей. По своей инертности элегаз близок к химически чистому азоту. Для снижения стоимости изделий с элегазовой изоляцией в ряде случаев используют смесь элегаза с азотом. Элегаз рекомендуется применять только в однородном или слабонеоднородном электрических полях, т.к. при ионизационных процессах наблюдается разложение элегаза с образованием весьма опасных необратимых соединений.

Отечественной промышленностью разработаны вводы с элегазовой изоляцией, предназначенные для установок в КРУ (рис. 3.18) на напряжение 110-220 кВ.

3.4. Изоляция силовых конденсаторов

Общие сведения. Силовые конденсаторы используются в цепях электро-энергетических установок, где осуществляется преобразование и передача больших мощностей или накопление больших количеств энергии. Они применяются в силовой электротехнике, для улучшения коэффициента мощности, в технике связи, в импульсной технике, в ядерных исследованиях, в электроразрядных и плазменных технологиях.

Расчет конденсатора заключается в том, чтобы по заданным значениям электрических характеристик определить наиболее оптимальные размеры и срок службы конденсатора.

3.4.1. Расчет емкости конденсаторов.

Отношение заряда Q , накопленного на пластинах, к напряжению U , приложенному к ним, называют емкостью конденсатора

$$C = \frac{Q}{U}, (\Phi) \quad (3.7)$$

где Q – в Кл, U – в В.

На практике часто пользуются единицами меньшими, чем фарада ($1 \Phi = 10^6 \text{ мк}\Phi = 10^{12} \text{ мкмк}\Phi$ (пФ)).

Емкость плоского конденсатора (рис. 3.19, а) можно определить из формулы

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{d}, \Phi \quad (3.8)$$

где S – активная площадь обкладок ($S = b \cdot l$), см²; d – толщина диэлектрика, см; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/см; b и l – ширина и длина обкладки, см.

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11}} = 0,00885 \cdot 10^{-11} \text{ Ф/см.} \quad (3.9)$$

Емкость цилиндрического конденсатора (рис. 3.19, б) определяется по формуле

$$C = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \varepsilon \cdot l}{\ln \frac{R_2}{R_1}}, \Phi \quad (3.10)$$

где l – активная длина обкладок, см; R_1, R_2 – внутренний и наружный радиусы электродов соответственно, см.

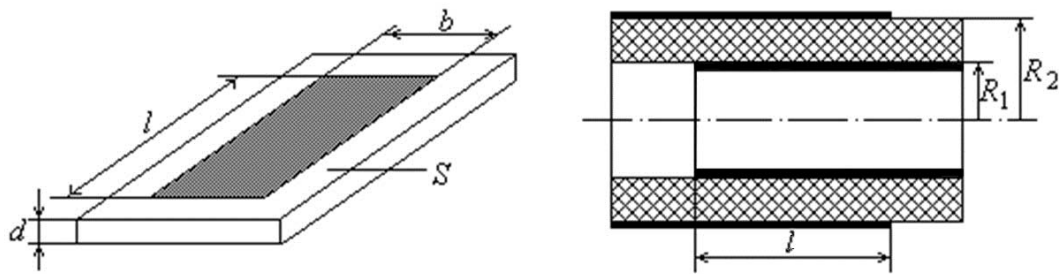


Рис. 3.19. К определению емкости конденсатора: а – плоский конденсатор; б – цилиндрический конденсатор

При использовании тонких диэлектриков, поставляемых в рулонах (конденсаторная бумага, пленки), для получения больших значений емкости применяется спиральная намотка (рис. 3.20). В этом случае работают обе ленты диэлектрика и емкость конденсатора

$$C = 2 \cdot 0,0885 \cdot \frac{\varepsilon \cdot S}{d} = 0,177 \cdot \frac{\varepsilon \cdot b \cdot l}{d}, (n\Phi) \quad (3.11)$$

где b и l – ширина и длина фольги, см; d – толщина диэлектрика, см.

Применение секций со спиральной намоткой позволяет значительно сократить расход алюминиевой фольги при производстве конденсаторов. Секции наматывают на специальных станках либо на цилиндрическую оправку и после снятия с оправки прессуют (плоскопрессованная секция), либо на жесткий изоляционный цилиндр (цилиндрическая секция).

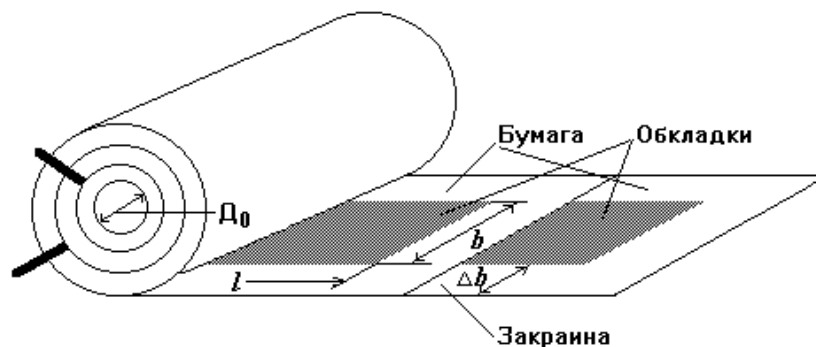


Рис. 3.20. Эскиз секции со спиральной намоткой: D_0 – диаметр оправки; Δb – ширина закраины

3.4.2. Характеристики основных материалов, применяемых

в высоковольтных конденсаторах

В технике сильных токов и высоких напряжений, а также в энергетических установках для повышения коэффициента мощности используются конденсаторы с бумажной изоляцией, пропитанной минеральным (конденсаторным) маслом, жидкостями растительного происхождения (касторовое масло – для импульсных конденсаторов) или синтетическими жидкостями (совол, совтол, трихлордифенил, фенилксилиэтан и др.).

Достоинствами хлорированных дефинилов (совол, совтол, трихлордифенилов) являются более высокие ϵ , повышенная стойкость к воздействию частичных разрядов, негорючесть. Однако эти жидкости являются токсичными и экологически опасными. Поэтому масштабы применения хлорированных дефинилов сокращаются и их заменяют на более безопасные жидкости (дибутилфталат, фенилксилилэтан и др.).

Для изготовления таких конденсаторов обычно используется конденсаторная бумага. Конденсаторная бумага отличается весьма малой толщиной (5...30 мкм), высокой плотностью и небольшим содержанием неорганических загрязнений. Отечественная бумага выпускается двух видов: обычная конденсаторная бумага – КОН и бумага с улучшенными диэлектрическими свойствами – СИЛКОН. Обычную бумагу изготавливают двух марок по плотности: КОН-I ($\epsilon = 2,2$) плотностью 1 г/см³ и КОН-II ($\epsilon = 2,9$) плотностью 1,2 г/см³. Улучшенная бумага СИЛКОН имеет плотность 0,8; 1,0 и 1,2 г/см³.

В последнее время для улучшения характеристик диэлектрика (повышения электрической прочности и напряжения начала частичных разрядов, уменьшения диэлектрических потерь) используют комбинированную бумажно-пленочную изоляцию. В этом случае бумажные слои выполняют роль фитиля, который втягивает пропитывающую жидкость в прослойки между пленками и обеспечивает хорошую пропитку и отсутствие газовых включений в изоляции.

Из полимерных пленок для конденсаторов промышленной и повышенной частоты (до 10 кГц) применяется полипропиленовая пленка ($E_{пр} = 180-190$ кВ/мм; $\text{tg } \delta = (2-3) \cdot 10^{-4}$; $\epsilon = 2,25$) и для импульсных конденсаторов – полиэтиленерефлатная (лавсановая) пленка ($E_{пр} = 160$ кВ/мм; $\text{tg } \delta = (4...20) \cdot 10^{-3}$; $\epsilon = 3,2$).

В качестве обкладок в конденсаторах чаще всего используется металлическая фольга из алюминия толщиной $d_{\phi} = 7...12$ мкм. Для переемычек между секциями и для выводов конденсатора применяется медная фольга толщиной 0,3...0,5 мм.

Для изготовления щек, хомутов и корпусов конденсаторов используют отожженную и протравленную (для удаления окалины) тонколистовую сталь толщиной 1...2 мм, называемую декапированной.

Для изготовления конденсаторов в изоляционном корпусе используется фарфор, бакелит, винипласт, стеклопластик и другие материалы.

3.4.3. Основы электрического расчета косинусных конденсаторов

Электрический расчет конденсаторов сводится к нахождению допустимых значений напряженности при длительном ($E_{\text{раб}}$) и кратковременном ($E_{\text{исп}}$) воздействии напряжения.

Затем определяется два значения толщины диэлектрика

$$d_1 = \frac{U_{\text{раб}}}{E_{\text{раб}}} \text{ и } d_2 = \frac{U_{\text{исп}}}{E_{\text{исп}}} \quad (3.12)$$

и выбирается наибольшее.

В большинстве случаев расчет ведут на длительную работу конденсатора, т.е. определяют $E_{\text{раб}}$, по нему находят толщину диэлектрика, а затем определяют испытательную напряженность $E_{\text{исп}}$, соответствующую данной толщине и заданному испытательному напряжению $U_{\text{исп}}$.

$$E_{\text{исп}} = K_1 \cdot E_{\text{раб}}, \quad (3.13)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий невыявленные дефекты при кратковременном испытании диэлектрика конденсатора ($K_1 = 1,5 \dots 3,0$).

Следует иметь в виду, что электрическая прочность слоистой изоляции зависит от толщины или числа листов в диэлектрике (рис. 3.21). При малых толщинах $E_{\text{пр}}$ увеличивается с ростом числа слоев изоляции вследствие перекрытия «слабых мест» прочными слоями изоляции, а затем с дальнейшим ростом толщины изоляции диэлектриков начинает проявляться краевой эффект и $E_{\text{пр}}$ снижается. Вследствие изложенного механизма $E_{\text{пр}} = f(d)$ имеет максимум при определенной толщине изоляции секции $d_{\text{опт}}$.

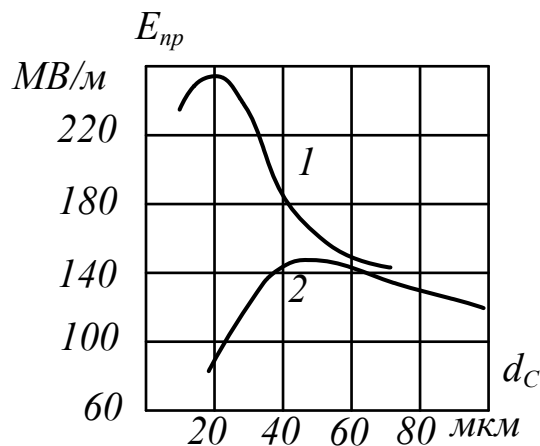


Рис. 3.21. Зависимость пробивной напряженности бумажного (1) и бумажно-пленочного (2) диэлектриков от толщины изоляции (пропитка трихлордифенилом)

Обычно толщина бумажного диэлектрика составляет 50...60 мкм (5-6 слоев бумаги при толщине листа 10 мкм), а толщина бумажно-пленочного

диэлектрика составляет 25...35 мкм. Рабочее напряжение секции конденсатора определяется по формуле

$$U_{\text{раб}_c} = E_{\text{раб}} \cdot d_c, \quad (3.14)$$

где d_c – толщина изоляции в секции.

Секции выполняются либо со скрытой (рис. 3.22, а), либо с выступающей (рис. 3.22, б) фольгой.

Конструкция с выступающей фольгой применяется для улучшения теплоотвода, а в некоторых случаях – для уменьшения индуктивности импульсных конденсаторов. Выбрав высоту секции h_c ($h_c = 8 \div 15$ мм), можно найти число витков при намотке секции

$$n = \frac{h_c}{4(d_c + d_\phi)}, \quad (3.15)$$

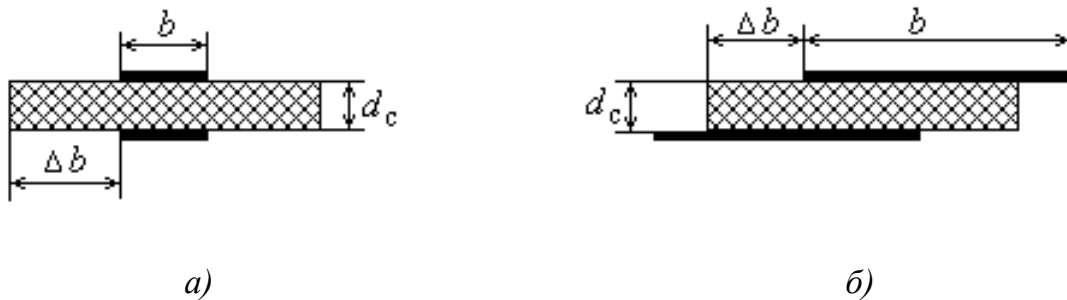


Рис. 3.22. Способы намотки конденсаторных секций: а – для конструкции со скрытой фольгой, б – для конструкции с выступающей фольгой

Зная габаритные размеры секции, легко определить габаритные размеры пакета секции конденсатора и корпуса конденсатора в целом.

Для конденсаторов, работающих в условиях повышенного тепловыделения в активном диэлектрике (косинусные конденсаторы, конденсаторы для электротермических установок, импульсные конденсаторы с большой частотой следования импульсов и др.), необходимо провести тепловой расчет с целью определения температуры нагрева его по отношению к температуре окружающей среды.

Для конденсаторов с бумажно-масляной изоляцией максимально допустимая температура составляет 65...70 °С, а для конденсаторов с пропиткой хлордифенилом или касторовым маслом – 90...95 °С, что соответствует максимально допустимому перепаду температуры между центральной точкой пакета секций t_{max} и окружающей средой 25...30 °С и 50...55 °С соответственно при температуре окружающей среды $t_0 = 40$ °С.

3.5. Изоляция трансформаторов высокого напряжения

Главной (поперечной) изоляцией является изоляция между обмотками высокого и низкого напряжения, а также между обмотками и сердечником магнитопровода, ярмом и металлическим баком трансформатора.

Витковой (продольной) изоляцией называется изоляция между витками катушек данной обмотки, изоляция между катушками и слоями.

Для трансформаторов наружной установки следует различать внешнюю и внутреннюю изоляцию. Внешняя изоляция (воздушные промежутки между выводами и баком, между выводами различных фаз, а также вдоль фарфоровых покрышек вводов) выбирается по мокроразрядному и импульсному разрядному напряжению, а внутренняя изоляция выбирается с запасом прочности по отношению к внешней изоляции ($K_{\text{зап}} = 1,2$), чтобы не происходило ее повреждения при воздействии сухоразрядного напряжения внешней изоляции.

В главной изоляции трансформаторов используются: трансформаторное масло, электрокартон (листовой, рулонный), гетинакс, текстолит, дельта-древесина. В газонаполненных трансформаторах используются высокопрочные газы.

Для межслоевой и витковой изоляции используют кабельную и телефонную бумагу, пропитанную маслом, различные виды лакотканей (хлопчатобумажные, шелковые, киперные). Широко применяется эмалевая изоляция, а также стекловолокно, пропитанное кремнийорганическими лаками, эпоксидная смола.

3.5.1. Изоляция трансформаторов тока

Трансформаторы тока служат для преобразования измеряемого тока до величины, допускающей подключение измерительных приборов и аппаратов защиты.

В зависимости от номинальных параметров, конструктивного исполнения и места установки можно выделить следующие типы трансформаторов тока: катушечные, втулочные, проходные, шинные, баковые (звеньевые). Перечисленные трансформаторы, кроме звеньевых, изготавливаются в сухом исполнении до 20 кВ. Главная изоляция таких трансформаторов тока представляет из себя чередующиеся слои фарфора и воздуха. Для усиления изоляции производится установка специальных изоляционных барьеров. Большое распространение получили сухие трансформаторы тока с литой и прессованной изоляцией.

Применение такой изоляции позволяет изготавливать трансформаторы тока на напряжение 110 кВ и выше. Для улучшения распределения напряжения в конструкции трансформатора тока используются конденсаторные обкладки. Трансформаторы тока с литой и прессованной изоляцией имеют меньшие габариты, хороший товарный вид.

Для наружной установки на напряжение 35-500 кВ применяются трансформаторы тока типа ТФН звеньевое типа с бумажно-масляной изоляцией в фарфоровом корпусе (рис. 3.23).

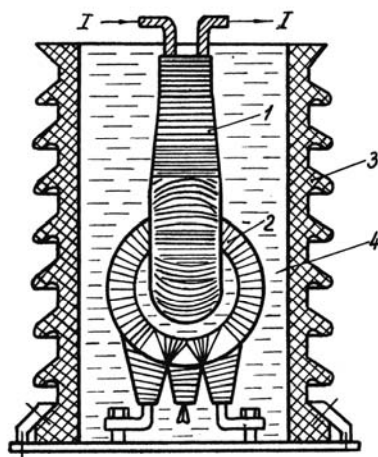


Рис. 3.23. Трансформатор тока звеньевое типа: 1 – первичная обмотка; 2 – вторичная обмотка; 3 – корпус; 4 – трансформаторное масло

Главная изоляция таких трансформаторов называется двухступенчатой (на каждую обмотку накладывается половина расчетной толщины изоляции), что позволяет улучшить условия теплоотвода и повысить устойчивость изоляции к тепловому пробую.

На напряжение выше 220 кВ трансформаторы тока звеньевое типа изготавливаются в виде каскада (рис. 3.24) из нескольких (обычно не более двух) трансформаторов, каждый из которых рассчитан на меньшее номинальное напряжение.

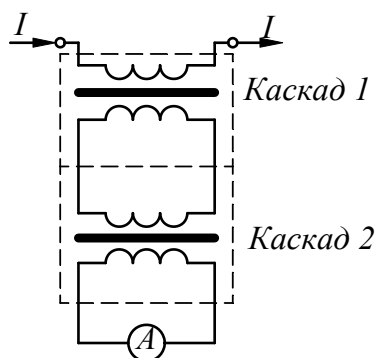


Рис. 3.24. Каскадное соединение трансформаторов тока

Эффективным способом уменьшения габаритов, расхода материалов и веса трансформатора тока на высокие напряжения (110-500 кВ) является применение одноступенчатой бумажно-масляной конденсаторной изоляции. Определение толщины бумажной изоляции ведется аналогично расчету вводов с конденсаторной бумажно-масляной изоляцией. В качестве первичной обмотки таких трансформаторов используется кабель с бумажной изоляцией и конденсаторными обкладками.

3.5.2. Изоляция трансформаторов напряжения

Трансформаторы напряжения предназначены для преобразования высокого напряжения сети до величины, позволяющей производить измерение обычными измерительными приборами.

Трансформаторы напряжения могут быть в сухом (воздушная, газовая, литая изоляция) и масляном исполнении.

При напряжении выше 35 кВ используются каскадные схемы соединения по типу каскадных трансформаторов тока. В трансформаторах напряжения на 6-35 кВ главной изоляцией является масло в сочетании с цилиндрическими или плоскими барьерами (рис. 3.25).

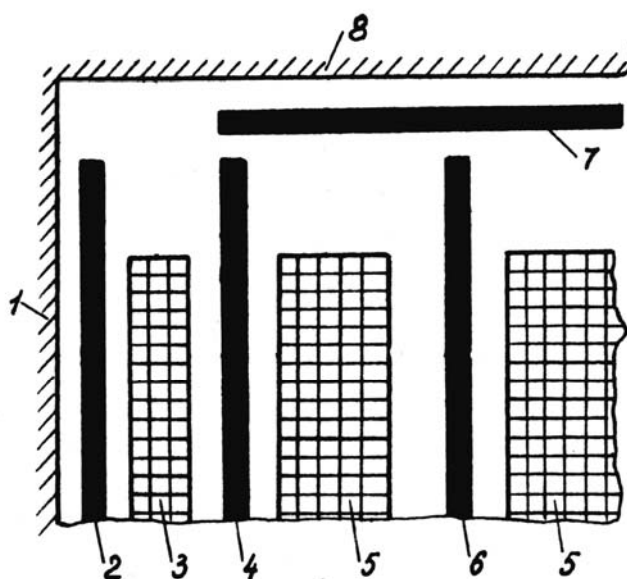


Рис. 3.25. Схема главной изоляции трансформаторов напряжения на 35 кВ: 1 – сердечник магнитопровода; 2 – изоляционный цилиндр; 3 – обмотка низкого напряжения; 4 – изоляционный цилиндр; 5 – обмотка высокого напряжения; 6 – междуфазная перегородка; 7 – изоляционный щиток; 8 – ярмо

Для выравнивания напряжения вдоль обмотки в трансформаторах 6-10 кВ и выше, с целью уменьшения межвитковых напряжений, применяются экраны из разрезных колец. Для защиты от градиентных перенапряжений в трансформаторах напряжения на 35 кВ по две катушки с обоих концов обмотки выполняют с усиленной изоляцией. Обмотки высокого напряжения могут выполняться как слоевыми, так и непрерывными катушечными.

3.5.3. Изоляция силовых трансформаторов

По конструктивному исполнению изоляция силовых трансформаторов до 35 кВ не имеет принципиальных отличий от изоляции трансформаторов напряжения.

Особенностью главной изоляции высоковольтных обмоток трансформаторов на напряжение 110 кВ и выше является наличие не одного, а нескольких изоляционных цилиндров (рис. 3.26), количество которых зависит от номинального напряжения трансформатора.

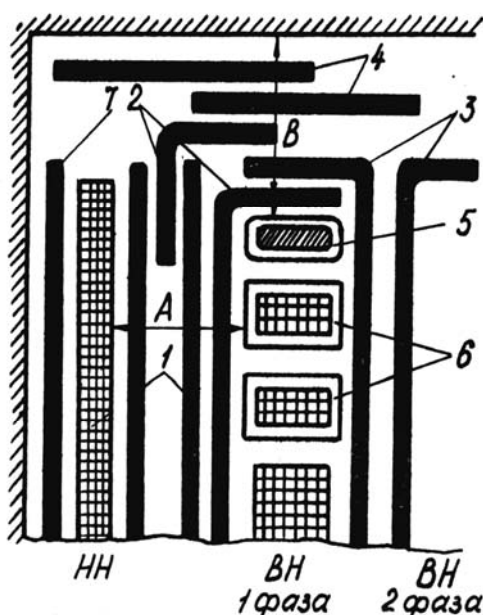


Рис. 3. 26. Схема главной изоляции силового трансформатора на 110 кВ с выводом на конце обмотки (вариант): 1 – изоляционные цилиндры; 2 – угловые шайбы; 3 – междуфазные перегородки; 4 – ярмовая изоляция; 5 – емкостное кольцо; 6 – дисковые катушки; 7 – изоляционный барьер; А – расстояние между обмотками НН и ВН; В – расстояние от ярма до емкостного кольца

Неотъемлемой частью главной изоляции трансформаторов 110 кВ и выше являются угловые шайбы 2, которые представляют собой кольцевые Г-образные барьеры, затрудняющие развитие разрядов с торца обмотки на ярмо магнитопровода.

Изоляция между обмотками различных фаз трансформатора осуществляется с помощью плоских Г-образных барьеров – междуфазных перегородок 3 из электрокартона. Ярмовая изоляция 4 может состоять из нескольких листов электрокартона.

Для выравнивания распределения электрического поля на первых катушках и уменьшения градиентных перенапряжений используется разрезное емкостное кольцо 5, присоединенное к началу высоковольтных обмоток.

Обмотка на 110 кВ выполняется из непрерывной части и входных дисковых катушек 6 (по две катушки с каждого конца) с дополнительной бумажной изоляцией.

Низковольтная обмотка имеет изоляцию от стержня магнитопровода в виде изоляционного цилиндра 7.

В трансформаторах с заземленной нейтралью на 220 кВ и выше, как правило, высоковольтные обмотки состоят из двух ветвей с вводом высокого напряжения в середину обмотки. Электрическое поле в середине обмотки при

этом более равномерное, чем на концах, что позволяет применять облегченную изоляцию между витками обмотки. В конце обмотки поле хотя и остается резконеоднородным, но невысокое значение потенциала относительно земли позволяет относительно легко решить проблему изоляции торца обмотки от ярма магнитопровода. Концы обеих ветвей высоковольтных обмоток объединяются в нейтраль.

Многие современные конструкции силовых трансформаторов изготавливаются с кабельными вводами напряжения, что позволяет отказаться от применения наружной изоляции (вводы трансформатора) и уменьшить габариты трансформаторов.

Для силовых трансформаторов испытательное напряжение, в соответствии с ГОСТ 1516-76, более, чем в 2 раза превышает номинальное.

3.5.4. Изоляция испытательных трансформаторов

Сухие испытательные трансформаторы с воздушной изоляцией (без корпуса) изготавливаются для внутренней установки. Они имеют значительные габариты, нетранспортабельны, их общий вес на 20...40 % меньше, чем у масляных трансформаторов.

Испытательные трансформаторы с изоляцией под давлением газа пока не получили широкого распространения.

Наибольшее распространение получили масляные испытательные трансформаторы типа ИОМ (испытательный, однофазный, масляный).

Главной особенностью испытательных трансформаторов является невысокий коэффициент запаса электрической прочности, что позволяет изготавливать трансформаторы с облегченной изоляцией и снизить их габариты. Изоляция испытательных трансформаторов испытывается высоким напряжением $U_{\text{исп}} = (1,1 \dots 1,4) U_{\text{н}}$, причем испытательное напряжение строго не нормируется.

Низкий уровень изоляции испытательных трансформаторов обусловлен кратковременным режимом работы. Длительность большинства испытаний высоким напряжением составляет не более 3...5 мин., причем часто при напряжениях ниже номинального.

Испытательные трансформаторы, как правило, работают в закрытых помещениях. Поэтому вводы могут быть рассчитаны на воздействие $U_{\text{н}}$. К таким трансформаторам предъявляются меньшие требования в отношении надежности работы по сравнению с силовыми трансформаторами, т.к. выход из строя испытательного трансформатора связан с меньшим ущербом.

3.6. Изоляция силовых кабелей высокого напряжения

Общие сведения. Электрическим кабелем (или просто кабелем) называется одна или несколько изолированных токоведущих жил, заключенных в герметичную оболочку, поверх которой могут быть наложены защитные покровы. Силовые кабели предназначены для передачи и распределения электрической

энергии в условиях, когда прокладка воздушных линий оказывается трудновыполнимой или невозможной, экономически невыгодной или нежелательной по эстетическим, природоохранным и другим соображениям. Поэтому кабельные линии прокладываются в городах, на территории предприятий, при пересечении рек, морских проливов. Длина кабельных линий чаще составляет 0,5...1 км и реже 5...10 км и более. **Основная причина, препятствующая созданию длинных кабельных линий, состоит в том, что 1 км линии в 10...20 раз дороже воздушной линии.**

Основным конструктивным элементом кабеля является токоведущая жила (ТВЖ) круглой, сегментной или секторной формы, изготовленной из меди или алюминия (реже из биметалла). Для обеспечения гибкости кабеля с большим сечением ТВЖ скручиваются из отдельных проволок. На жилу накладываются изоляция в виде пропитанных бумажных лент из кабельной бумаги, резины или пластмасс. В качестве изоляции силовых кабелей могут быть использованы высокопрочные газы. Поверх изоляции накладываются защитные свинцовые или алюминиевые оболочки, а также оболочки на основе резины или пластмасс (полиэтилен, полихлорвинил). Для выравнивания поля ("негладкость" жил) и повышения напряжения ионизации на ТВЖ и на наружную поверхность изоляции накладываются экраны из медных лент или полупроводящей бумаги, резины, полиэтилена. Металлическая оболочка кабеля покрывается защитными покровами, поверх которых накладывается броня из стальных лент или проволок.

Электрическая прочность кабельной изоляции на постоянном напряжении выше, чем на переменном. Поэтому экономически целесообразно выполнять кабельные линии на постоянном напряжении.

При заданном номинальном напряжении сечение токоведущей жилы кабеля определяется величиной передаваемой нагрузки и условиями прокладки и охлаждения кабеля. Увеличение сечения ТВЖ приводит к увеличению объема изоляции и, как следствие, к росту диэлектрических потерь.

В настоящее время отечественная промышленность выпускает различные типы силовых кабелей широкой номенклатуры, отличающихся видом используемой изоляции и конструктивным исполнением.

3.6.1. Кабели с вязкой пропиткой

Силовые кабели с пропитанной бумажно-масляной изоляцией являются одним из самых распространенных видов кабельных изделий, используемых при передаче и распределении электрической энергии. Они изготавливаются с медными или алюминиевыми жилами, в свинцовой или алюминиевой оболочке с различными защитными покровами в зависимости от назначения и условий эксплуатации.

Для изоляции кабелей на напряжение до 35 кВ применяют кабельную бумагу КВ-120 и КВ-170 с шириной лент 10...30 мм. Для кабелей на более высокие напряжения используют бумагу повышенного качества типа КВУ. В каче-

стве пропитки применяются вязкие пропитывающие составы (маслоканифольный компаунд), минеральные или синтетические масла (октол).

Повышенная вязкость пропитки препятствует ее вытеканию при нормальной эксплуатации кабелей и при перепадах высот прокладки. Маслоканифольный компаунд приготовлен из минерального масла с добавлением 10...35 % канифоли. Процентное содержание канифоли в компаунде зависит от сорта нефтяного масла и выбирается из условия обеспечения требуемой вязкости и минимума $\text{tg}\delta$ изоляции в области рабочих температур.

По конструктивному исполнению кабели бывают с нерадиальным и с радиальным электрическим полем.

Кабели с нерадиальным электрическим полем (рис. 3.27) являются основной конструкцией многожильных кабелей на напряжение до 10 кВ, отличающейся наличием поясной изоляции в общей свинцовой или алюминиевой оболочке (тип СБ).

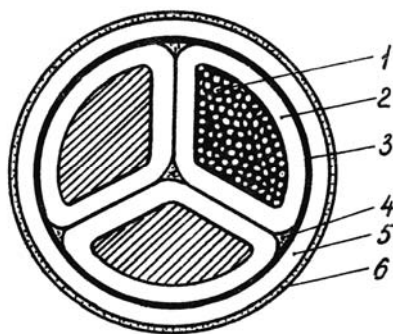


Рис.3.27. Трехжильный кабель с поясной изоляцией (тип СБ): 1 – токоведущая жила; 2 – фазная изоляция; 3 – поясная изоляция; 4 – междуфазное заполнение; 5 - оболочка; 6 – броня с защитными покровами

Фазная и поясная изоляция изготавливается путем наложения бумажных лент с отрицательным перекрытием. Для заполнения междуфазных пространств с целью придания кабелю цилиндрической формы, применяется бумажный кордель, который скручивается из сульфатной или кабельной бумаги КВ-120.

В нормальном рабочем режиме напряжение между жилами в $\sqrt{3}$ раз больше, чем между жилами и оболочкой, поэтому толщина фазной изоляции $d_{\text{ф}}$ принимается большей, чем толщина поясной изоляции $d_{\text{п}}$ (в 1,5...2,2 раза). После наложения изоляции происходит сушка и последующая пропитка в вакуумкотлах, при которой происходит заполнение пустот вязким пропитывающим составом.

На конечных стадиях пропитка идет при атмосферном или некотором избыточном давлении.

Трехжильные кабели с поясной изоляцией наряду с нерадиальным электрическим полем, облегчающим развитие ветвистого разряда вдоль слоев вследствие наличия тангенциальной составляющей поля E_{τ} , имеет неблагоприятную конструкцию с точки зрения теплоотвода. Эти обстоятельства не позволяют использовать подобные кабели на напряжение свыше 10 кВ.

Кабели с радиальным электрическим полем (тип ОСБ: отдельно освинцованные жилы) поверх изоляции каждой фазы имеют металлическую оболочку или проводящий экран из металла либо металлизированной бумаги, которые, в свою очередь, заключены в общую оболочку (рис. 3.28).

Наличие экрана поверх жилы и поверх изоляции каждой фазы выравнивает поле, а также экранирует на поверхности жилы и на наружной поверхности изоляции газовые и масляные включения.

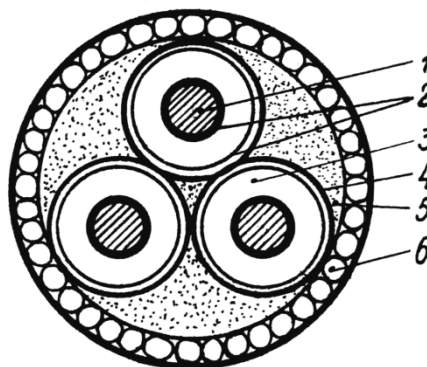


Рис. 3.28. Трехжильный кабель с отдельно освинцованными жилами (тип ОСБ): 1 – токоведущая жила, 2 – экран из полупроводящей бумаги, 3 – бумажная изоляция фазы, 4 – свинцовая оболочка с битумным покрытием, 5 – джутовое заполнение, 6 – проволочная броня с защитным покрытием

В итоге допустимые максимальные градиенты в изоляции кабелей с радиальным электрическим полем в два раза превышают допустимые градиенты в кабелях с поясной изоляцией. В нашей стране трехжильные кабели на $U = 20 \dots 35$ кВ с вязкой пропиткой изготавливаются только с отдельно освинцованными жилами (рис. 3.28).

Для соединения отрезков кабеля применяются соединительные муфты, а на концах кабеля – концевые муфты. Муфта является ослабленной точкой кабельной линии, поэтому рабочие напряжения в них снижены в 2-3 раза.

3.6.2. Маслонаполненные кабели

Высоковольтные кабели на $U = 110$ кВ имеют бумажную изоляцию, пропитанную жидким (маловязким) минеральным маслом, т. к. вязкая пропитка, в силу отмеченных выше недостатков оказывается неэффективной. Применение градирования изоляции по толщине (использование бумажных лент толщиной 0,08 и 0,12 мм) и использование маловязкой пропитки, циркулирующей под избыточным давлением по маслопроводящему каналу, расположенному в центре токоведущей жилы (рис. 3.29), позволяет уменьшить возможность возникновения в изоляции газовых включений.

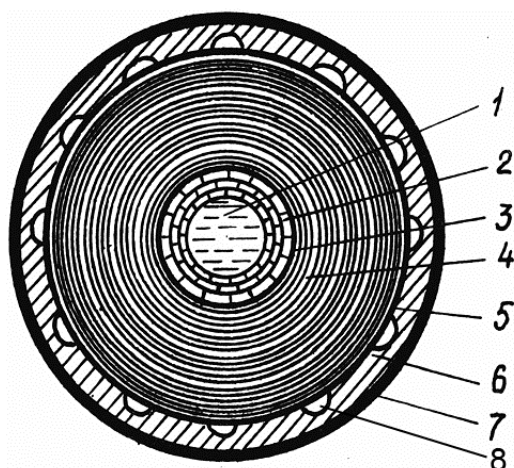


Рис. 3.29. Маслонаполненный кабель с центральным маслопроводящим каналом: 1 – маслопроводящий канал, 2 – токоведущая жила, 3, 5 – экраны, 4 – изоляция, 6 – свинцовая оболочка, 7 – броня с защитным покровом, 8 – дополнительные масляные каналы

Ионизационные процессы в таких кабелях практически отсутствуют, что позволяет повысить максимальную напряженность в изоляции таких кабелей до 9...12 кВ/мм и повысить стабильность электрических характеристик. Жидкий диэлектрик, циркулирующий по кабельной линии и проникающий из маслопроводящих каналов в толщу изоляции, не только пропитывает изоляцию, но и улучшает условия охлаждения кабеля, что может быть использовано для увеличения передаваемой мощности.

Для более эффективного заполнения изоляции маслом используются дополнительные каналы на внутренней стороне свинцовой оболочки (кабели высокого давления до 15 ат). При этом для увеличения механической прочности используется вторая (дополнительная) свинцовая оболочка. В маслонаполненных кабелях пропиточный состав должен иметь низкий $\text{tg}\delta$ во избежание опасности теплового пробоя.

3.6.3. Газонаполненные кабели

По конструктивному исполнению газонаполненные кабели аналогичны маслонаполненным, но повышение электрической прочности изоляции достигается наличием газа под высоким давлением, что позволяет повысить напряжение ионизации в бумажной изоляции с обедненной пропиткой. В зависимости от величины избыточного давления газа (азот, фреон, элегаз) различают кабели низкого давления (0,7 – 1,5 ат), среднего (1,7 – 3,0 ат) и высокого (10 – 15 ат).

Газонаполненные кабели напряжением до 10 и 35 кВ обычно выполняются в общей металлической оболочке со сплошными или секторными уплотненными жилами с экранами из полупроводящих бумаг. Поверх изоляции накладывается слой из металлизированной перфорированной бумаги и медная перфорированная лента с зазором между витками. Газ подводится с помощью гиб-

ких стальных оцинкованных газопроницаемых трубок, уложенных в пространство между жилами.

На напряжение 110 кВ и выше применяются кабели в однофазном исполнении с центральным каналом.

Газонаполненные кабели используются при прокладке на крутонаклонных трассах. Они значительно дешевле маслонаполненных кабелей.

Допустимые напряженности в изоляции кабелей низкого давления составляют 2,5 кВ/мм, а в изоляции кабелей среднего давления – 6,5 кВ/мм.

3.6.4. Кабели в стальных трубах под давлением масла или газа

Маслонаполненные кабели высокого давления (ВД) до 15 ат типа МВДТ выполняются в стальном трубопроводе (рис. 3.30).

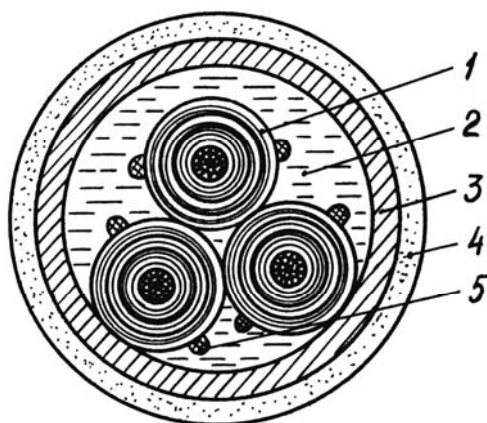


Рис. 3.30. Маслонаполненный кабель высокого давления в стальной трубе: 1 – фаза кабеля; 2 – масло; 3 – трубопровод; 4 – защитные покровы; 5 – проволочки скольжения

Аналогично выглядит также конструкция газонаполненного кабеля высокого давления типа ГВДТ (Т-кабель в трубе).

Для пропитки маслонаполненных кабелей высокого давления применяется более вязкое изоляционное масло, чем для кабелей низкого и среднего давления. Так как труба надежно защищает кабель от внешних механических воздействий, то внешняя оболочка выполняется облегченной – из медной ленты, поверх которой накладываются круглые проволочки или сплошную броню скольжения. Свинцовая оболочка накладывается только на период хранения и транспортировки кабеля. Перед монтажом она снимается. Такие кабели изготавливаются на высшие номинальные напряжения 110-500 кВ. Поверх жилы накладывается экран из лент металлизированной бумаги, а поверх изоляции – экран из медных перфорированных лент. Допустимые напряженности в изоляции кабелей составляют при этом 6...11 кВ/мм, а толщина изоляции – от 12 до 29 мм.

В кабельных линиях под давлением газа при 12...15 ат допустимые напряженности составляют 10...12 кВ/мм. Недостатком таких кабелей являются худшие условия теплоотвода.

3.6.5. Кабельные линии в трубах со сжатым газом

Подобные линии весьма просты в конструктивном исполнении (рис. 3.31).

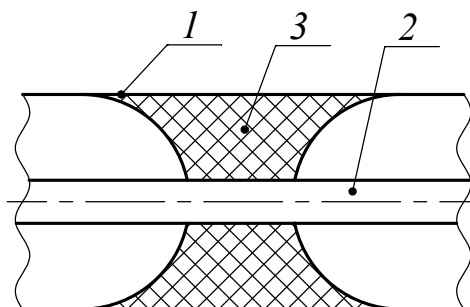


Рис. 3.31. Конструкция кабеля со сжатым газом: 1 – труба; 2 – токопровод; 3 – центрирующий изолятор (распорка)

Кабель состоит из наружной оболочки (стальная или пластмассовая труба) и центрального трубопровода, который крепится и устанавливается соосно с наружной оболочкой с помощью центрирующего изолятора (фарфор, эпоксидный компаунд). Такой кабель сочетает в себе черты воздушной и кабельной линии. Основной изоляцией является газ под высоким давлением, который, как известно, обладает способностью быстро восстанавливать электрическую прочность после прекращения разрядов. Одной из основных проблем является создание распорки с высоким значением напряжения перекрытия.

3.6.6. Кабели с резиновой или пластмассовой изоляцией

Силовые кабели с резиновой или пластмассовой изоляцией предназначены для передачи и распределения электрической энергии на трассах с неограниченной разностью уровней прокладки.

Кабели с резиновой изоляцией (рис. 3.32) на напряжение до 6-10 кВ широко используются в землеройных и горных работах, в геофизических поисках, нефтяном бурении и т. д.

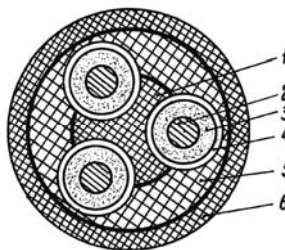


Рис. 3.32. Кабель с резиновой изоляцией: 1 – сердечник; 2 – токоведущая жила; 3 – изоляция фазы; 4 – экран; 5 – заполнение; 6 – оболочка из резины

Поверх токоведущей жилы накладывается изоляция из резины, на которую накладываются экраны из полупроводящей бумаги и экранирующая оплетка из медных проволок. Изолированные жилы скручивают вокруг профилиро-

ванного сердечника и заключают в свинцовую, поливинилхлоридную или полихлорпреновую (негорючую резиновую) оболочку с покровами или без них.

Кабели с полиэтиленовой или полихлорвиниловой (60-10 кВ) изоляцией в трехфазном исполнении изготавливаются только в поливинилхлоридной оболочке. Каждая фаза поверх ТВЖ и изоляции покрывается полупроводящим экраном из полупроводящего полиэтилена или бумаги.

Наибольшее распространение на напряжение 35-500 кВ получили кабели с полиэтиленовой изоляцией.

Для выравнивания поля поверх изоляции накладываются экраны из полупроводящего полиэтилена или науглероженной бумаги и медной (алюминиевой) ленты. Экраны из полупроводящего полиэтилена накладываются и на ТВЖ. Для затруднения развития дендритов в полиэтилене между полупроводящим экраном и изоляцией наносится антиэмиссионный слой из материала с повышенной диэлектрической проницаемостью.

Конструкция кабеля в однофазном исполнении (на $U = 110-500$ кВ) с полиэтиленовой изоляцией представлена на рис. 3.33.

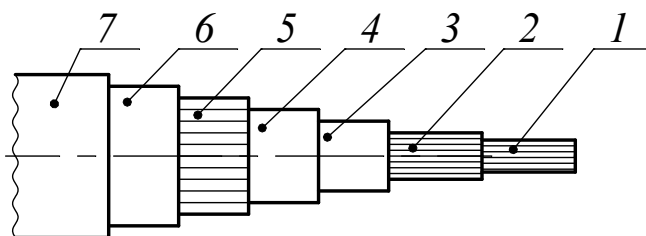


Рис. 3.33. Кабель с полиэтиленовой изоляцией: 1 – токоведущая жила; 2, 5 – экраны из полупроводящего полиэтилена; 3 – антиэмиссионный слой; 4 – изоляция (экструдированный полиэтилен); 6 – медные ленты; 7 – свинцовая оболочка

Кабели с пластмассовой изоляцией используются для распределения электроэнергии от подстанций к потребителям, в качестве судовых кабелей, т. к. полиэтилен и полихлорвинил обладают высокой влагостойкостью.

В настоящее время в России освоено производство силовых кабелей на напряжение 110-500 кВ в однофазном исполнении с алюминиевой или медной токоведущей жилой, вместе с кабельной арматурой, с изоляцией из "сшитого" полиэтилена, что позволяет повысить рабочие градиенты и передаваемые мощности.

3.7. Изоляция вращающихся машин высокого напряжения

Вращающиеся машины используются при производстве электрической энергии (турбогенераторы, гидрогенераторы), при выработке реактивной мощности (синхронные компенсаторы), а также при преобразовании электрической энергии в различные виды механической энергии (электродвигатели).

Генераторы являются наиболее ответственным оборудованием, к которому предъявляются очень высокие требования в отношении надежности и долговечности работы.

В настоящее время в эксплуатации находятся турбогенераторы мощностью 500 – 800 МВт (3000 об/мин) с номинальным напряжением 21...24 кВ типа ТГ. Современные гидрогенераторы имеют мощность 500...640 МВт.

В 1980 г. на заводе "Электросила" изготовлен турбогенератор типа ТВВ-1200 для второй очереди Костромской ГРЭС. Генератор имеет мощность 1200 МВт, номинальное напряжение 24 кВ, охлаждение сердечника и обмотки ротора – водородное, обмотки статора – водяное. Масса генератора составляет 610 т. Несмотря на сравнительно малые номинальные напряжения, проектирование и создание генераторов связано со значительными техническими трудностями. Прежде всего это связано с жесткими ограничениями по толщине изоляции статорной обмотки с целью уменьшения габаритов и веса генераторов.

Кроме того, изоляция электрических машин испытывает постоянные вибрации и большие ударные механические нагрузки при коротких замыканиях, воздействие высоких температур и продуктов разложения воздуха (озон, окислы азота и др.). Большие генерируемые (преобразуемые) мощности электрической энергии и, как следствие, большие токи в активных частях электрических машин приводят к значительным тепловым нагрузкам в изоляции.

В генераторах малой и средней мощности применяется поверхностная система охлаждения воздушным потоком. Конструкция паза турбогенератора с воздушным охлаждением приведена на рис. 3.34.

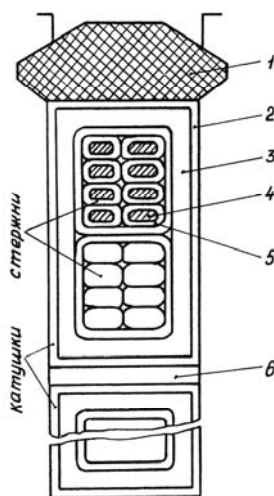


Рис. 3.34. Конструкция паза статорной обмотки турбогенератора с воздушным охлаждением: 1 – клин; 2 – изоляционные прокладки; 3 – корпусная изоляция; 4 – проводник; 5 – витковая изоляция; 6 – межслоевая изоляция; 7 – изоляция стержня

В электрических машинах большой мощности (200 МВт и выше) используется внутреннее водяное, масляное или водородное охлаждение обмоток с использованием медных полых проводников.

Изоляцию машин можно подразделить на корпусную (главную) и межвитковую (продольную). Современные турбогенераторы большой мощности, как правило, имеют обмотку с одновитковыми стержнями, и, следовательно, витковая изоляция в таких машинах в стержне отсутствует.

Главной (высоковольтной) изоляцией является изоляция стержня относительно корпуса 2, 3 и между стержнями 7 (рис. 3.34). Современные машины имеют непрерывную микалентную компаундированную изоляцию, покрытую асбестовой лентой. Микалента состоит из двух слоев специальной бумажной подложки, между которыми располагаются пластинки слюды. Слюда в микаленте удерживается масляно-битумным лаком (компаундом).

Стержни состоят из медных проводников, разделенных низковольтной изоляцией 6 из асбеста или стекловолокна.

Высоковольтная изоляция вращающихся машин разделяется на термопластичную и терморективную (современные конструкции мощных машин).

Термопластичная изоляция, применяемая как в старых, так и в современных конструкциях, в соответствии с циклами нагрева и охлаждения размягчается и вновь затвердевает, что может приводить к возникновению в тоще изоляции газообразных включений, снижающих ее электрическую прочность.

Терморективная смола при циклах нагрева не размягчается, т.к. она находится в неплавком и нерастворимом состоянии. Это свойство позволяет использовать такую изоляцию при более высоких температурах с сохранением первоначальной электрической прочности и высокой надежности. В настоящее время широкое внедрение получила микалентная изоляция на основе подложки из двух лент стекловолокна с заключенной между ними слюдой и пропитанной эпоксидным компаундом или полиэфирным лаком.

По конструктивному исполнению изоляция стержней разделяется на гильзовую (старые конструкции) и непрерывную (современные конструкции).

Суть гильзовой изоляции заключается в том, что пазовая часть (более напряженная) выполняется в виде гильзы из микафолия (миканит с подложкой из бумаги, шелковой или стеклянной ткани), а лобовая часть (менее напряженная) – на основе микалентных лент. При таком способе изолирования неизбежным является наличие стыка (слабого места) за пределами выхода стержня из паза. Нарушение непрерывности изоляции приводит к существенному снижению электрической прочности в этом месте. Поэтому гильзовая изоляция применяется в машинах малой мощности и напряжения.

Непрерывная изоляция, выполняемая из одного и того же материала на всей длине стержня, имеет практически одинаковую электрическую прочность в пазовой и лобовой частях. После нанесения нескольких слоев микаленты стержни помещаются в специальные компаундировочные котлы, где изоляция сушится, вакуумируется и пропитывается под давлением расплавленным компаундом – компаундирование изоляции. Весь процесс наложения расчетной толщины изоляции и последующей пропитки осуществляется в нескольких последовательных стадиях для более эффективной пропитки изоляции. Непрерывная компаундированная микалентная изоляция является термопластичной.

Современные мощные турбогенераторы имеют пазы и стержни прямоугольной формы. Поэтому для выравнивания поля на кромки стержня накладывается полупроводящая лакоткань или бумага для увеличения радиуса закругления. Затем поверх изоляции стержня наносится полупроводящее покрытие,

которое электрически соединяется с железом статора во избежание разрядов между стержнем и стенкой паза.

Для устранения краевого эффекта (короны) в месте выхода стержня из паза используется нанесение полупроводящих покрытий по поверхности изоляции, что позволяет предотвратить ее преждевременное разрушение. Иногда применяется и емкостное выравнивание с помощью проводящих или полупроводящих обкладок (экранов), встраиваемых в толщу изоляции.

Наиболее распространенным методом противокоронной защиты является двухступенчатое нанесение полупроводящего слоя на изоляцию в месте выхода из паза. В пазовой части на расстоянии 50-100 мм от кромки паза наносится полупроводящий лак с $\rho_s = 10^3 - 10^5$ Ом, а затем изоляция пропитывается лаком с $\rho_s = 10^7 - 10^9$ Ом на длине 200...300 мм. Полупроводящее покрытие покрывается слоем изоляционного материала толщиной 0,4...0,5 мм, что улучшает надежность покрытия.

Лобовые части обмотки оформляются с таким расчетом, чтобы в них отсутствовала корона при номинальном напряжении.

При внутреннем водяном охлаждении обмоток вода подводится через головки лобовых частей с помощью специальных изоляционных шлангов из фторопласта или тепломаслостойкой резины, соединяющих наконечники головок обмотки, находящейся под высоким потенциалом, с заземленным водосборным коллектором.

Межвитковая изоляция машин малой и средней мощности (до 30 МВт) имеет стержни с несколькими витками, напряжение между которыми не превышает нескольких сотен вольт. Изоляция между витками рассчитывается таким образом, чтобы она могла выдерживать сравнительно невысокие $U_{исп} = 1000...2250$ В. В качестве витковой изоляции применяются материалы класса нагревостойкости В с допустимой рабочей температурой 130 °С.

Особенностью витковой изоляции вращающихся машин является отсутствие расчета на воздействие импульсных волн атмосферных перенапряжений, т.к. генераторы подсоединяются к воздушным ЛЭП через кабели или трансформаторы. При непосредственном подсоединении генераторов на воздушные сети 3-10 кВ (такая работа иногда допускается) необходимо учитывать градиентные перенапряжения при воздействии импульсных волн на витковую изоляцию.

В нашей стране решаются вопросы по разработке и созданию генераторов высокого напряжения на 35 – 100 кВ и даже 220 кВ, что позволит питать распределительные электрические сети непосредственно от генераторов и отказаться от применения повышающих трансформаторов, обеспечив большой экономический эффект. Разработана конструкция гидрогенератора на 110 кВ с корпусной бумажно-масляной изоляцией. Статор с обмоткой отделен от вращающегося ротора изоляционной перегородкой. Пространство статора заполнено маслом, служащим в качестве изоляционной и охлаждающей среды. Изоляция обмоток – бумажно-масляная.

Генераторы на 35-220 кВ могут непосредственно подключаться к ЛЭП, поэтому изоляция таких машин должна быть рассчитана на воздействие атмосферных перенапряжений.

В 1976 году гидрогенератор на 110 кВ прошел успешно испытания на Сходненской ГЭС под Москвой.

3.8. Методы профилактических испытаний изоляции высоковольтного оборудования

Общие сведения. Профилактические испытания изоляции электрооборудования предназначены для контроля за ее состоянием и своевременного обнаружения и устранения дефектов с целью обеспечения надежной работы.

При всем многообразии встречающихся на практике дефектов их можно разделить на две основные группы: сосредоточенные, занимающие небольшую часть изоляции, и распределенные, охватывающие значительную или всю поверхность (или объем) диэлектрика.

Различают следующие виды неоднородностей: многослойность (рис. 3.35, а, б); сквозные капилляры (рис. 3.35, в); газообразные, жидкие или твердые включения (рис. 3.35, г). Неоднородность материала и наличие включений существенно влияют на изоляционные характеристики и работоспособность электрооборудования.

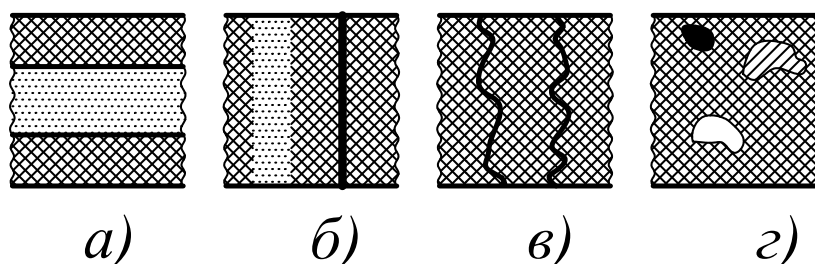


Рис. 3.35. Виды неоднородностей в диэлектрике

3.8.1. Физические процессы в многослойном диэлектрике

Наиболее распространенной является неоднородная (комбинированная) изоляция, состоящая из различных по своим свойствам слоев диэлектриков. При загрязнении или увлажнении отдельных ее слоев степень неоднородности такой изоляции возрастает, т.к. проводимость увлажненных слоев увеличивается в $10^2 - 10^3$ раз и более, а изменение емкости при этом существенно меньше (в 1,5...2,0 раза).

Начальное состояние такой изоляции после включения на постоянное напряжение характеризуется протеканием емкостного тока i_c (распределение напряжения по емкостям), а конечное – протеканием тока сквозной проводимости $i_{тр}$ (распределение напряжения по проводимостям).

Отличие начального и конечного распределений (емкости слоев не соответствуют их проводимостям) вызывает переходный процесс. В конце переходного процесса все напряжение оказывается приложенным к неувлажненному (сухому) слою, которому, при этом, будет сообщен дополнительный заряд ("заряд абсорбции") от увлажненного слоя, что сопровождается протеканием через диэлектрик тока абсорбции $i_{абс}$ (рис. 3.36).

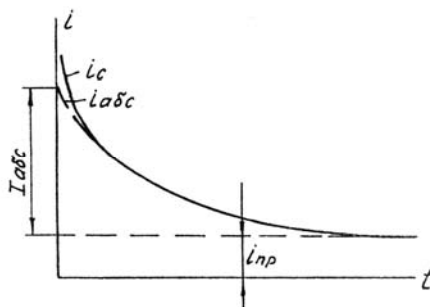


Рис.3.36. Изменение тока в неоднородном диэлектрике от длительности приложенного напряжения

Величина тока абсорбции может являться характеристикой состояния изоляции оборудования. Например, хорошая (неувлажненная) изоляция характеризуется относительно небольшими значениями тока абсорбции и медленным спадом тока во времени (большая постоянная времени). Ухудшенная (увлажненная) изоляция отличается большим амплитудным значением $i_{абс}$ и достаточно быстрым его спадом во времени.

Пусть двухслойный неоднородный диэлектрик подключен к источнику синусоидального напряжения, причем полная проводимость первого (увлаженного) слоя равна $G_1 = g_1 + j\omega C_1$, а полная проводимость второго (сухого) слоя – $G_2 = j\omega C_2$.

Тогда полная (эквивалентная) проводимость диэлектрика при последовательном включении слоев

$$G_3 = \frac{g_1 \omega^2 C_2^2 + j\omega C_2 [g_1^2 + \omega^2 C_1 (C_1 + C_2)]}{g_1^2 + \omega^2 (C_1 + C_2)^2} = g_3 + j\omega C_3, \quad (3.16)$$

где g_3 , C_3 – эквивалентная проводимость и эквивалентная емкость увлажненного диэлектрика.

Из формулы следует (анализ опущен), что $\text{tg}\delta = \frac{g_3}{\omega C_3}$ и C_3 зависит от частоты, поэтому эти зависимости могут использоваться для оценки качества изоляции при профилактических испытаниях.

3.8.2. Методы профилактических испытаний изоляции оборудования высокого напряжения

Измеряя значение емкости изоляции при разных частотах переменного напряжения и сравнивая их, можно судить о степени увлажнения изоляции высоковольтного оборудования. На практике этот метод нашел широкое распространение при профилактических испытаниях внутренней изоляции трансформаторов и вводов с бумажно-масляной изоляцией. Измеряется емкость при двух частотах (при $f_1 = 2$ Гц и $f_2 = 50$ Гц). На основании опыта эксплуатации было установлено, что для волокнистых органических материалов степень увлажнения является недопустимой (опасной), если отношение величин емкости изоляции при вышеуказанных частотах $\frac{C_2}{C_{50}} \geq 1,3$. Измерение емкости изоляции высоковольтного оборудования производится с помощью приборов ПКВ-7, ПКВ-13, ЕВ-3.

О наличии влаги в изоляции трансформаторов, вводов, электрических машин можно также судить по величине коэффициента абсорбции

$$K_{\text{абс}} = \frac{R_{60}}{R_{15}}, \quad (3.17)$$

где R_{60} , R_{15} – сопротивление изоляции, измеренное через 15 и 60 секунд, соответственно, с помощью мегаомметра типа МС–0,5 на 2,5 кВ.

Для увлажненной изоляции $K_{\text{абс}} \approx 1$, т. к. во влажной изоляции поляризационные процессы сравнительно кратковременны и $R_{60} \approx R_{15}$.

В сухой изоляции процессы поляризации протекают более медленно, а поэтому $R_{60} > R_{15}$ и $K_{\text{абс}} > 1$. Изоляция может эксплуатироваться, если $K_{\text{абс}} \geq 1,3$. При этом одновременно производят оценку качества изоляции по нормируемому значению сопротивления утечки изоляции R_y ($R_y = R_{60}$).

Величина $\text{tg} \delta$, определяющая диэлектрические потери в изоляции на переменном напряжении, является одной из самых распространенных характеристик, значение которой используется в качестве диагностического параметра для оценки состояния изоляционных изделий (наличие влаги, загрязнений). По нормированному (допустимому) и измеренному значению $\text{tg} \delta$ при заданной температуре делается заключение о дальнейшей пригодности изоляции к работе. В эксплуатационных условиях для измерения $\text{tg} \delta$ используются переносные мосты типа МД-16, Р-525, Р-595 и др. Измерение обычно проводится при напряжении до 10 кВ и $f = 50$ Гц. Нормы значения $\text{tg} \delta$ изоляции устанавливаются отдельно для каждого вида оборудования. Важно не только абсолютное значение $\text{tg} \delta$, но и его стабильность во времени. Для оценки состояния изоляции маслонаполненного оборудования широко используется анализ пробы мас-

ла (исследуется электрическая прочность масла, степень окисления, кислотное число, влагосодержание, газосодержание).

Для оценки электрической прочности используется аппарат типа АИМ-90 со стандартной ячейкой, а анализ влаго- и газосодержания в масле осуществляется с помощью газовых хроматографов.

На заключительной стадии диагностики изоляции оборудования производят испытания высоким напряжением. Применение этого метода ограничивается возможностями создания мобильных источников высокого напряжения требуемой мощности и опасностью неконтролируемого повреждения изоляции высоким испытательным напряжением.

Профилактические испытания изоляции высоким напряжением проводят для крупных вращающихся машин, кабельных линий, а также для оборудования до 10 кВ. Изоляция статорных обмоток турбо- и гидрогенераторов испытывается ежегодно переменным напряжением $1,5 U_{ном}$. Допускается применение постоянного испытательного напряжения, значение которого должно быть в 1,6 раза выше $U_{исп}$ промышленной частоты. Достоинствами таких испытаний являются существенно меньшая мощность испытательной установки, возможность измерений токов утечки I_y (или R_y), а также меньшая, чем при переменном испытательном напряжении, опасность повреждения изоляции.

Изоляция кабельных линий испытывается постоянным высоким напряжением. Для кабелей с бумажно-масляной изоляцией $U_{исп}=(5...6)U_{ном}$ при $U_{ном} \leq 10$ кВ, а при $U_{ном} = 20...35$ кВ $U_{исп}=(4...5)U_{ном}$.

В приложении ПЗ приведены условия испытаний высоковольтного оборудования для кабелей, трансформаторов, электрических двигателей.

Все рассмотренные методы диагностики пригодны только для периодического контроля изоляции, эффективность которого значительно снижается при увеличении интервала времени между испытаниями, а сокращение этих интервалов ограничивается возможностями вывода оборудования из работы и ростом трудозатрат на проведение испытаний. В связи с этим большое внимание уделяется разработке методов и аппаратуры для автоматического непрерывного контроля (мониторинга) изоляции при $U_{раб}$. В качестве перспективного метода контроля изоляции при $U_{раб}$ является регистрация частичных разрядов.

Литература

1. Долгинов А.И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике. – М.: Энергия, 1968. – 464 с.
2. Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с. Куртенков Г.Е.
3. Основы проектирования изоляции высоковольтного электрооборудования, - Томск: Издательство НТЛ, 1999. – 276 с.
4. Бажанов С.А., Воскресенский В.Ф. Монтаж и эксплуатация маслонеполненных вводов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 104 с.

5. Синявский В.Н. Расчет и конструирование электрокерамических конструкций. – М.: Энергия, 1977. – 192 с.

6. Weedy В.М. Underground transmission of electric power. – John Wiley and Sons, New York, 1980. – 232 P.

Контрольные вопросы к главе № 3

1. Перечислите условия работы и требования, предъявляемые к изоляции высоковольтного электрооборудования.

2. Назначение и конструктивные особенности изоляции воздушных ЛЭП.

3. Исполнение опорных изоляторов для внутренней и наружной установок.

4. Особенности назначения и конструктивного исполнения проходных изоляторов.

5. Высоковольтные вводы: назначение, тип изоляции, конструктивное исполнение. Современные типы высоковольтных вводов.

6. Характеристики основных материалов применяемых в силовых конденсаторах.

7. Конструктивные особенности изоляции трансформаторов напряжения.

8. Силовые трансформаторы: назначение, конструктивное исполнение изоляции.

9. Силовые кабели: назначение и конструктивное (принципиальное) исполнение.

10. Особенности конструктивного исполнения силовых кабелей с вязкой пропиткой.

11. Маслонаполненные и газонаполненные кабели.

12. Кабельные линии в трубах со сжатым газом.

15. Изоляция вращающихся машин высокого напряжения: тип и материал изоляции, конструктивное исполнение.

16. Дать развернутую характеристику основным методам профилактических испытаний изоляции высоковольтного оборудования.

ГЛАВА 4

ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

4.1. Классификация видов перенапряжений

Перенапряжением называются любые повышения напряжения в электрической системе, которые по величине выше длительно допустимых при нормальном эксплуатационном режиме (т. е. более 5...20%).

Все виды перенапряжений более $1,2U_n$ для 6–10 кВ и более $1,05U_n$ для 750–1150 кВ в электрической системе по характеру возникновения делят на:

- внутренние (возникают вследствие внутренних причин);
- внешние (грозовые).

В свою очередь внутренние делятся на:

- коммутационные, связанные с включением и отключением; аварийные (дуговые), связанные с коротким замыканием, обрывом
- резонансные и феррорезонансные, возникающие вследствие неблагоприятного сочетания R, L, C линии и ее элементов.

$$k_{\text{пн}} = \frac{U_{\text{м пн}}}{\sqrt{2}U_{\text{м доп}}}, \quad (4.1)$$

где $U_{\text{м пн}}$ – максимальная амплитуда волны перенапряжения; $U_{\text{м доп}}$ – наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение в электрической сети (согласно ГОСТ 1516.1–77).

В первом приближении кратность внутренних перенапряжений не зависит от номинального напряжения сети U_n . Амплитуда внутренних перенапряжений определяется запасом энергии в электрической системе и связана с U_n , так при более низких U_n , меньше и запас энергии (рис. 4.1).

Продолжительность грозовых перенапряжений определяется параметрами тока молнии (фронт порядка 1...1,5 мкс и длительность порядка 45...50 мкс). Внутренние перенапряжения могут быть относительно кратковременными (0,1...0,01 с) (коммутационные, аварийные) и более длительными (резонансные). Величина перенапряжений обычно характеризуется кратностью перенапряжений k (рис. 4.1).

Все элементы электрической системы разбиты на три группы:

- источники энергии ($e(t)$ — генераторы);
- элементы способные накапливать энергию (L и C);
- элементы, способные поглощать энергию (активная нагрузка, корона, сосредоточенные и распределенные R и проводимости G).

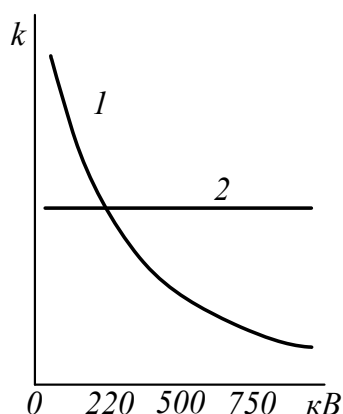


Рис. 4.1. Сравнение зависимостей кратности внутренних и грозовых перенапряжений от номинального напряжения сети: 1 – средние значения коэффициентов грозовых перенапряжений; 2 – средние значения коэффициентов коммутационных перенапряжений

Если баланс между генерируемой и поглощаемой энергиями нарушается, возникают колебания, способные вызвать перенапряжения кратностью до 4-6 U_{ϕ} . Это можно продемонстрировать, рассмотрев упрощенную однофазную схему замещения электроснабжения, приведенную на рис. 4.2.

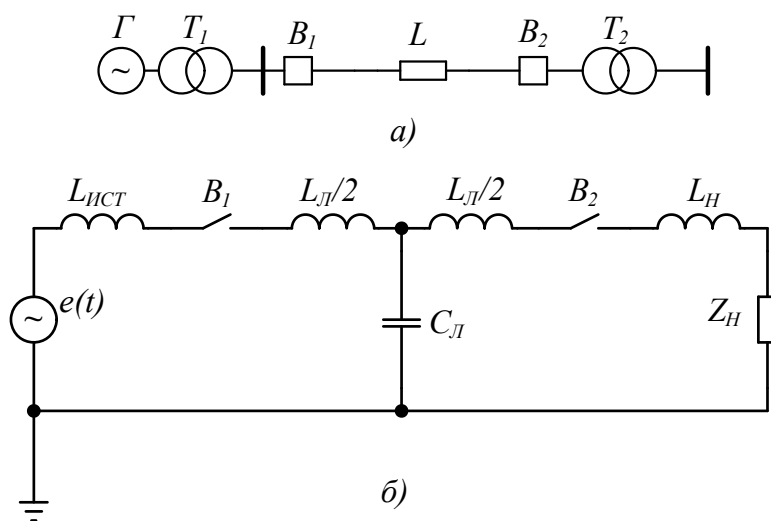


Рис. 4.2. Упрощенная однолинейная (а) и электрическая (б) однофазная схема замещения электроснабжения: $e(t)$ – эквивалентный источник питания; $L_{ист}$ – эквивалентная индуктивность источника питания; $L_{л}$ – эквивалентная индуктивность линии электропередачи; $C_{л}$ – эквивалентная емкость линии электропередачи; B_1 и B_2 – выключатели, $L_{н}$ – эквивалентная индуктивность со стороны нагрузки, $Z_{н}$ – полное эквивалентное сопротивление нагрузки

При разомкнутом выключателе B_2 в схеме только реактивные элементы и возможны колебания и рост напряжения на емкости линии $C_{л}$. Перенапряжения возможны при включении выключателем B_1 ненагруженной линии, или при одновременном включении B_1 и B_2 в случае ненагруженного трансформатора.

Внешние перенапряжения атмосферного происхождения можно разделить на две группы:

- прямой удар молнии в подстанцию, ВЛ или набегание волн на подстанцию от прямого удара молнии в ВЛ (ПУМ);
- индуцированные на проводах и элементах от грозового облака или от прямого удара молнии около ВЛ.

Перенапряжения при прямом ударе молнии в опору и в ЛЭП могут достигать несколько миллионов вольт. Статические (индуцированные) перенапряжения менее опасны и составляют 200...300 кВ. Кратность грозových перенапряжений зависит от номинального напряжения сети U_n , т. к. запас энергии атмосферного электричества ограничен. Поэтому чем выше номинальное напряжение сети, тем меньше кратность грозových перенапряжений (рис. 4.1).

Токи молнии носят вероятностный характер и могут достигать амплитуды до 200 кА со скоростью нарастания до 100 кА/мкс. Чем меньше амплитуда тока молнии, тем больше его вероятность. Так же и с крутизной тока молнии. Величина перенапряжений при прямом ударе молнии в ЛЭП определяется по формуле:

$$U_{\max} \equiv I_M \cdot Z + \frac{dI_M}{dt} \cdot L, \quad (4.2)$$

где: I_M – амплитуда тока молнии;

Z – волновое сопротивление линии электропередачи;

$\frac{dI_M}{dt}$ – крутизна тока молнии;

L – индуктивность проводов, по которым протекает ток молнии.

Отсюда следует, что кратность перенапряжений:

$$k = f\left(I_M, \frac{dI_M}{dt}\right). \quad (4.3)$$

Сравнение кратностей внутренних и грозových перенапряжений для различных классов напряжений показывает, что:

$$U_n = 6 - 220 \text{ кВ}, \quad k_{\text{гр}} \gg k_{\text{вн}};$$

$$U_n = 330 - 500 \text{ кВ}, \quad k_{\text{гр}} \approx k_{\text{вн}};$$

$$U_n = 750 - 1150 \text{ кВ}, \quad k_{\text{гр}} < k_{\text{вн}},$$

где $k_{\text{гр}}$ – коэффициент грозových перенапряжений, $k_{\text{вн}}$ – коэффициент внутренних перенапряжений.

4.2. Уровни и координация изоляции

Основные виды изоляции в электрической системе:

- 1) воздушная (В);
- 2) линейная (Л);
- 3) аппаратно-станционная (А-С);
- 4) трансформаторная (Т);
- 5) машинная (М).

Каждый из них имеет свой уровень изоляции.

Уровень изоляции – это отношение 50%-ного разрядного напряжения ($U_{p50\%}$) одного изоляционного элемента (воздушный промежуток, гирлянда, опорный изолятор, внутренняя изоляция трансформатора, вращающейся машины) к амплитуде наибольшего длительно допустимого рабочего фазного напряжения ($U_{фмд}$):

$$k_{и} = \frac{U_{p50\%}}{\sqrt{2}U_{фмд}}, \quad (4.4)$$

где $k_{и}$ – уровень изоляции;

$U_{p50\%}$ – 50% разрядное напряжение изоляционного элемента;

$U_{фмд}$ – наибольшее длительно допустимое рабочее фазное напряжение сети по ГОСТ 1516.1–77.

Уровни изоляции уменьшаются от воздушной к трансформаторной и машинной из экономических соображений, т. к. сделать более высоким разрядное напряжение значительно дешевле для воздушного промежутка, чем для изоляции трансформатора или машины (рис. 4.3).

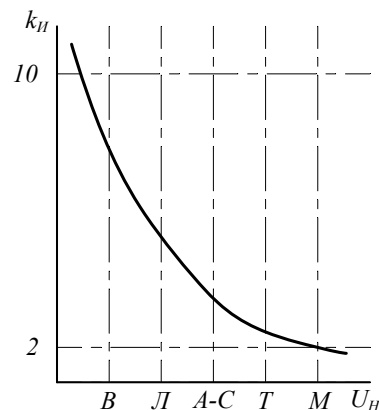


Рис. 4.3. Зависимость уровня изоляции от вида изоляции: В – воздушная; Л – линейная; А–С – аппаратно-станционная; Т – трансформаторная; М – машинная; $k_{и}$ – уровень изоляции; U_n – номинальное напряжение сети

С ростом номинального напряжения из экономических соображений уровни изоляции также уменьшаются (рис. 4.4).

Таким образом, имеются противоречивые требования. С одной стороны, уровни изоляции уменьшаются от воздушной к машинной. С другой стороны, важность (роль) изоляции для аппарата и недопустимость отключения работы системы возрастает от машинной изоляции к воздушной, т. е. должна расти надежность работы системы с уменьшением уровня изоляции. Аналогичная ситуация наблюдается при рассмотрении изоляции различных классов напряжения. Уровень изоляции снижается от классов высокого напряжения (ВН) к сверхвысоким и ультравысоким напряжениям (СВН и УВН), а надежность систем должна расти от ВН к СВН и от СВН к УВН. В этом заключается суть координации уровней изоляции и уровней защиты изоляции.

Уровень защиты изоляции:

$$k_3 = \frac{U_3}{U_{\text{фмд}}}, \quad (4.5)$$

где U_3 – напряжение срабатывания защитного устройства.

При правильной координации изоляции $k_3 < k_n$.

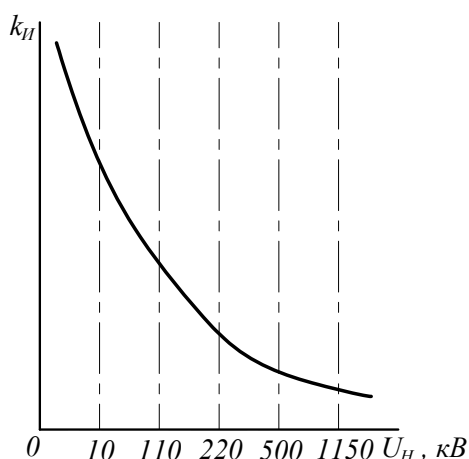


Рис. 4.4. Зависимость уровня изоляции $U_{Из}$ от номинального напряжения сети U_N

Координация изоляции – это правильный экономически обоснованный выбор уровней изоляции и уровней испытательных напряжений отдельных высоковольтных объектов и согласование этих уровней с характеристиками защитных разрядников (устройств). Большие запасы по изоляции экономически неприемлемы. Недостаточные запасы по изоляции неприемлемы из-за ущерба от перебоев в снабжении. Стратегия здесь такова – выбрать уровни изоляции элементов по условиям надежной длительной работы в нормальном эксплуатационном режиме (по $U_{\text{фмд}}$) и выбрать уровни защитных устройств с учетом возможных перенапряжений (их величины, кратности, длительности, вероятности появления), то есть ограничить их до нормально допустимых или, как говорят, "привести изоляцию к норме". Такая стратегия дает оптимальные результаты с экономической точки зрения.

Для координации изоляции требуется знать возможные кратности коммутационных и грозовых перенапряжений, а также вероятность их появления в системе.

4.3. Волновые процессы в линиях

При любом электромагнитном возмущении в линии возникают волновые процессы (включение и отключение линии, к. з., поражение линии грозой и т. д.). Электромагнитное возмущение в какой-либо точке линии вызывает движение волн от этой точки в обоих направлениях. Отражение и преломление этих волн определяют напряжения на линиях и подстанциях. Поэтому до изучения вопросов грозозащиты ЛЭП и подстанций целесообразно рассмотреть волновые процессы в высоковольтных линиях, цепях с разрядниками, высоковольтных трансформаторах.

4.3.1. Волновые процессы в длинных линиях

Волновой процесс в линии бесконечной длины (рис. 4.5) описывается так называемыми телеграфными уравнениями:

$$\begin{cases} -\frac{\partial U}{\partial x} = r_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = g_0 U + C_0 \frac{\partial U}{\partial t} \end{cases} \quad (4.6)$$

Потери энергии при движении электромагнитной волны (ЭМВ) в линии определяются активным сопротивлением на единицу длины r_0 и удельной проводимостью g_0 (проводимость изоляции, короны).

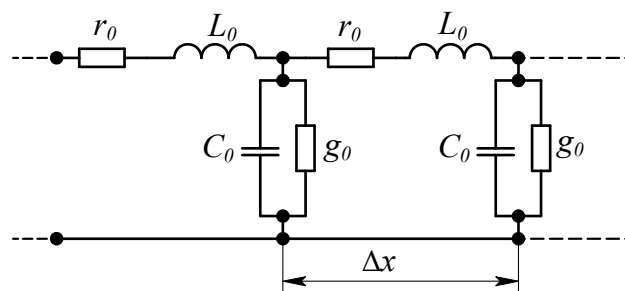


Рис. 4.5. Схема замещения одиночной линии: r_0 – активное сопротивление на единицу длины линии (удельное сопротивление); g_0 – активная проводимость изоляции на единицу длины линии (удельная проводимость); C_0 – емкость провода на единицу длины линии (удельная емкость); L_0 – индуктивность на единицу длины линии (удельная индуктивность)

Для линии без потерь $r_0 \approx 0$, $g \approx 0$ система телеграфных уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} -\frac{\partial U}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \frac{\partial U}{\partial t} \end{cases} \quad (4.7)$$

В линиях без потерь электромагнитная волна движется вдоль провода, который служит лишь направляющим, электромагнитное поле находится целиком в диэлектрической среде. Скорость распространения электромагнитной волны вдоль линии без потерь можно определить исходя из уравнения:

$$v \approx \frac{v_c}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (4.8)$$

где v – скорость распространения электромагнитной волны; v_c – скорость света в вакууме; ϵ – диэлектрическая постоянная среды; μ – магнитная проницаемость среды.

Для воздуха $\epsilon = 1$ и $\mu = 1$, поэтому в воздухе электромагнитная волна распространяется со скоростью $v \approx v_c$ без искажения и затухания.

Решение телеграфных уравнений (из курса ТОЭ) для линии без потерь может быть представлено в виде волновых функций тока и напряжения через пространственную координату для заданного момента времени t в функции от расстояния x :

$$\begin{cases} U = u(x \pm vt) \\ i = i(x \pm vt) \end{cases} \quad (4.9)$$

или

$$\begin{cases} U = u(x - vt) + u(x + vt) \\ i = i(x - vt) + i(x + vt) \end{cases} \quad (4.10)$$

Т. е. волна тока и волна напряжения могут быть представлены в виде суммы 2-х волн движущихся в противоположные стороны со скоростью v без изменения формы.

Например, грозовой импульс $\tau_\phi/\tau_B = 1,2/50$ мкс в координатах расстояния будет представлен для воздушной ЛЭП ($v_c \approx 300 \cdot 10^6$ м/с): фронт импульса $\tau_\phi = 1,2 \cdot 10^{-6} \cdot 300 \cdot 10^6 = 360$ м, длина импульса $\tau_B = 50 \cdot 10^{-6} \cdot 300 \cdot 10^6 = 15000$ м.

В кабеле скорость волны меньше ($\epsilon \approx 2,3$, $v_c \approx 150 \cdot 10^6$ м/с), поэтому грозовой импульс в координатах расстояния будет представлен: $\tau_\phi = 180$ м; $\tau_B = 7500$ м.

Полупериод синусоиды промышленной частоты $f = 50$ Гц ($T/2 = 0,01$ с) распространится за $T/2$ на расстояние $0,01 \cdot 3 \cdot 10^8 = 3000$ км для воздушной линии или на 1500 км для кабельной линии.

Скорость движения волны по линии может быть определена через параметры линии L_0 и C_0 :

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}. \quad (4.11)$$

Параметр, который устанавливает связь между U и I линии (или между электромагнитной и магнитной энергией в электромагнитной волне), называют волновым или характеристическим сопротивлением линии ($Z_{\text{л}}$), которое не зависит от длины линии:

$$Z_{\text{л}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}. \quad (4.12)$$

Для однопроводной линии, схема которой приведена на рис. 4.6:

$$L_0 = \frac{\mu \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{2h}{r}; \quad (4.13)$$

$$C_0 = \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{2h}{r}}; \quad (4.14)$$

$$Z_{\text{л}} = 60 \cdot \ln \frac{2h}{r}. \quad (4.15)$$

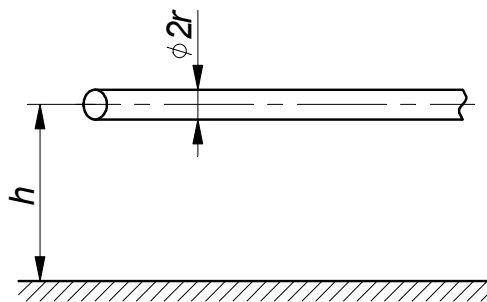


Рис. 4.6. Схема для расчета волнового сопротивления однопроводной линии

Так как h и r находятся под логарифмом, в целом волновое сопротивление воздушных ЛЭП разных классов напряжения мало изменяется с изменением h и r . Например, для воздушных ЛЭП с расщепленной фазой $Z_{\text{л}} = 350 \div 400$ Ом, без расщепления — $Z_{\text{л}} = 450 \div 550$ Ом. Для кабеля $Z_{\text{л}} = 20 \div 50$ Ом из-за большой C_0 и малой L_0 .

4.3.2. Преломление и отражение волн в узловых точках

Узловой точкой линии называют такую точку, в которой скачком изменяется соотношение между электрическим и магнитным полем, т. е. изменяется волновое сопротивление линии $Z_{\text{л}}$. Для расчета преломленных и отраженных волн в узловых точках используют эквивалентную схему замещения линии с распределенными параметрами на линию с сосредоточенными параметрами по правилу Петерсена (рис. 4.7).

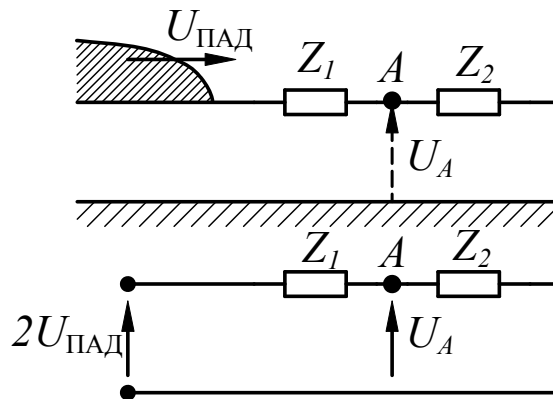


Рис. 4.7. Эквивалентная схема замещения длинной линии по правилу Петерсена для расчета преломленных и отраженных волн в узловой точке A : $U_{\text{пад}}$ – падающая волна напряжения; Z_1 – волновое сопротивление длинной линии, по которой падает волна напряжения; Z_2 – волновое сопротивление длинной линии после точки неоднородности; A – узловая точка (место неоднородности); U_A – напряжение в узловой точке

Рассмотрим несколько примеров отражения и преломления волн в узловых точках при бесконечной падающей волне с прямоугольным фронтом.

1. Конец линии (точка A) разомкнут, $Z_2 = \infty$.

Падающая волна напряжения отражается полностью с тем же знаком и в точке A , на конце линии, напряжение удваивается:

$$U_A = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot U_{\text{пад}} = 2U_{\text{пад}}. \quad (4.16)$$

Для волны тока: $i_2 = 0$, т.е. преломленный ток равен нулю:

$$I_2 = 0. \quad (4.17)$$

Падающая волна тока отражается от разомкнутого конца полностью с обратным знаком и ток в линии равен нулю.

2. Линия в конце (т. A) закорочена, $Z_2 = 0$.

Падающая волна напряжения отражается полностью от короткозамкнутого конца линии с обратным знаком, напряжение в т. A равно нулю, а волна тока отражается с тем же знаком и удваивается.

3. Линия в конце (т. A) согласована, т. е. $Z_1 = Z_2 = Z$.

Нетрудно видеть, что в этом случае падающие волны напряжения и тока не испытывают отражений и преломлений при падении на согласованное Z .

4. Линия присоединена к шинам подстанции, от которой отходит n таких же линий (рис. 4.8). По линии приходит волна на шины подстанции.

Общее количество линий, присоединенных к шинам подстанции равно n , требуется определить напряжение на шинах:

$$\sum Z_n = \frac{Z}{n-1}. \quad (4.18)$$

Напряжение на шинах $U_{ш} = 2 U_{пад}/n$. При:
 $n = 1$, т. е. тупиковая подстанция, $U_{ш} = 2U_{пад}$;
 $n = 2$, т. е. проходная подстанция, $U_{ш} = U_{пад}$;
 $n > 2$, т.е. многофидерная подстанция, $U_{ш} < U_{пад}$.

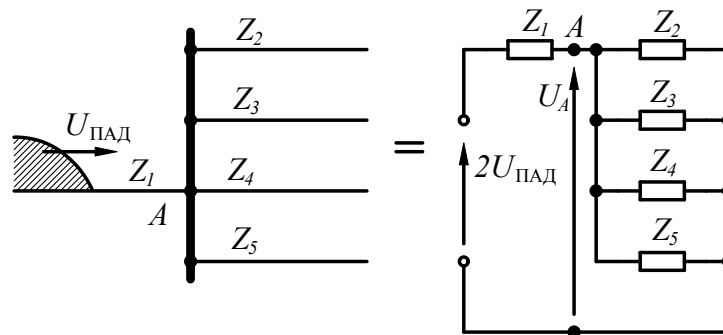


Рис. 4.8. Схема замещения для расчета падающих и отраженных волн от узловой подстанции: $Z_2 - Z_5$ – общее количество линий, присоединенных к шинам подстанции

5. Переход волны с воздушной ЛЭП в кабель (рис. 4.9):

$$U_A = 2U_{пад} \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (4.19)$$

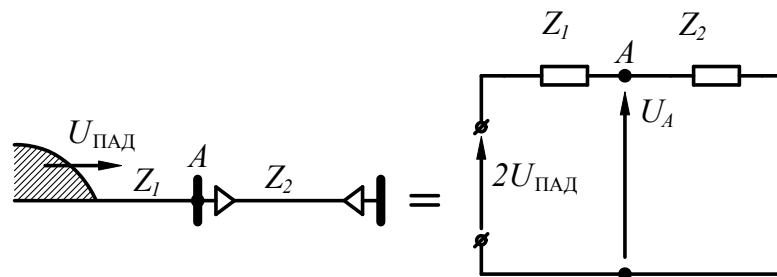


Рис 4.9. Схема замещения для расчета перехода волны с воздушной ЛЭП в кабель: $Z_1 = 350-400$ Ом (для расщепленных фаз); $Z_1 = 450-550$ Ом (для нерасщепленных фаз); $Z_2 = 50 - 20$ Ом.

Рассчитанная при этих условиях амплитуда волны напряжения в кабеле уменьшается в 10 – 25 раз, а волна тока в кабеле увеличивается почти в 2 раза (точнее на 90 – 98%).

6. В конце линии включена емкость C (емкость шин на землю, емкость коротких кабелей на землю и т. д.). Это практический случай для оценки формы импульса напряжения на шинах подстанции при падении волны с прямоугольным фронтом (рис. 4.10).

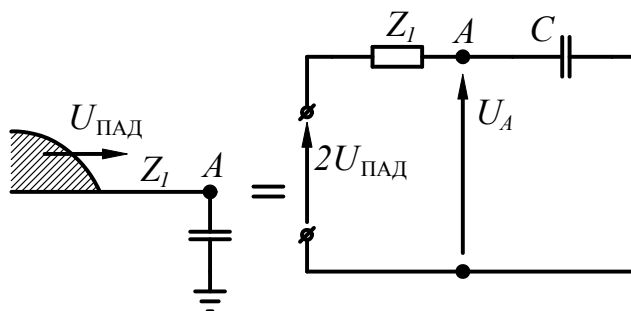


Рис. 4.10. Падение волны напряжения на шины подстанции

$$U_A = U_C = 2U_{\text{пад}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{Z_1 C}} \right). \quad (4.20)$$

Прямоугольный фронт волны сглаживается с постоянной времени $T = Z_1 \cdot C$. Обычно емкость шин и подключенных аппаратов лежит в пределах 1000...5000 пФ, при $Z_1 = 500$ Ом, $T = 0,5-2,5$ мкс.

7. В конце линии включена индуктивность (рис. 4.11).

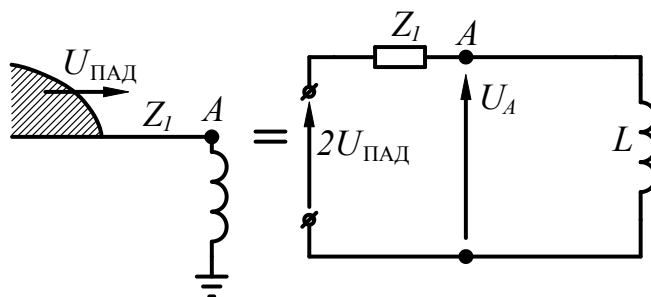


Рис. 4.11. Падение волны напряжения на индуктивную нагрузку

$$U_L = 2U_{\text{пад}} \cdot e^{-\left(\frac{Z_1 \cdot t}{L}\right)}. \quad (4.21)$$

У приходящей на подстанцию волны при подключении к шинам реактора (индуктивности) фронт не сглаживается (не уменьшается крутизна фронта), а напряжение на шинах возрастает, как на тупиковой подстанции, т. е. удваивается.

Грозовые волны имеют относительно малую длину, кроме того, на подстанцию часто приходят волны, срезанные трубчатым разрядником (с крутым спадом), короткую волну можно представить как воздействие 2-х падающих волн (положительной и отрицательной) сдвинутых во времени на длину волны τ_B .

4.3.3. Определение напряжения на вентильном разряднике при воздействии волны грозового перенапряжения

Эквивалентная схема замещения приведена на рис. 4.12.

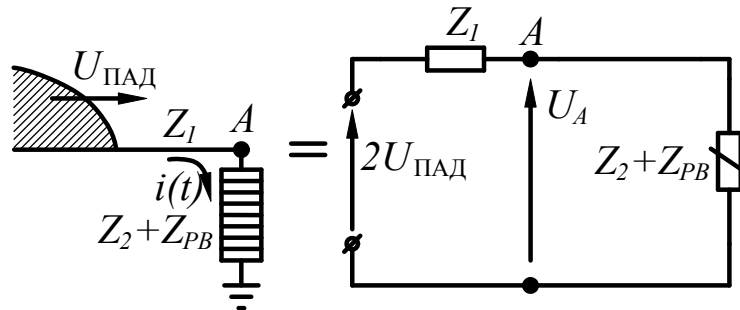


Рис. 4.12. Схема воздействия волны перенапряжения на вентильный разрядник: $Z_{РВ}$ – нелинейное сопротивление вентильного разрядника

Напряжение на вентильном разряднике определяется исходя из уравнения $2U(t) = i_1 \cdot Z_1 + U_{РВ}$, где $U(t)$ – напряжение волны, распространяющейся по линии; Z_1 – волновое сопротивление линии; $i(t)$ – ток через вентильный разрядник; $U_{РВ}$ – напряжение на вентильном разряднике.

Расчет производится графо-аналитическим методом. Задается $U(t)$, вольт-секундная характеристика искрового промежутка вентильного разрядника (ВСХ), вольт-амперная характеристика нелинейного элемента (ВАХ), волновое сопротивление линии Z_1 (рис. 4.14). Момент прихода волны перенапряжения $U(t)$ в точку установки вентильного разрядника (точка А, конец линии) примем за ноль. Напряжение на искровом промежутке вентильного разрядника будет изменяться по кривой $2U(t)$ (удвоение напряжения произошло из-за того, что конец линии разомкнут, $Z_2 = \infty$). В момент времени t_1 , когда напряжение $2U(t)$ достигнет значения пробивного напряжения искрового промежутка вентильного разрядника (точка 1 на рис. 4.13 – пересечение $2U(t)$ с вольт-секундной характеристикой), происходит срабатывание вентильного разрядника и подключение нелинейного резистора к точке А. При этом мгновенно напряжения $2U(t)$ (точка 1а) перераспределяется между нелинейным сопротивлением вентильного разрядника и волновым сопротивлением линии (точки 1б и 1г). Напряжение в точке А мгновенно изменяется от значения точки 1 до значения в точке 1в. Далее, вследствие нелинейной вольтамперной характеристики вентильного разрядника напряжение в точке А в широком диапазоне токов через вентильный разрядник в течение времени прохождения волны перенапряжения мало изменяется. Максимум остающегося напряжения на вентильном разряднике (точка 2в) будет наблюдаться в момент t_2 , когда импульс перенапряжения $2U(t)$ достигает амплитудного значения (точка 2).

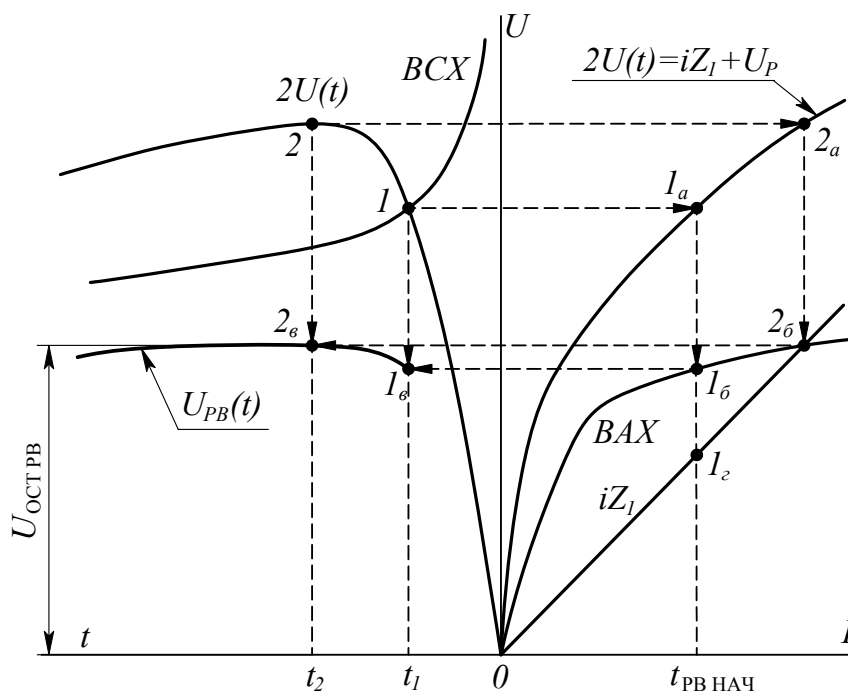


Рис. 4.13. Определение остающегося напряжения на нелинейном сопротивлении вентильного разрядника $U_{PB}(t)$ при срабатывании вентильного разрядника: BCX – вольт–секундная характеристика искрового промежутка вентильного разрядника; VAX – вольт–амперная характеристика нелинейного элемента

4.3.4. Многократные отражения в линиях конечной длины

Всякая линия может рассматриваться как линия бесконечной длины до момента времени t пока к точке отсчета "x" не пришла отраженная волна от другой узловой точки, т. е. в течение времени $t \leq 2l/v$, где l – расстояние от точки "x" до точки неоднородности линии l . После прихода отраженной волны для оценки напряжения U_x в точке "x" следует учитывать воздействие отраженных и преломленных волн.

Рассмотрим простейший случай: переход прямоугольной волны с линии Z_1 в линию Z_2 через линию конечной длины AB с волновым сопротивлением Z (рис. 4.14). Будем считать, что l_1 и $l_2 \gg l$, т. е. Z_1 и Z_2 две бесконечных по длине линии.

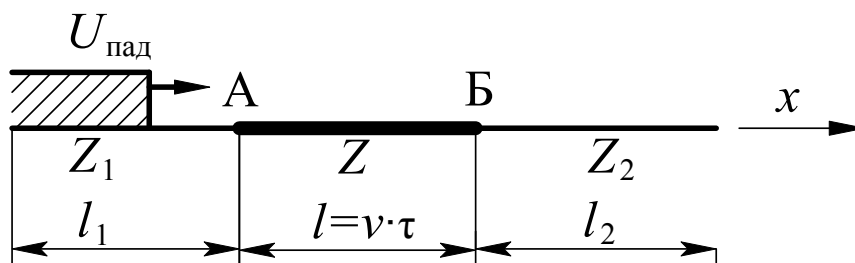


Рис. 4.14. Эквивалентная схема неоднородного участка длинной линии для расчета отраженных и преломленных волн: v – скорость движения волны по линии AB; τ – время пробега волны по линии AB

В случае равенства $Z_1 = Z_2$ нетрудно показать с применением схемы замещения по правилу Петерсена, что в момент прихода дважды преломленной волны через точки неоднородности А и Б напряжение в точке Б всегда будет меньше $U_{\text{пад}}$. Напряжение в точке Б в последующее время будет зависеть от отражения и преломления падающей волны $U_{\text{пад}}$ от точек неоднородности А и Б. Отраженные и преломленные волны в точке Б будут появляться через время двойного пробега волны по линии АБ $t = 2 \frac{l}{v}$. Возникший переходный процесс, связанный с многократными отражениями и преломлениями в точках неоднородности, можно просчитать используя принцип наложения, т. е. напряжение в каждой узловой точке равно сумме преломленных и отраженных волн.

После бесконечного числа отражений напряжение в Z_2 достигает того же значения, которое было бы при переходе волны с Z_1 на Z_2 при отсутствии линии АБ.

4.3.5. Искажение и затухание волн

В приведенных примерах рассмотрено движение волн в линиях без потерь. В реальных ЛЭП движение электромагнитной волны происходит с затуханием и искажением. Деформация волны должна учитываться при расчетах перенапряжений и схем защиты от них.

Обозначим факторы, которые определяют потери энергии и деформации электромагнитной волны:

1) активное сопротивление провода и активное сопротивление земли:

$$r_{\Sigma} = R_{\text{пр}} + R_{\text{зем}}; \quad (4.22)$$

2) импульсная корона.

Наличие активного сопротивления провода и земли вызывает потери энергии, что выражается в уменьшении амплитуды и увеличении длины и фронта волны. Основное влияние оказывает активное сопротивление земли, особенно при плохих грунтах, т. к. потерями в проводе для этой задачи можно пренебречь. На высокой частоте (при грозových импульсах) в массивном проводнике "провод-земля" резко проявляется поверхностный эффект, т. е. линии тока в земле подтягиваются к поверхности земли и активное сопротивление земли возрастает. Прямоугольный фронт сглаживается до косоугольного. Длина фронта (от прямоугольного) может быть рассчитана по формуле:

$$\tau_{\text{фр}} = \frac{\rho_3 \cdot l^2}{2 \cdot 60 \cdot h_{\text{ср}}^2 \cdot Z^2}, \text{ (мкс)} \quad (4.23)$$

где $\tau_{\text{фр}}$ – длительность фронта электромагнитной волны после пробега расстояния l ; ρ_3 – удельное сопротивление грунта в Ом·м; l – длина пробега электро-

магнитной волны в метрах; Z – волновое сопротивление линии в Ом; $h_{\text{ср}}$ – средняя высота подвеса провода в метрах.

При $\rho_3 = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $Z = 400 \text{ Ом}$, $h = 10 \text{ м}$, $l = 1 \text{ км}$ получим $\tau_{\text{Ф}} = 0,25 \text{ мкс}$.

Уменьшение амплитуды волны напряжения от расстояния при прямом ударе молнии в провод можно подсчитать по формуле:

$$U = U_0 \cdot e^{-a\sqrt{l_x}}, \quad (4.24)$$

где l_x – длина пробега от точки прямого удара молнии в км; U_0 – начальная амплитуда перенапряжения; a – коэффициент затухания.

Для ЛЭП 110 кВ и выше $a = 0,07 \text{ км}^{-0,5}$.

Из опытных данных $\Delta U = U_0/U = 0,9$ на 1 км, т. е. снижение амплитуды на 10% на 1 км, причем, большую деформацию испытывают волны на крайних проводах.

Более существенное влияние на потери энергии и деформацию электромагнитной волны оказывает импульсная корона. При прямом ударе молнии в ЛЭП на проводах возникают волны перенапряжения амплитудой до 1МВ. Когда амплитуда волны перенапряжения будет выше начального напряжения короны, возникает интенсивная импульсная корона, которая является благоприятным фактором для затухания и удлинения фронта волн перенапряжения.

Грозовые волны чаще имеют отрицательную полярность, поэтому расчет искажения волн перенапряжения делается для отрицательной короны. Вследствие наличия значительного дополнительного заряда в чехле импульсной короны – удельная емкость провода относительно земли C_0 увеличивается, т. к.:

$$C_0 = \frac{Q}{U}, \quad (4.25)$$

где Q – заряд на проводе на единицу длины линии (удельный заряд);

U – напряжение провод–земля.

Увеличение C_0 приводит к снижению скорости распространения волны v :

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 \cdot C_0}}, \quad (4.26)$$

где L_0 – удельная индуктивность линии; C_0 – удельная емкость линии.

Изменение скорости распространения волны и удельной емкости линии приводит к изменению волнового сопротивления линии. Найдена эмпирическая формула для нахождения волнового сопротивления линии при коронировании:

$$Z_{\text{к}} \approx \frac{Z_0}{\sqrt{1 + BU}}, \quad (4.28)$$

где $Z_{\text{к}}$ – волновое сопротивление линии при коронировании;

$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$ – волновое сопротивление линии при отсутствии короны.

Для определения коэффициента B можно воспользоваться графиком, приведенным на рис. 4.15.

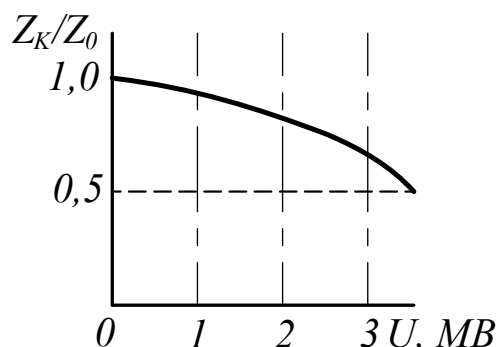


Рис. 4.15. Влияние напряжения на относительное волновое сопротивление ЛЭП при коронировании

Для расчетов можно брать:

- для одиночного провода $Z_k = 400$ Ом;
- для двух тросов $Z_k = 250$ Ом;
- для провода расщепленного на два $Z_k = 370$ Ом;
- для провода расщепленного на три $Z_k = 300$ Ом.

Снижение Z_k приводит к увеличению коэффициента связи k_k между проводами ЛЭП относительно коэффициента связи k_0 линии без потерь:

$$k_k = k_0 \cdot \frac{Z_0}{Z_k} \approx (1 + BU) \cdot k_0. \quad (4.29)$$

Коэффициент связи k_k для ЛЭП из-за импульсной короны увеличивается на 10–15%.

В результате всех потерь происходит искажение формы волны перенапряжения, как показано на рис. 4.16.

Удлинение фронта импульса $\Delta\tau_\phi$ на 1 км под действием импульсной короны можно оценить по формуле:

$$\Delta\tau_\phi = \left(0,5 + \frac{0,008 \cdot U_{\text{пад}}}{h_{\text{CP}}} \right) \cdot \frac{l}{k}, \quad (4.30)$$

где h_{CP} – средняя высота подвески проводов;

$U_{\text{пад}}$ – амплитуда полной волны;

l – длина пробега волны;

k – коэффициент, зависящий от количества проводов в фазе и определяемый по данным табл. 4.1.

Зависимость коэффициента k от числа проводов в фазе n_ϕ

k	1,0	1,1	1,45	1,55
Количество проводов в фазе, n_ϕ	1	2	3	4 и более

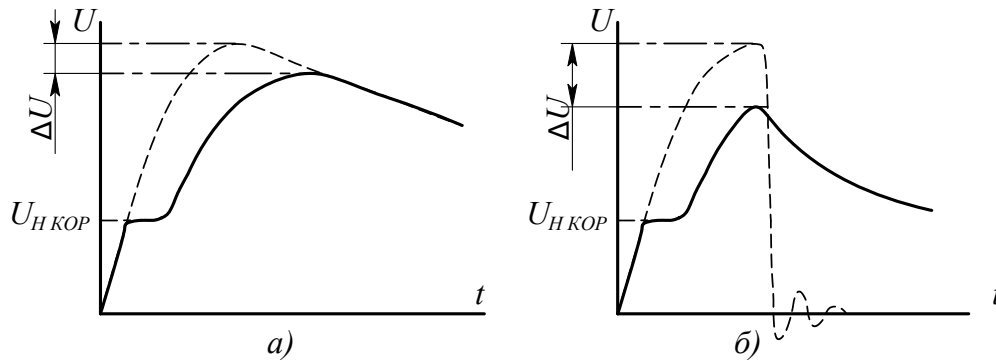


Рис. 4.16. Искажение волн перенапряжения импульсной короной: а – полная волна; б – срезанная волна

У короткой срезанной волны снижение амплитуды больше (рис. 4.17, б).

4.4. Волновые процессы в трансформаторах

Волны грозовых ПН, приходящие на подстанцию, воздействуют на обмотки трансформаторов, в трансформаторе происходит электромагнитный процесс, приводящий к перенапряжениям:

- между частями обмотки (слои, витки, катушки);
- между обмотками ВН и НН;
- между обмоткой ВН и заземленными частями трансформатора (корпус, железо).

Длина проводов в обмотках трансформатора ВН может достигать несколько километров, поэтому волновые процессы в обмотках имеют некоторую аналогию с процессами в длинных ЛЭП, однако они гораздо сложнее из-за ряда особенностей, присущих трансформаторам. Например, в схеме замещения одной фазы катушечной обмотки трансформатора, приведенной на рис. 4.17, а, следует учитывать (кроме сопротивления обмоток $R_{\text{акт}}$ и проводимости диэлектрика $g_{\text{акт}}$, которые малы):

- емкость между катушками (витками) – продольная емкость K ;
- взаимную индуктивность $M(x)$ каждого витка со всеми остальными витками обмотки.

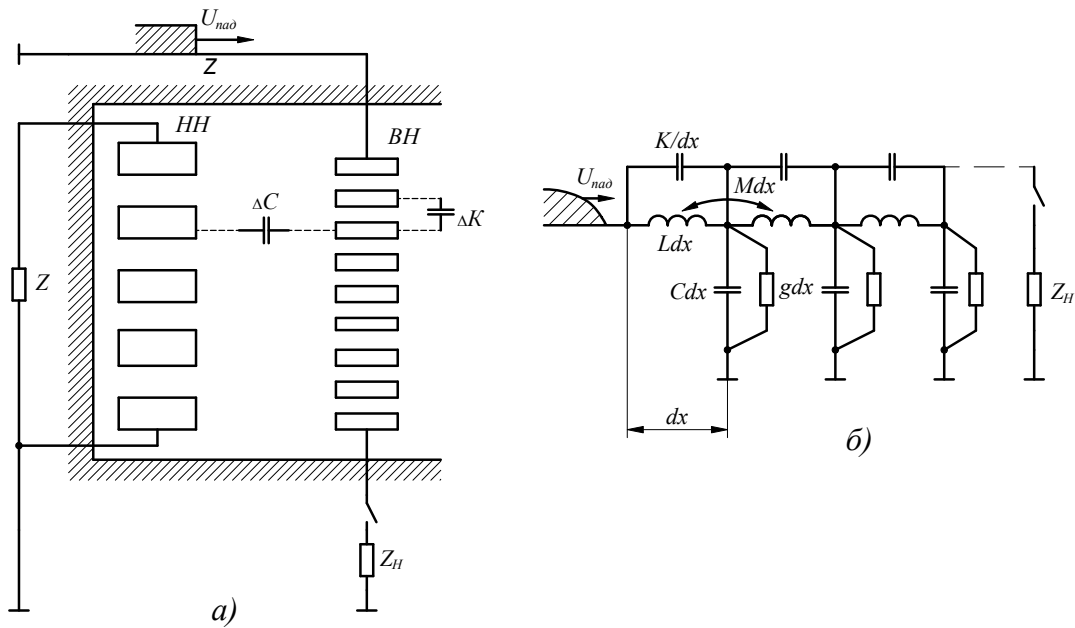


Рис. 4.17. Конструктивная схема (а) и электрическая схема замещения (б) высоковольтного трансформатора: Z_H — сопротивление нейтрали трансформатора

В первом приближении представим схему замещения обмотки трансформатора с учетом трех основных параметров L , C и K (средние значения на единицу длины обмотки) без учета g и R , которые относительно малы, поэтому ими можно пренебречь (рис. 4.17, б).

Рассмотрим переходные процессы в обмотках трансформатора. При падении волн на обмотку ВН обмотку НН (рис. 4.18) можно считать заземленной и закороченной, т. к. отходящие линии имеют волновое сопротивление много меньше, чем волновое сопротивление обмотки трансформатора (например, $Z_{л} = 10 \div 400 \text{ Ом}$, $Z_{тр} = 1000 \div 10000 \text{ Ом}$). Переходный процесс зависит от:

- схемы соединения обмоток;
- режима нейтрали;
- количества фаз, по которым падает волна (по одной, двум или трем).

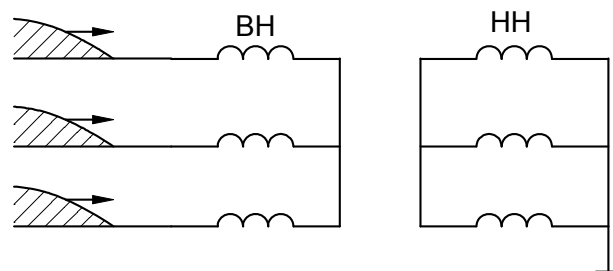


Рис. 4.18. Схема набегания волн перенапряжения на обмотку ВН трансформатора

Для простоты рассмотрим основные закономерности на примере однофазной катушечной обмотки в случае падения прямоугольной бесконечной волны.

Весь переходный процесс делим на три стадии:

а) начальный процесс ($t = 0$).

б) установившийся процесс ($t \geq t_{уст}$).

г) переходный процесс $0 < t < t_{уст}$ (свободное колебание).

Схема замещения однофазной катушечной обмотки трансформатора для начального процесса приведена на рис. 4.20, а.

Графическое изображение начального распределения напряжения $U_{нач}$ при $t = 0$ приведено на рис. 4.19, б.

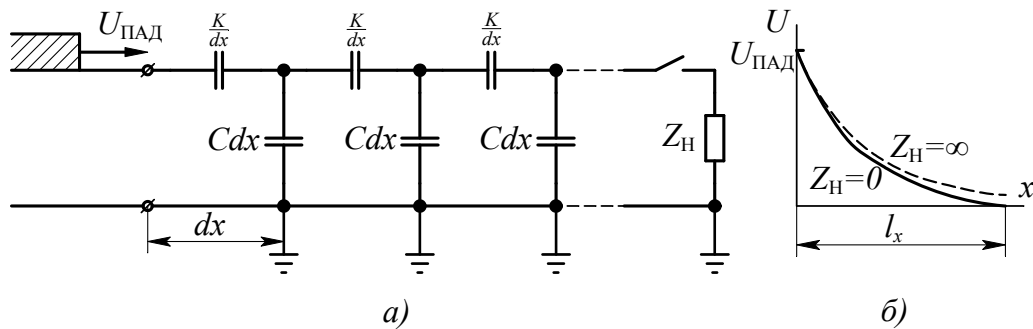


Рис. 4.19. Начальное распределение напряжения по обмотке трансформатора: а – электрическая схема замещения для начального процесса ($t=0$); б – распределение напряжения вдоль обмотки для $t=0$

Распределение установившегося напряжения вдоль обмотки трансформатора при $Z_H = 0$ (нейтраль заземлена) приведено на рис. 4.20, а. Начальное распределение напряжения будет переходить к установившемуся в колебательном режиме, совершая затухающие колебания относительно кривой распределения напряжения в установившемся режиме. В результате, огибающая максимальных значений напряжения вдоль обмотки трансформатора будет иметь вид, приведенный на рис. 4.20, а. Максимум перенапряжений, возникающий в переходный период, приходится на обмотку примерно на расстоянии $l_x \approx (0,1 - 0,2) \cdot l$.

Распределение напряжения вдоль обмотки трансформатора с изолированной нейтралью приведено на рис. 4.20, б. В этом случае наибольшие напряжения в переходном режиме появляются на изолированной нейтрали обмотки.

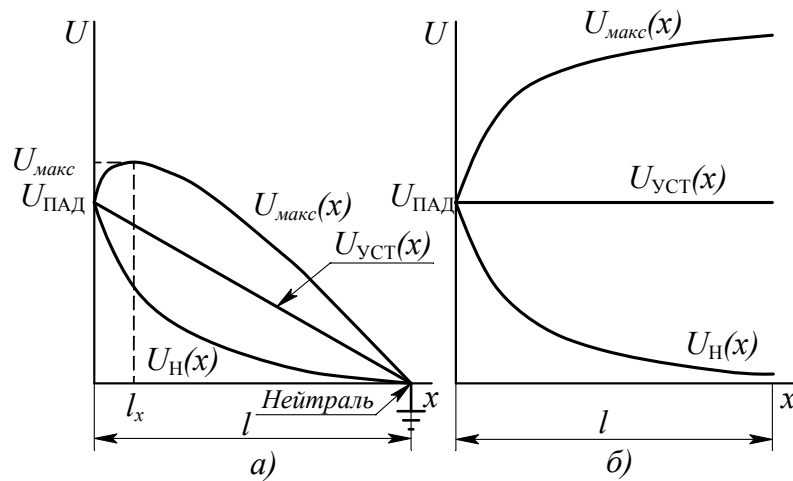


Рис. 4.20. Распределение напряжения вдоль обмотки трансформатора в разных стадиях: а – сопротивление нейтрали равно нулю; б – сопротивление нейтрали равно бесконечности

Для обмоток трансформаторов особенно опасны срезанные волны, т. е. волны с крутыми спадами (срезами), при срабатывании защитных разрядников или перекрытий вблизи трансформаторов.

Все практические случаи падения волн ПН на трансформаторы могут быть получены методом суперпозиции, исходя из двух рассмотренных примеров.

Передача волн ПН из одной обмотки в другую. При падении электромагнитной волны на одну из обмоток трансформатора, электромагнитные процессы в ней возбуждают высокие потенциалы в другой обмотке. Возможны 2 вида передачи ВН.

1. Емкостная передача потенциала в трансформаторах (рис. 4.21).

Обычно в высоковольтных трансформаторах емкость на землю обмотки высокого напряжения много меньше, чем емкость на землю обмотки низкого напряжения, т.е. $C_{11} \ll C_{22}$. Эквивалентная схема замещения, представленная на рис. 4.21, б, позволяет оценить напряжение на вторичной обмотке в зависимости от напряжения волны, пришедшей на первичную обмотку:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_{12} + C_{22}}{C_{12}},$$

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{22}} = U_1 \cdot \frac{1}{1 + \frac{C_{22}}{C_{12}}}. \quad (4.31)$$

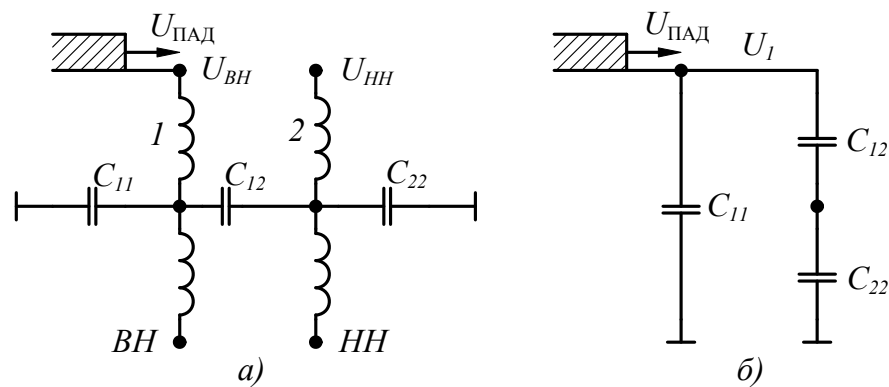


Рис. 4.21. Емкостная передача электромагнитной волны между обмотками трансформатора при приходе волны перенапряжения по одной из фаз: а – общая схема замещения; б – эквивалентная электрическая схема для расчета

При емкостной передаче электромагнитной волны между обмотками трансформатора коэффициент трансформации не играет роли и зависит от $\frac{C_{22}}{C_{12}}$. Значительные потенциалы могут быть на обмотке 2 (НН), только когда C_{22} мало.

2. Электромагнитная передача напряжения в трансформаторах. Падение волны на обмотку НН представлено на рис. 4.22.

В этом случае возможны два варианта:

а) Если фазы ВН присоединены к ЛЭП, то рост потенциала будет незначителен как в начале, так и в середине обмотки.

б) Если фазы АВС отсоединены от ЛЭП, то:

$$U_A = U_B \approx U_{\text{пад}} \cdot k_{\text{тр}}, \quad (4.32)$$

где $k_{\text{тр}}$ — коэффициент трансформации.

Это опасный режим и для внутренней и для внешней изоляции трансформатора. Следовательно, нужна установка защитных аппаратов от перенапряжений на выводах трансформатора.

Например: $U_{\text{пад}} = 10 \text{ кВ}$, $k_{\text{тр}} = 10/0,4 = 25$. При таких условиях $U_{ABC} = U_{\text{пад}} \cdot k_{\text{тр}} = 250 \text{ кВ}$, т. е. для трансформатора класса 10 кВ это напряжение в 3 раза выше испытательного (75...80 кВ).

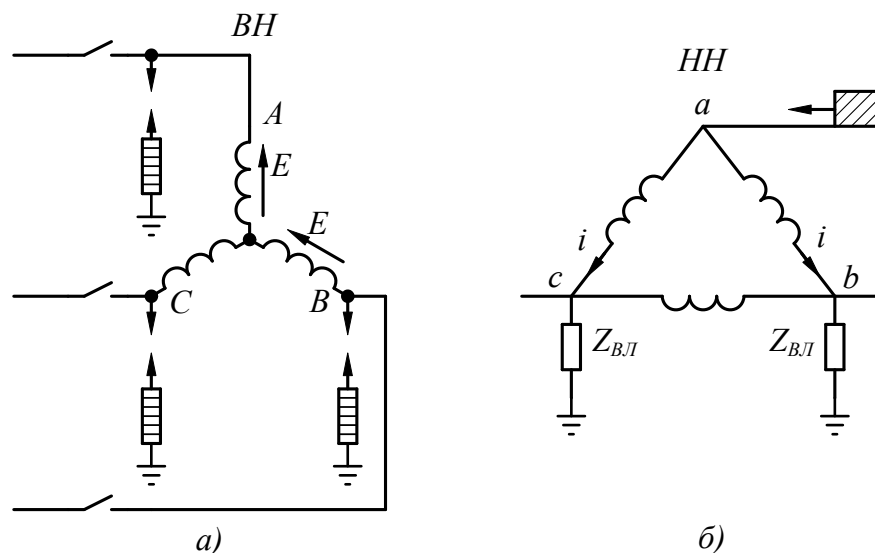


Рис. 4.22. Электромагнитная передача напряжения с обмотки низкого напряжения в обмотку высшего напряжения при падении волны перенапряжения на обмотку низкого напряжения: а – схема высоковольтной обмотки, б – схема низковольтной обмотки

Если обмотки A, B, C приземлены через волновые сопротивления ЛЭП, то на фазах A, B, C сохраняется нулевой потенциал, а возбуждаемая э. д. с. повышает потенциал нейтрали. Отсюда можно сделать вывод: сети НН тоже нуждаются в защите от атмосферных перенапряжений, нужна установка трех защитных аппаратов на НН трансформатора, которые ограничивают амплитуду напряжения до 2,5–3 кВ.

4.5. Атмосферные перенапряжения

4.5.1. Параметры молнии

Молния – это электрический разряд между облаком и землей или между облаками. На начальной, лидерной стадии, молния представляет собой относительно медленно развивающийся слабо светящийся канал (лидер). Зона ионизации лидера имеет избыточный заряд того же знака, что и облако. Заряды облака и лидера индуцируют на поверхности земли и на расположенных на ней объектах заряды другого знака, которые могут инициировать встречные лидеры, имеющие заряды, по знаку обратные заряду лидера. Когда канал развивающегося от облака лидера приближается к земле или к одному из встречных лидеров, то между ними на расстоянии 25...100 м возникает высокая напряженность электрического поля, среднее значение которой оценивается в 10 кВ/см. Промежуток этот пробивается за несколько микросекунд, и в нем выделяется энергия порядка 0,5 – 5 МДж, которая расходуется на нагрев и термоионизацию. Проводимость этой части канала резко возрастает, и зона повышенной напряженности перемещается по направлению к облаку со скоростью от $1,5 \cdot 10^7$ до $1,5 \cdot 10^8$ м/с (0,05 – 0,5 скорости света). Процесс этот, называемый главным

разрядом, сопровождается сильным свечением канала разряда. Ток в канале за 5 – 10 мкс достигает десятков и даже одной – двух сотен килоампер, а затем за время 25 – 200 мкс спадает до половины амплитудного значения. Во время главного разряда происходит нейтрализация зарядов лидера.

К основным параметрам молнии относятся:

- амплитуда тока молнии (I_M) – кА;
- крутизна фронта тока молнии (a) – кА/мкс; $a = \frac{dI_M}{dt} \approx \frac{I_M}{\tau_\phi}$,

где τ_ϕ – длительность фронта тока молнии;

- вероятность амплитуды тока молнии – $P(I_M) = \exp(-0.04I_M)$,
- вероятность крутизны тока молнии – $P(a) = \exp(-0.08a)$,

где $P(I_M)$ и $P(a)$ – вероятности того, что соответственно ток молнии и крутизна будут равны или превысят заданные значения.

При расчетах молниезащиты ЛЭП, подстанций или других объектов важно знать интенсивность грозовой деятельности в данной местности, которая характеризуется средним числом грозовых часов в году – D_r . Другой характеристикой грозовой деятельности является среднее число ударов молнии $n_{уд}$ в 1 км² поверхности земли за 100 грозовых часов. Значение $n_{уд} = 6,7$ 1/км² за 100 грозовых часов.

4.5.2. Молниеотводы

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

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

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

Молниеотводы по типу молниеприемников разделяются на стержневые и тросовые. Стержневые молниеотводы выполняются в виде вертикально установленных стержней (мачт), соединенных с заземлителем, а тросовые – в виде

горизонтально подвешенных проводов. По опорам, к которым крепится трос, прокладываются токоотводы, соединяющие трос с заземлителем.

Открытые распределительные устройства подстанций защищаются стержневыми молниеотводами, а линии электропередачи – тросовыми. Для защиты шинных мостов и гибких связей большой протяженности также могут применяться тросовые молниеотводы.

4.5.2.1. Зоны защиты молниеотводов

Зона защиты одиночного молниеотвода высотой $h \leq 150$ м представляет собой круговой конус (рис. 4.23) с вершиной на высоте $h_0 < h$, сечение которого на высоте h_x имеет радиус r_x .

Границы зоны защиты находятся по формулам:

$$h_0 = 0,85h, \quad r_x = (1,1 - 0,002h)(h - h_x / 0,85). \quad (4.33)$$

Вероятность прорыва молнии через границу зоны не более $P_{\text{пр}1} = 0,005$.

Если допустить вероятность прорыва молнии $P_{\text{пр}2} = 0,05$, то зона защиты расширяется и описывается формулами:

$$h_0 = 0,92h, \quad r_x = 1,5(h - h_x / 0,92). \quad (4.34)$$

Зона защиты двух стержневых молниеотводов, находящихся вблизи друг от друга (на расстоянии, меньшем $(3 - 5)h$), расширяется по сравнению с зонами отдельных молниеотводов. Возникает дополнительный объем зоны защиты, обусловленный совместным действием двух молниеотводов. Зоны защиты двойного стержневого молниеотвода (рис. 4.24) описываются формулами, которые можно найти в специальной литературе. Если расстояние l между молниеотводами превышает $3h$ ($P_{\text{пр}} = 0,005$) или $5h$ ($P_{\text{пр}} = 0,05$), каждый из молниеотводов следует рассматривать как одиночный. Несколько близко расположенных молниеотводов (например, три и более) образуют «многократный» молниеотвод. Его зона защиты определяется зонами защиты ближайших молниеотводов.

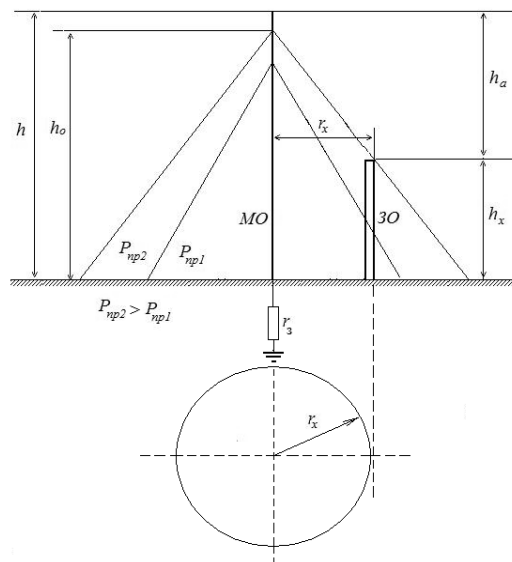


Рис. 4.23. Сечение зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода; MO – молниеотвод, ZO – защищаемый объект, h – высота молниеотвода, h_0 – верхняя точка зоны защиты молниеотвода при вероятности прорыва молнии $P_{нр2}$, h_x – высота защищаемого объекта, r_x – радиус зоны защиты на высоте h_x , r_3 – сопротивление заземления молниеотвода, h_a – активная высота молниеотвода.

При этом принимается, что внутренняя зона имеет вероятность прорыва такую же, как и зона взятых попарно молниеотводов.

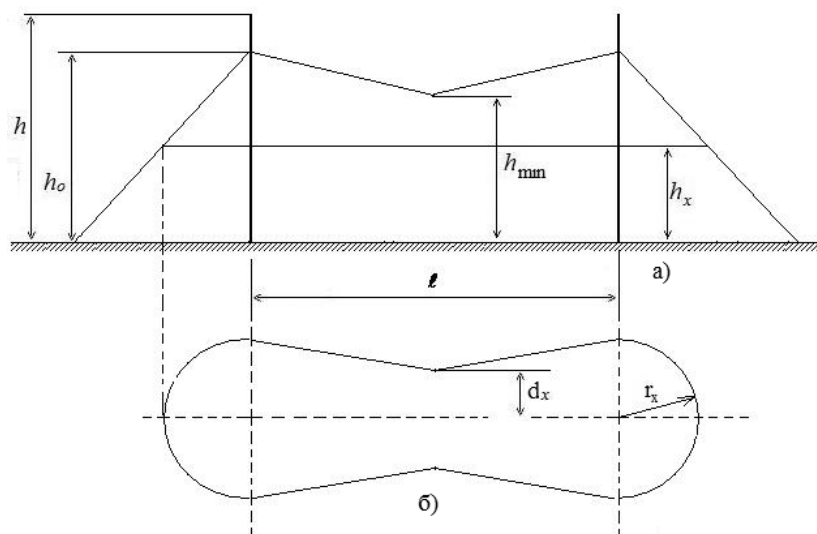


Рис. 4.24. Зона защиты двойного стержневого молниеотвода: а - сечение вертикальной плоскостью, проходящей через оси молниеотводов; б – сечение горизонтальной плоскостью на высоте h_x , h – высота молниеотвода, h_0 – верхняя точка зоны защиты, h_{min} – минимальная высота зоны защиты, l – расстояние между молниеотводами, d_x – минимальная полуширина зоны защиты на высоте h_x , r_x – радиус внешней зоны защиты на высоте h_x .

Научно-техническая революция обошла своим вниманием средства защиты от прямых ударов молнии. Стержневой молниеотвод, смонтированный сегодня самой передовой фирмой, практически не отличается от детища

Б. Франклина. До сих пор над защищаемым сооружением возвышается заземленный металлический штырь, который принимает на себя удар молнии, и делает это не слишком эффективно. Логично, что в этой ситуации любое новшество, например ESE-молниеотвод (от англ. early streamer emission, т. е. ранняя стримерная эмиссия) привлекает к себе внимание.

Стержневой молниеотвод высотой h даже на ровной незастроенной поверхности земли притягивает к себе почти все молнии с расстояния $R \approx h$. Но уже при $R \approx 3h$ половина молний минует молниеотвод и ударяет в землю, и чем дальше, тем слабее эффект притяжения. Рядом с высоким сооружением эффективность молниеотвода заметно снижается, потому что здесь работает не полная высота стержня, а лишь его часть, выступающая над защищаемым объектом. Увеличивать высоту молниеприемника можно, но это дорого и неэстетично. Конструктивным такое решение не назовешь.

Механизм молнии изучен достаточно хорошо, в том числе и механизм формирования встречного лидера – плазменного канала от вершины молниеотвода, что продвигается навстречу молнии и перехватывает ее.

В 1986 г. компания Indelec разработала молниеприемник Prevection (ESE), способный распознавать момент, когда удар молнии становится неизбежным, и инициировать восходящий стример навстречу нисходящему разряду. Внешний вид молниеприемника типа Prevection (ESE) приведен на рис. 4.25.

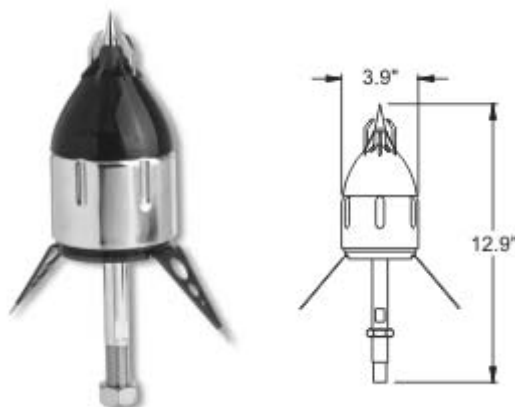


Рис. 4.25. Молниеприемник Provectron 2 Millenium

Главная особенность продукта – уникальная запатентованная микросхема Prevestron, которая в реальном времени рассчитывает скорость изменения напряженности электрического поля. Когда лидер молнии спускается, скорость изменения напряженности электрического поля резко возрастает. Микросхема распознает, что молния находится в радиусе действия, и дает команду на освобождение энергии, накопленной в конденсаторах.

Конденсаторы заряжаются через нижние электроды от внешнего электрического поля грозового фронта. То есть молниеприемник обеспечивается автономным питанием и не нуждается в дополнительных источниках.

У молниеприемника, помимо центрального цельного стержня, через который стекает ток молнии, есть дополнительные верхние электроды. Ток от конденсаторов через усилитель подается на эти электроды. Из-за большой раз-

ницы потенциалов между заземленным центральным стержнем и верхними электродами возникает разряд, который усиливает эффект короны. В результате создается стример, который стартует навстречу молнии раньше, чем от пассивного молниеотвода.

В настоящее время активные молниеприемники Prevelectron 2 Millenium защищают самые разные объекты.

Для управления встречным лидером в научных целях предложены и экспериментально проверены самые разнообразные методы: от производства длинной лазерной искры до быстрого подъема тонкой проволоочки со скоростью ~ 100 м/с на высоту 100...300 м.

Подача высокого напряжения на вершину молниеотвода тоже анализировалась и теоретически, и в ходе крупномасштабных экспериментов. Положительный эффект был налицо, но, к сожалению, при воздействии в сотни киловольт, к тому же длительных и энергоемких. Последнее необходимо, чтобы поддержать развитие встречного лидера с током в единицы ампер в течение сотен микросекунд. Такое воздействие нелегко получить, как нелегко получить длительную лазерную искру или быстрое удлинение молниеприемника дешевыми техническими средствами. Все это годится для научного эксперимента, но никак не для массового использования. Не внушает оптимизма и очень сильное ослабление управляющего воздействия с увеличением расстояния между молниеотводом и объектом защиты.

Сегодня одновременно существуют два типа молниезащиты: традиционные системы и молниеприемники с упреждающей стримерной эмиссией. Оба типа систем в случае удара молнии обеспечивают одинаковый уровень защиты сооружения, если они были грамотно спроектированы, выполнены из качественных компонентов и правильно установлены. Поэтому инженеры-проектировщики должны убедиться, что все элементы молниезащиты протестированы и сертифицированы. Эти меры предосторожности необходимы, чтобы гарантировать защиту людей и имущества от разрушительного воздействия молнии.

4.5.3. Грозозащита линий электропередачи

4.5.3.1. Индуктированные перенапряжения на ЛЭП

При ударах молнии в землю вблизи линий электропередачи на изоляцию линии воздействуют индуктированные перенапряжения. Индуктированные перенапряжения имеют электрическую и магнитную составляющие:

$$U_{\text{инд}} = U_{\text{и.э.}} + U_{\text{и.м.}} \quad (4.35)$$

Заряды лидерного канала молнии связывают на проводе заряды противоположного знака (рис. 4.26).

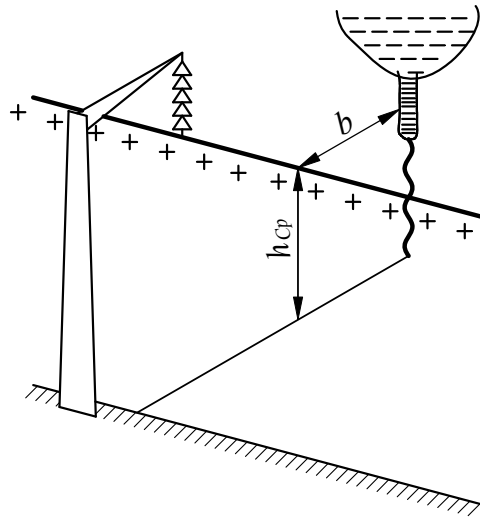


Рис.4.26. Распределение зарядов на проводе при разряде молнии вблизи воздушной линии

Электрическое поле связанных зарядов уравнивается полем лидера, поэтому потенциал провода во время лидерной стадии равен нулю (рабочее напряжение не учитывается). Во время главного разряда заряды лидера нейтрализуются, при этом связанные на проводе заряды освобождаются, что сопровождается повышением потенциала провода и образованием импульсных волн напряжения, распространяющихся по проводу в обе стороны. Так возникает электрическая составляющая индуктированного напряжения. Значение ее прямо пропорционально линейной плотности зарядов σ лидерного канала, средней высоте подвеса провода h_{cp} и обратно пропорционально кратчайшему расстоянию b от провода до точки удара молнии:

$$U_{из} = K_э \frac{h_{cp}}{b} I_M, \quad (4.36)$$

где $K_э$ – коэффициент пропорциональности, уменьшающийся при возрастании скорости главного разряда v и имеющий размерность сопротивления. Магнитное поле, вызванное током в канале молнии, индуцирует ЭДС в контуре земля – опора – фазный провод. Максимальное значение этой составляющей можно представить в виде:

$$U_{им} = K_M \frac{h_{cp}}{b} I_M, \quad (4.37)$$

где K_M – коэффициент, который также зависит от скорости главного разряда v , но увеличивается с ростом v .

Максимальное индуктированное напряжение на линии:

$$U_{\text{инд}} = U_{\text{и.э.}} + U_{\text{и.м.}} = (K_{\text{э}} + K_{\text{м}}) \frac{h_{\text{ср}}}{b} I_{\text{м}} \approx 30 \frac{h_{\text{ср}}}{b} I_{\text{м}}. \quad (4.38)$$

Поскольку при различных значениях ν величины $K_{\text{э}}$ и $K_{\text{м}}$ меняются в противоположные стороны, их сумму можно считать постоянной величиной, равной 30 Ом.

На рис. 4.27 приведено удельное годовое число индуктированных перенапряжений N при ударах молнии в землю рядом с линией со средней высотой подвеса провода $h_{\text{ср}} = 10$ м. Из этой кривой видно, что индуктированные перенапряжения могут превышать импульсную прочность изоляции линий 35 кВ ($U_{50\%} = 350$ кВ) менее 2 раз в год, а импульсную прочность изоляции линий 110 кВ ($U_{50\%} \approx 700$ кВ) – всего 1 раз в 5 лет.

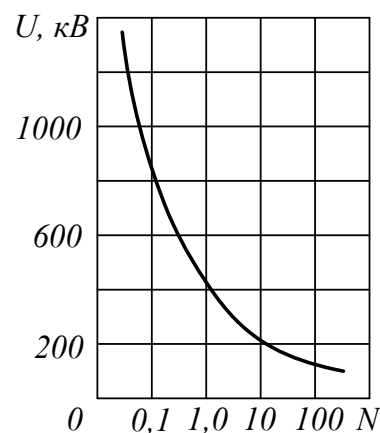


Рис. 4.27. Удельное годовое число индуктированных перенапряжений (на 100 км длины ЛЭП и 100 грозových часов)

Поэтому такого рода индуктированные перенапряжения не играют существенной роли для ВЛ 110 кВ и выше.

Однако следует учитывать, что индуктированные напряжения возникают также и при ударах молнии в тросы и опоры и, накладываясь на перенапряжения ПУМ, увеличивают разность потенциалов на изоляции.

Особого внимания заслуживают устройства защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП). Для этого есть несколько причин. Во-первых, частота воздействия перенапряжений. Ее надо сравнивать с частотой прямого удара молнии в объект. В средней полосе России молния может ударить в здание не чаще, чем один раз в 50 лет. Кроме прямого поражения объектов молнией возможно появление наведенного напряжения за счет электромагнитной связи между каналом молнии и объектом. Такие наведенные напряжения на объектах в энергетике называются индуктированными перенапряжениями. Их возбуждает быстро меняющееся во времени электромагнитное поле молнии, пронизывая пространство между проводами воздушной линии, которая идет от трансформаторной подстанции к объекту. Чаще всего это линия обычного исполнения с проводами, разнесенными друг от друга едва ли на полметра. Провода создают контур площадью порядка 100 м^2 , потому что расстояние между

подстанцией и объектом (например, зданием) вполне может составлять 200...300 м. Чем больше площадь контура, тем более высокое напряжение наводится в нем по закону электромагнитной индукции.

Элементарные оценки на основе общего курса физики показывают, что для электрической цепи здания и подключенного к ней оборудования (насосы, бытовые приборы, электроника) опасны даже совсем неблизкие молнии, например те, что удалены от воздушной линии на 200 м.

В средней полосе нашей страны на 1 км^2 поверхности земли ежегодно приходится 3...4 удара молнии. Опасная полоса будет иметь ширину около 400 м (по 200 м с каждой стороны от проводов). Вдоль линии в 300 м наберется площадь в $0,12 \text{ км}^2$, в которую попадает ежегодно примерно 0,5 молний. Статистические 0,5 удара молнии в год – один опасный удар за 2 года.

Никто не рискует рекомендовать отказаться от установки молниеотводов, опираясь на среднестатистический показатель одного прямого удара молнии в здание за 50 лет, потому что нельзя предсказать, когда случится это печальное событие: в первый год после завершения строительства или на сороковом году эксплуатации. Рисковать определенно не стоит. Но в любом случае одно опасное событие в среднем через каждые 2 года, связанное с электромагнитной индукцией, – это намного серьезнее, чем прямой удар молнии за полвека. Итак, выявлен первый фактор особого внимания к УЗИП – повышенная частота электромагнитных воздействий.

Второй фактор, влияющий на отношение к УЗИП, отличается тяжестью опасного воздействия. Современное здание напичкано электрическими устройствами и микроэлектроникой, часто достаточно дорогими. Грозовое перенапряжение в электрической сети редко выводит из строя только один прибор, и вопрос этот требует пояснения. На рис. 4.28 условно изображены несколько параллельно включенных потребителей электроэнергии. Изоляция одного из них, скажем № 3, повреждена грозовым перенапряжением. Произошло короткое замыкание. Казалось бы, оно должно снизить до нуля напряжение на других потребителях и гарантировать им полную безопасность. К сожалению, такое возможно только при очень близком расположении приборов, когда длина проводов не имеет значения. Реальные условия почти всегда принципиально иные.

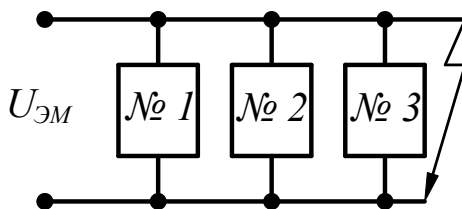


Рис. 4.28 Схема подключения нескольких потребителей в одном здании: $U_{ЭМ}$ – наведенное (электромагнитное) напряжение, возникшее в сети электроснабжения здания в результате грозового воздействия; № 1, № 2, № 3 – потребители электроэнергии

Хорошо известна конечная скорость распространения электромагнитной волны. В свободном пространстве она равна скорости света $3 \times 10^8 \text{ м/с}$, в диэлек-

трике с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ скорость снижается обратно пропорционально $\epsilon^{-0,5}$, реально в 1,5...2 раза. Это значит, что вдоль бытовой электропроводки электромагнитная волна летит со скоростью 150...200 м в микросекунду. Чем разветвленнее и протяженнее электрическая сеть дома, тем в большей степени проявляются временные факторы прохождения электромагнитной волны, приводящие к повреждению многих элементов бытового оборудования.

Вот почему, защищая дом молниеотводами, надо обязательно побеспокоиться о защите электрической сети от перенапряжений, дистанционно наведенных электромагнитным полем тока молнии. Нельзя установить одноединственное УЗИП для защиты сразу многих элементов оборудования, разнесенного в сколько-нибудь значительном пространстве. Каждый защитный элемент имеет свой радиус эффективного действия. В сложной электрической цепи приходится ставить десятки, а иногда и сотни УЗИП, поэтому передовые производители стремятся максимально увеличить надежность приборов и предельно сократить их габариты.

4.5.3.2. Перенапряжения от прямого удара молнии

в линию без троса

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

$$U = I_M Z_{пр} / 2, \quad (4.39)$$

где $Z_{пр}$ – волновое сопротивление провода с учетом импульсной короны.

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

На линиях с деревянными опорами необходимо учитывать дополнительную импульсную прочность ($E_{пр} = 100$ кВ/м), создаваемую древесиной. На линиях с деревянными опорами (рис. 4.29) перекрытие прежде всего происходит между проводами по пути гирлянда – траверса – гирлянда. Импульс на пораженном проводе индуцирует напряжение на соседнем проводе в соответствии с коэффициентом электромагнитной связи k . Между проводами возникает напряжение:

$$U = \frac{I_M Z_{пр}}{2} (1 - k), \quad (4.40)$$

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

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

для ВЛ на металлических и железобетонных опорах $I_{кр} = \frac{2U_{50\%}}{Z}$,

для ВЛ на деревянных опорах $I_{кр} = \frac{2U_{50\%}}{Z(1-k)}$.

Вероятность перекрытия определяется по формуле:

$$P_{пер} = \exp(-0,04I_{кр}). \quad (4.41)$$

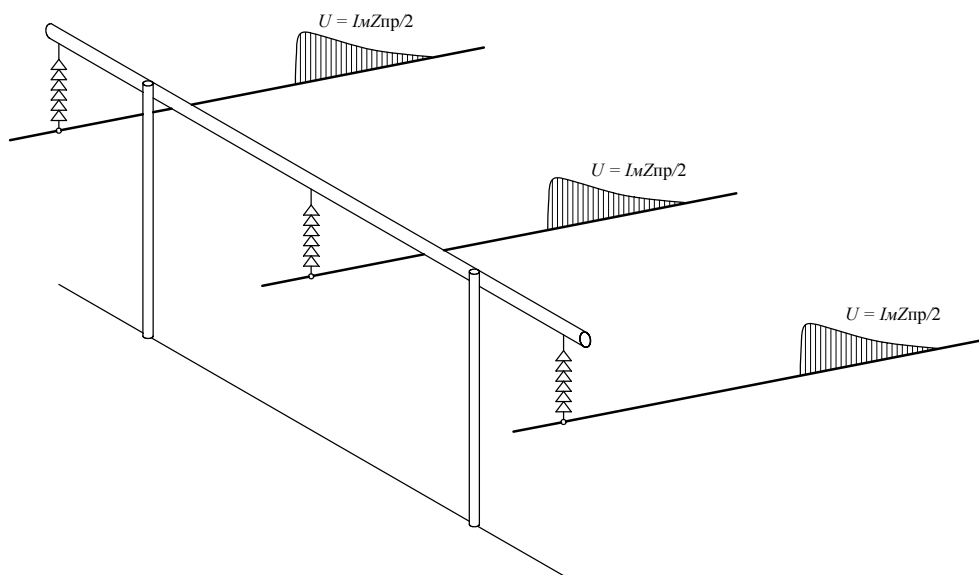


Рис. 4.29. Удар молнии в провод линии на деревянных опорах

Число перекрытий линейной изоляции ($n_{пер}$) в этом случае равно:

$$n_{пер} = n_{уд}P_{пер}, \quad (4.42)$$

где $n_{уд}$ – число ударов молнии в линию длиной 100 км за 100 грозовых часов.

$$n_{уд} = 6,7 \cdot 100 \cdot 6h_{ср} \cdot 10^{-3} \approx 4h_{ср}, \quad (4.43)$$

где $h_{ср}$ – средняя высота подвеса провода, м.

Годовое число ударов молнии в линию длиной l при числе грозовых часов в году $D_{г}$ определяется как:

$$n_{год} = n_{уд} \frac{l}{100} \cdot \frac{D_{г}}{100}. \quad (4.44)$$

Отключение линии произойдет, если импульсное перекрытие изоляции перейдет в устойчивую силовую дугу с той или иной вероятностью установления силовой дуги – η .

Малое число отключений линий на деревянных опорах без тросов обеспечивается обычно за счет низкого значения коэффициента η . Очевидно, что в случае металлических опор разрядный промежуток уменьшается до длины одной гирлянды, что вызывает существенное увеличение как коэффициента η , так и вероятности перекрытия изоляции $P_{\text{пер}}$. Поэтому линии 110 кВ и выше на металлических опорах без тросов в районах со средней и большой интенсивностью грозовой деятельности имели бы недопустимо большое число отключений. Как правило, такие линии защищаются тросовыми молниеотводами по всей длине.

Несколько по иному обстоит дело с линиями 35 кВ на металлических опорах, работающих в системе с изолированной нейтралью, особенно если в ней применены дугогасящие аппараты. В таких системах однофазные перекрытия изоляции не приводят к отключению линии, так как дуга емкостного тока в большинстве случаев гаснет в результате действия дугогасящей катушки, а коэффициент перехода в силовую дугу $\eta \approx 0$ независимо от значения $E_{\text{ср}}$. Поэтому отключения линий 35 кВ за счет грозовых поражений могут происходить только в случае двухфазных или трехфазных перекрытий.

При ударе молнии в провод и перекрытии фазной изоляции пораженного провода в путь тока вместо волнового сопротивления провода

$Z_{\text{пр}}/2$ включается значительно меньшее сопротивление заземления опоры $R_{\text{и}}$, и опора приобретает потенциал, приблизительно равный $I_{\text{м}}R_{\text{и}}$. На соседнем проводе наводится потенциал $kI_{\text{м}}R_{\text{и}}$. Перекрытие изоляции второго провода произойдет, если:

$$I_{\text{кр}} \geq \frac{U_{50\%}}{R_{\text{и}}(1-k)}. \quad (4.45)$$

Отсюда следует, что вероятность перекрытия $P_{\text{пер}}$ тем меньше, чем ниже сопротивление $R_{\text{и}}$ (или больше критическое значение тока молнии). Поэтому на линиях 35 кВ на металлических опорах без тросов целесообразно применять дополнительные заземлители для уменьшения сопротивления заземления опор.

4.5.3.3. Перенапряжения прямого удара молнии в линию с тросом

При прямом ударе молнии в ВЛ с тросом ее отключение может произойти по следующим причинам: 1) прорыв молнии через тросовую защиту; 2) удар молнии в опору и обратное перекрытие изоляции с опоры на провод; 3) удар молнии в трос в середине пролета и пробой воздушного промежутка трос – провод.

Прорыв молнии через тросовую защиту

Вероятность прорыва молнии через тросовую защиту (P_{α}) находят по эмпирической формуле:

$$\lg P_{\alpha} = \frac{\alpha \sqrt{h_{\text{оп}}}}{90} - 4, \quad (4.46)$$

где $h_{\text{оп}}$ – высота опоры, м; α – защитный угол троса, т.е. угол между вертикалью, проходящей через трос, и прямой, соединяющей трос с проводом, град. (рис. 4.30).

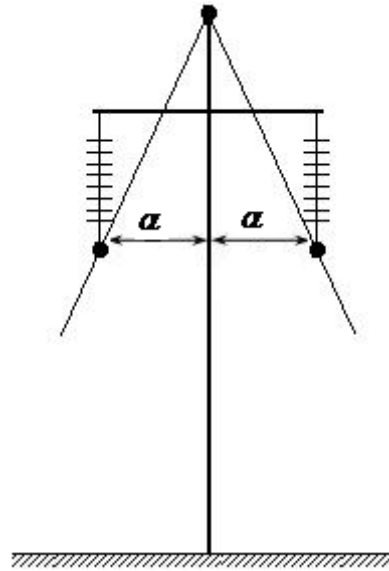


Рис. 4.30. Схема определения защищаемой зоны троса ЛЭП

Тогда число отключений линии за счет ударов молнии в провода ЛЭП определится как:

$$n_{\text{пр}} = n_{\text{уд}} P_{\alpha} P_{\text{пр}} \eta_1, \quad (4.47)$$

где $P_{\text{пр}}$ – вероятность перекрытия изоляции на опоре при ударе молнии в провод, η_1 – вероятность установления силовой дуги при перекрытии изоляции опоры. $P_{\text{пр}}$ определяется по критическому току молнии, который приводит к перекрытию гирлянды изоляторов:

$$P_{\text{пр}} = P(I_{\text{кр}}). \quad (4.48)$$

Удар молнии в опору

Число ударов молнии в опору определяется по формуле:

$$n_{\text{оп}} = n_{\text{уд}} \frac{4h_{\text{оп}}}{l_{\text{пр}}}, \quad (4.49)$$

где $n_{\text{уд}}$ – число ударов молнии в линию, $l_{\text{пр}}$ – длина пролета.

Обратное перекрытие линейной изоляции с опоры на провод фазы может произойти, если напряжение на изоляции достигнет ее импульсного разрядного напряжения или превысит его.

Напряжение на изоляции линии равно разности потенциалов на опоре и проводе: $U_{из} = U_{оп} - U_{пр}$. При расчете потенциала опоры ее в схеме замещения (рис. 4.31) представляют сосредоточенной индуктивностью $L_{оп} = L_0 h_{оп}$ и импульсным сопротивлением заземления $R_{и}$. Удельная индуктивность опоры L_0 составляет 0,5 мкГн/м для двухстоечных, 0,6 мкГн/м для одностоечных металлических и железобетонных опор и 0,7 мкГн/м для деревянных опор с двумя заземляющими спусками.

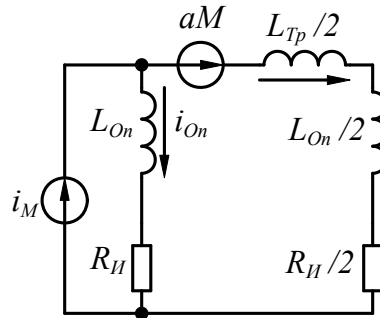


Рис. 4.31. Схема замещения для расчета напряжения на вершине опоры линии с тросами при ударе в нее молнии

Потенциал пораженной опоры, кроме падений напряжения на сопротивлении заземления и индуктивности опоры, определяется также составляющей, обусловленной индуктивной связью между каналом молнии с током $i_M(t)$ и телом опоры. Коэффициент взаимной индукции приближенно равен $M_{оп} = M_0 h_{оп}$, где $M_0 \approx 0,2$ мкГн/м. Таким образом, потенциал вершины опор:

$$U_{оп} = i_{он}(t)R_{и} + L_{он}\frac{di_{оп}}{dt} + M_{оп}\frac{di_M}{dt}. \quad (4.50)$$

Ток в опоре в пределах фронта определяется как:

$$i_{оп} = at \left[\frac{0,5L_{тр} - M_{тр}}{0,5L_{тр} + L_{оп}} \right] \frac{1 - e^{-\alpha t}}{\alpha t}, \quad (4.51)$$

где $\alpha = \frac{R_{и}}{0,5L_{тр} + L_{оп}}$; $L_{тр} = Z_{тр} \frac{l_{пр}}{\vartheta} = (0,18 \ln \frac{2h_{тр}}{r_{тр}}) l_{пр}$.

В этих формулах: $Z_{тр}$ – волновое сопротивление троса, $L_{тр}$ – индуктивность троса, $h_{тр}$ – средняя высота подвеса троса, $r_{тр}$ – радиус троса, ϑ – скорость движения волны напряжения вдоль троса.

Производная тока в опоре по времени:

$$\frac{di_{оп}}{dt} = a \left(\frac{0,5L_{тр} - M_{тр}}{0,5L_{тр} + L_{оп}} \right) e^{-\alpha t}. \quad (4.52)$$

Потенциал провода имеет три составляющие: рабочее напряжение; напряжение, индуцированное на проводе зарядом лидера молнии (электростатическая составляющая индуцированных перенапряжений); напряжение, индуцированное на проводе в результате распространения по тросу импульсов напряжения с амплитудой $U_{оп}$.

Расчетное значение рабочего напряжения принимается равным среднему значению за полупериод. При этом полярность его противоположна полярности потенциала опоры:

$$U_{раб} = \frac{2}{\pi} \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \approx 0,5U_{ном}. \quad (4.53)$$

Электрическая составляющая индуцированного перенапряжения при ударе в опору может быть приближенно рассчитана по формуле:

$$U_{инд} \approx E_{ср} h_{ср} (1 - k), \quad (4.54)$$

где $E_{ср} \approx 10$ кВ/см – средняя напряженность электрического поля в промежутке между каналом лидера молнии и опорой перед главным разрядом; k - коэффициент электромагнитной связи между проводом и тросом, учитывающий экранирующее действие троса.

Напряжение $U_{инд}$ имеет полярность, обратную полярности потенциала вершины опоры. Прохождение тока по тросу вызывает появление на проводе напряжения $kU_{оп}$ того же знака, что и потенциал опоры. Эта составляющая уменьшает напряжение на изоляции линии. Таким образом, напряжение на линейной изоляции, равное разности потен-

циалов вершины опоры и провода, в момент максимума тока молнии определяется как:

$$\begin{aligned} U_{из} &= U_{оп} - U_{пр} = U_{оп} - (-U_{раб} - U_{инд} + kU_{оп}) = \\ &= U_{оп}(1-k) + U_{раб} + U_{инд}. \end{aligned} \quad (4.55)$$

Это напряжение необходимо сравнить с напряжением перекрытия гирлянды при предразрядном времени, равном длительности фронта импульса тока молнии $\tau_{ф}$. Значение $U_{из}$ зависит от крутизны фронта тока молнии, которая при заданном времени $\tau_{ф}$ определяет максимальное значение тока молнии $I_{м} = a\tau_{ф}$.

Если построить зависимости напряжения на изоляции от времени $U_{из}(t)$ при разных крутизнах фронта a (рис. 4.32), то точка пересечения этих кривых с вольт-секундной характеристикой изоляции определяет длительность фронта тока молнии $\tau_{ф} = t_p$ и минимальное значение амплитуды тока $I_{м} = a\tau_{ф}$, при котором произойдет перекрытие изоляции.

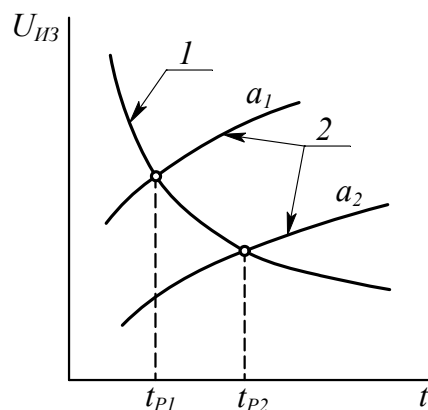


Рис. 4.32. Определение времени пробоя линейной изоляции при разных крутизнах фронта тока молнии ($a_1 > a_2$): 1 – вольт-секундная характеристика изоляции; 2 – напряжение на изоляции

По этим значениям можно построить кривую опасных параметров (рис. 4.33), которая делит координатную плоскость (a, I_M) на область безопасных параметров тока молнии (1) и область опасных параметров (2). Эта кривая ограничивает область сочетаний крутизны и тока молнии, при которых происходит перекрытие изоляции линии. Например, при крутизне a_1 перекрытие изоляции происходит при токах больших I_{M1} , при крутизне a_2 – при токах, больших I_{M2} , и т. д. По кривой опасных параметров можно построить кривую вероятности опасных параметров (рис. 4.34). По этому рисунку вероятность перекрытия изоляции определяется как:

$$P_{\text{оп}} = \iint_D f(I_M, a) dI_M da, \quad (4.56)$$

где $f(I_M, a)$ – двумерная функция плотности вероятности максимального значения и крутизны тока молнии, а интегрирование осуществляется по всей области D . При практических расчетах максимальные значения тока I_M и крутизны фронта тока молнии a принимают независимыми случайными величинами, вероятности которых определяются по соответствующим формулам. В этом случае (4.56) принимает вид:

$$P_{\text{оп}} = \int_0^1 P_i dP_a = \int_0^1 P_a dP_i, \quad (4.57)$$

т. е. вероятность перекрытия определяется заштрихованной площадью на рис. 4.33, которая ограничена кривой вероятности опасных параметров.

Упрощенно вероятность перекрытия изоляции при ударе молнии в опору можно определить по значению критического тока:

$$I_{\text{кр}} = \frac{U_{50\%}}{R_{\text{и}} + \delta h_{\text{оп}}}, \quad (4.58)$$

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

Тогда

$$P_{on} = P(I_{кр}). \quad (4.59)$$

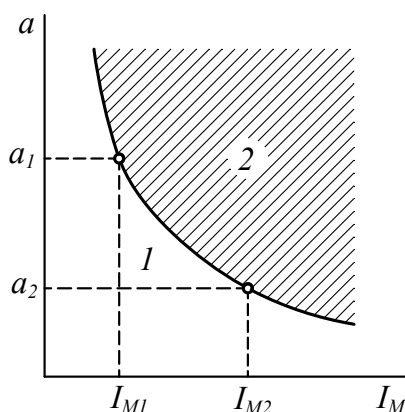


Рис. 4.33. Кривая опасных параметров

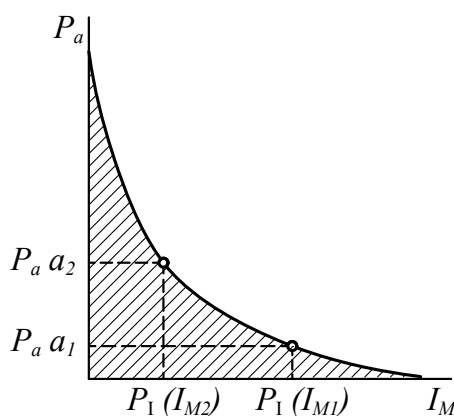


Рис. 4.34. Определение вероятности перекрытия изоляции (заштрихованная область дает значение вероятности)

Очевидно, что при двух тросах доля тока в опоре меньше, чем при одном тросе, и критическое значение тока молнии выше. Увеличение высоты опоры, а значит, и ее индуктивности приводит к росту напряжения на гирлянде изоляторов и вследствие этого к уменьшению критического тока, что также отражает вышеприведенная формула.

Упрощенная методика может быть использована для оценки числа отключений линий напряжением до 500 кВ при сопротивлениях заземлений опор до 30 Ом.

Удар молнии в трос в середине пролета

Примем для расчета косоугольную форму тока молнии и построим импульс напряжения в точке удара молнии в трос. Считаем также, что импульсное сопротивление заземления опор значительно меньше волнового сопротивления троса, т. е. от опор волны отражаться будут с обратным знаком. До прихода импульсов, отраженных от сопротивлений заземления соседних опор, напряжение на тросе определяется по формуле:

$$U_{\text{тр}}(t) = I_{\text{м}}(t) \frac{Z_{\text{тр}}}{2} = at \frac{Z_{\text{тр}}}{2}. \quad (4.60)$$

Через интервал времени $\tau = l_{\text{пр}}/v$, где $l_{\text{пр}}$ – длина пролета, к месту удара одновременно подойдут импульсные волны, отраженные с переменной знака от сопротивлений заземления двух ближайших опор, и рост напряжения прекратится. Подставив в формулу время $t = \tau$, найдем максимальное напряжение на тросе:

$$U_{\text{тр-пр-max}} = aZ_{\text{мп}}l_{\text{пр}}/(2v). \quad (4.61)$$

Напряжение между тросом и проводом с учетом индуктированного на проводе напряжения равно:

$$U_{\text{тр-пр}} = (1-k) aZ_{\text{мп}}l_{\text{пр}}/(2v). \quad (4.62)$$

Удар молнии в трос в середине пролета является расчетным случаем для выбора расстояния между тросом и проводом. Пробой промежутка трос – провод возможен, если средняя напряженность достигнет значения 500 кВ/м. Зная расстояние между тросом и проводом, можно найти пробивное напряжение, а затем критическую крутизну тока молнии ($a_{\text{кр}}$), при которой произойдет пробой промежутка трос – провод. Вероятность пробоя этого промежутка $P_{\text{тр}}$ определяется по вероятности возникновения тока молнии с крутизной равной или большей $a_{\text{кр}}$:

$$P_{\text{тр}} = P(a \geq a_{\text{кр}}) = \exp(-0,08a_{\text{кр}}). \quad (4.63)$$

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

Удельное число отключений линий с тросами вычисляется в общем случае по формуле:

$$n_{\text{откл}} = 4h_{\text{тр}} \{P_{\alpha}P_{\text{пр}}\eta_1 + (1 - P_{\alpha}) \times [\frac{4h_{\text{оп}}}{l} P_{\text{оп}}h_1 + (1 - \frac{4h_{\text{оп}}}{l}) P_{\text{тр}}h_2]\}. \quad (4.64)$$

4.6. Квазистационарные перенапряжения

4.6.1. Резонансные перенапряжения на основной частоте

в установившемся режиме при холостом ходе

односторонне питаемой линии

В режиме передачи по линии номинальной (или близкой к ней) мощности между питающей ЭДС (E), вынужденным напряжением на питающих шинах

(V_{Π}) и вынужденным напряжением на конце линии ($V_{\text{к}}$) существует нормальное соотношение, когда $E > V_{\Pi} > V_{\text{к}}$, обусловленное падением напряжения на предвключенной индуктивности (L_{Π}) и на индуктивности ЛЭП ($L_{\text{л}}$) при протекании по линии активно – индуктивного тока нагрузки (рис. 4.35, а, б) (см. векторную диаграмму, рис. 4.35, в).

Когда же нагрузка невелика, а тем более при холостом ходе электропередачи можно считать в определенном приближении, что по линии протекает чисто ёмкостный ток (I_c), который обуславливает обратное соотношение между указанными величинами, т.е. $E < V_{\Pi} < V_{\text{к}}$ (см. векторную диаграмму, рис. 4.35, в).

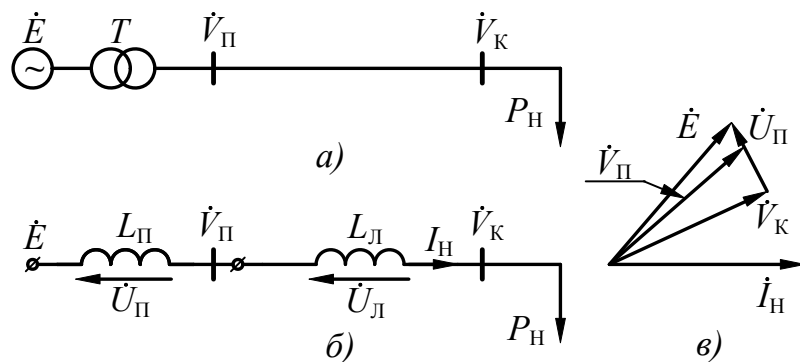


Рис. 4.35. Схема электропередачи (а) в режиме передачи мощности, схема замещения (б) и векторная диаграмма напряжений (в)

Когда же нагрузка невелика, а тем более при холостом ходе электропередачи можно считать в определенном приближении, что по линии протекает чисто ёмкостный ток (I_c), который обуславливает обратное соотношение между указанными величинами, т.е. $E < V_{\Pi} < V_{\text{к}}$ (см. векторную диаграмму, рис. 4.36, в).

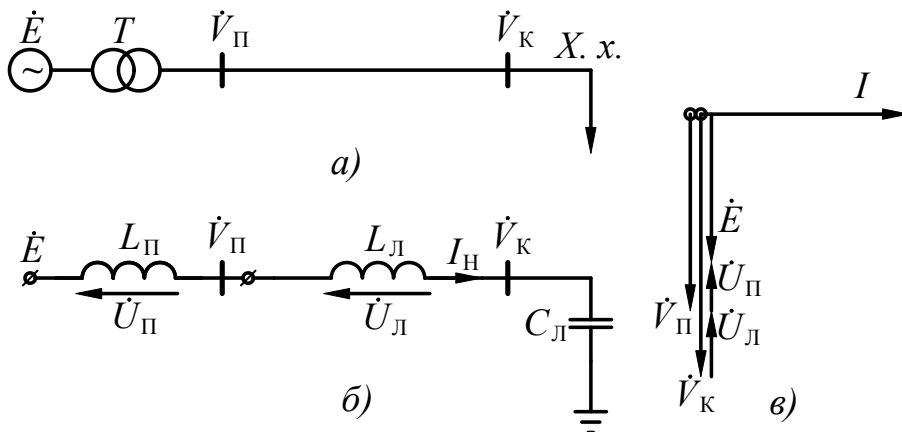


Рис. 4.36. Электропередача на холостом ходу (а), схема замещения (б) и векторная диаграмма напряжений (в)

Такое увеличение напряжения на линии можно рассматривать как приближение к резонансным условиям. Чем ближе низшая частота собственных колебаний схемы ω_0 к частоте вынуждающей ЭДС ω , тем больше будет повы-

шаться напряжение к концу линии. Это явление называют емкостным эффектом или эффектом Ферранти.

Схема одностороннего питания возникает практически в процессе каждого ее включения и отключения, поскольку моменты коммутации выключателей на разных концах линии не совпадают.

Длительность работы линий в режиме одностороннего питания при определенных включениях и отключениях по данным опыта эксплуатации достигает 20 минут в случае неавтоматической синхронизации. Во время АПВ или при других автоматических коммутациях линий длительность этих интервалов обычно значительно меньше – порядка секунды.

Расчет резонансных перенапряжений, обусловленных емкостным эффектом ненагруженной линии в симметричном режиме ее работы, может быть проведен с помощью уравнений четырехполюсника:

$$U_1 = AU_2 + BI_2, \quad (4.65)$$

$$I_1 = CU_2 + DI_2 \quad (4.66)$$

где A, B, C, D – коэффициенты четырехполюсника, эквивалентного рассматриваемой передаче;

U_1, I_1 – напряжение и ток в начале линии;

U_2, I_2 – напряжение и ток в конце линии.

В режиме холостого хода ток в конце разомкнутой линии $I_2 = 0$. Обозначим вынужденное напряжение в конце разомкнутой линии через V_p и найдем V_p для электропередачи, представленной на рис. 4.37.

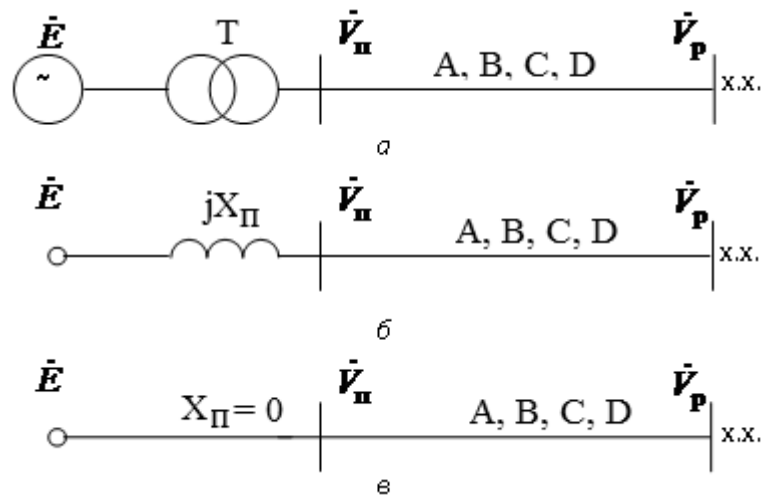


Рис. 4.37. Схема электропередачи (а), общая схема замещения (б) и схема замещения электропередачи с источником бесконечной мощности (в)

Для линии электропередачи коэффициенты четырехполюсника равны:

$$A = \operatorname{ch} \gamma l; \quad B = W \operatorname{sh} \gamma l; \quad C = \operatorname{sh} \gamma l / W; \quad D = \operatorname{ch} \gamma l; \quad (4.67)$$

где: l —длина ЛЭП; γ —постоянная распространения электромагнитных волн; W —волновое сопротивление линии. При этом:

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(g_0 + j\omega C_0)}; \quad W = \sqrt{\frac{(R_0 + j\omega L_0)}{(g_0 + j\omega C_0)}}; \quad (4.68)$$

где R_0, L_0, g_0, C_0 — первичные параметры линии.

В подобных расчетах поперечная активная проводимость линии g_0 обычно принимается равной нулю, т. е. $g_0 = 0$. Примем также для упрощения расчетов, что линия присоединена к источнику бесконечной мощности, для которого предвключенное сопротивление $X_{п}=0$. С учетом сделанных замечаний и допущений расчетная схема замещения принимает вид, изображенный на рис. 4.37, в, а вынужденная составляющая напряжения на разомкнутом конце электропередачи (ЭП) будет равна:

$$V_p = \frac{E}{A} = \frac{E}{\operatorname{ch}\gamma l} = \frac{E}{\operatorname{ch}\lambda}, \quad (4.69)$$

где $\lambda = \gamma l$. Параметр электропередачи λ можно после ряда математических преобразований (с использованием разложения в ряд Тейлора) представить в виде:

$$\lambda = \gamma l = l \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)j\omega C_0} = l \left(-\frac{R_0}{2\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}} + j\omega \sqrt{L_0 C_0} \right) = (\alpha + j\beta)l, \quad (4.70)$$

где $\alpha = \frac{R_0}{2\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}}$ — коэффициент затухания;

$$\beta = \omega \sqrt{L_0 C_0} = \frac{\omega}{1/\sqrt{L_0 C_0}} = \frac{314}{300000} = \frac{\pi}{3000} \frac{\text{рад}}{\text{км}} \text{ — коэффициент изменения фазы.}$$

зы.

Часто вводят коэффициент изменения фазы на 100 км длины линии $\beta_{уд} = \frac{\pi}{30} \frac{\text{рад}}{100\text{км}} = 6 \frac{\text{эл.град}}{100\text{км}}$. Линии электропередачи обладают весьма малым коэффициентом затухания и в режимах далеких от резонанса можно положить $\alpha \approx 0$. Тогда параметр электропередачи $\lambda = j\beta l$ и гиперболические функции коэффициентов четырехполюсника можно с помощью преобразований Эйлера заменить тригонометрическими:

$$A = \cos \lambda; \quad B = jW \sin \lambda; \quad C = j \sin \lambda / W; \quad D = \cos \lambda. \quad (4.71)$$

С учетом сделанных преобразований напряжение на разомкнутом конце ЭП равно:

$$V_p = \frac{E}{\cos \lambda}. \quad (4.72)$$

Пример 1.

Дано: длина ЛЭП – $l=500$ км; $\beta_{уд}=6,2$ град./100км; $E=1$.

Найти V_p .

Решение: $\lambda = \beta_{уд} \cdot l/100 = 6,2 \cdot 500/100 = 31^\circ$.

$$V_p = E/A = E/\cos \lambda = 1/\cos 31^\circ = 1/0,858 = 1,16.$$

При этом напряжение на питающем конце ЛЭП $V_{\Pi} = V_p \cdot A = \frac{E}{A} \cdot A = E$, т. е.

на шинах бесконечной мощности перенапряжений нет.

В случае источника конечной мощности $X_{\Pi} \neq 0$ и расчетная схема замещения принимает вид, изображенный на рис. 4.38, а. Тогда электропередачу можно представить в виде двух четырехполюсников, соединенных последовательно (рис. 4.38, б). Вынужденное напряжение на разомкнутом конце ЭП равно:

$$V_p = \frac{E}{A_{12}}, \quad (4.73)$$

где A_{12} – коэффициент четырехполюсника эквивалентного всей электропередаче в целом; $A_{12} = A_1 A_2 + B_1 C_2$.

Для первого четырехполюсника коэффициенты равны: $A_1 = 1$; $B_1 = jX_{\Pi}$; $C_1 = 0$; $D_1 = 1$, тогда $A_{12} = \cos \lambda - (X_{\Pi}/W) \sin \lambda$.

Следовательно:

$$V_p = \frac{E}{\cos \lambda - \frac{X_{\Pi}}{W} \sin \lambda}, \quad (4.74)$$

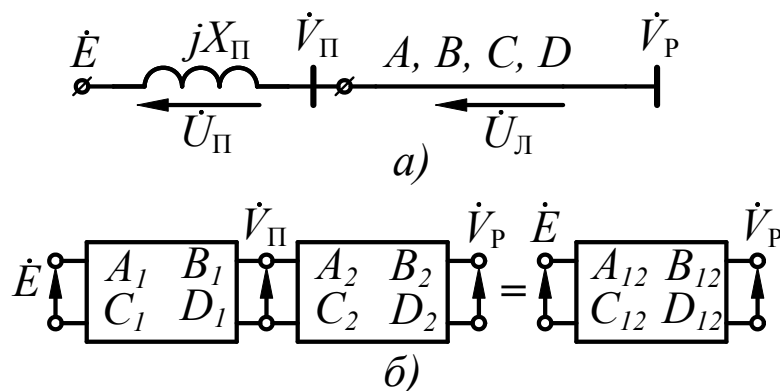


Рис. 4.38. Схема замещения электропередачи с источником ограниченной мощности (а), представление электропередачи двумя четырехполюсниками (б)

При источнике ограниченной мощности V_p выше, чем при источнике бесконечной мощности. Вынужденная составляющая напряжения на питающем конце электропередачи равна:

$$V_n = A_2 V_p. \quad (4.75)$$

Пример 2.

Дано: длина ЛЭП – $l = 500$ км; $\beta_{уд} = 6,2$ град./100км; $E = 1$; $X_{\pi} = 100$ Ом; $W = 280$ Ом.

Найти V_p, V_n .

Решение: $\lambda = \beta_{уд} \cdot l / 100 = 6,2 \cdot 500 / 100 = 31^\circ$.

$$A_{12} = \cos \lambda - \frac{X_{\pi}}{W} \sin \lambda = \cos 31^\circ - \frac{100}{280} \sin 31^\circ = 0,675.$$

$$V_p = E / A_{12} = 1 / 0,675 = 1,49.$$

При этом напряжение на питающем конце ЛЭП–
 $V_{\pi} = V_p \cdot A_2 = V_p \cdot \cos \lambda = 1,49 \cos 31^\circ = 1,28$.

4.6.2. Влияние продольных и поперечных компенсирующих устройств на вынужденную составляющую напряжения

Реактор поперечной компенсации установлен в начале линии (рис. 4.39, а, б)

Расчетная схема содержит три четырехполюсника, соединенных последовательно. Вынужденная составляющая напряжения на разомкнутом конце ЭП определяется по той же формуле:

$$V_p = \frac{E}{A_n}; \quad (4.76)$$

где A_n – коэффициент четырехполюсника, эквивалентного всей электропередаче в целом при реакторе, подсоединенном в начале линии.

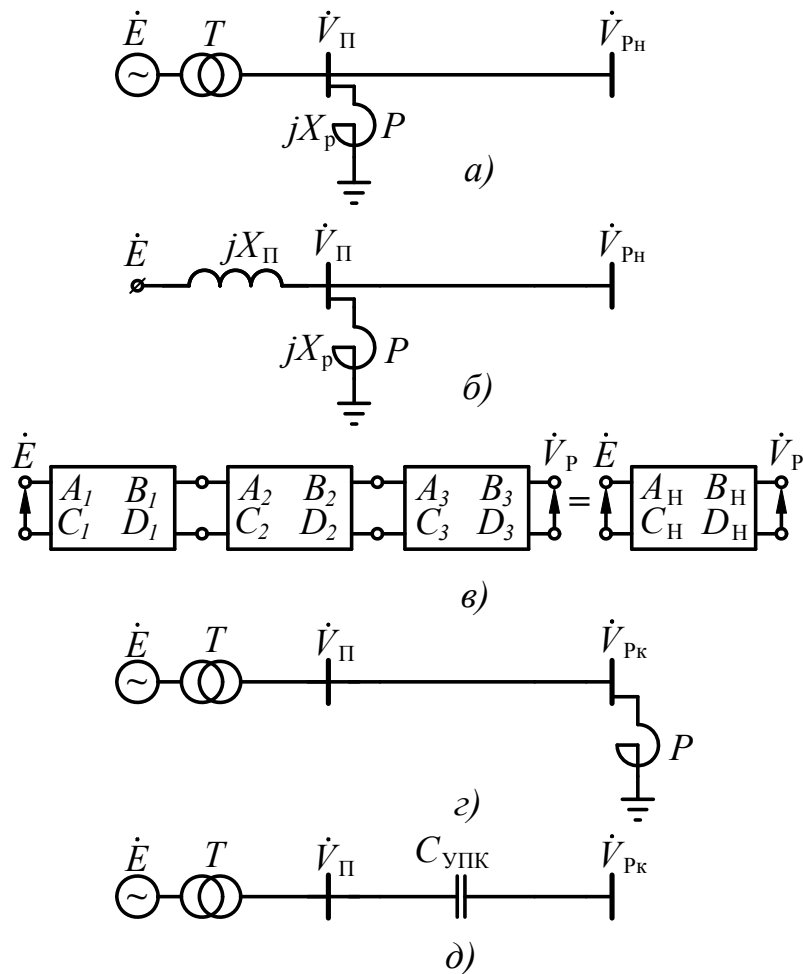


Рис. 4.39. Схемы электропередач с реакторами и установкой продольной компенсации

В соответствии с правилами сложения четырехполюсников, соединенных по цепной схеме получим (рис. 4.39, в):

$$A_H = \cos \lambda - \frac{X_{\Pi}}{W} \sin \lambda + \frac{X_{\Pi}}{X_p} \cos \lambda. \quad (4.77)$$

Тогда напряжение на разомкнутом конце рассматриваемой электропередачи V_{PH} равно:

$$V_{PH} = \frac{E}{\cos \lambda - \frac{X_{\Pi}}{W} \sin \lambda + \frac{X_{\Pi}}{X_p} \cos \lambda}. \quad (4.78)$$

При этом $V_{PH} < V_p$ (V_p соответствует ЭП без реактора). Аналогично можно проанализировать влияние на вынужденную составляющую напряжения на разомкнутом конце ЭП реактора поперечной компенсации, присоединенного к концу линии (рис. 4.39, г). Коэффициент A_K четырехполюсника, эквивалентного всей ЭП в целом, когда реактор подключен к концу линии, равен:

$$A_k = \cos\lambda - \frac{X_p}{W} \sin\lambda + \frac{X_p}{X_p} \cos\lambda + \frac{W}{X_p} \sin\lambda. \quad (4.79)$$

Так как $A_k > A_n$, то $V_{pk} < V_{pn}$, т.е. реактор подсоединенный в конце линии ограничивает резонансные перенапряжения в большей степени, чем реактор в начале линии. Таким же образом можно показать, что установка продольной компенсации ($C_{упк}$, рис. 4.39, д) снижает вынужденную составляющую напряжения.

4.7. Феррорезонансные перенапряжения

Феррорезонансные явления возникают в схемах, которые содержат элементы с ферромагнитными сердечниками. В электрических сетях такие элементы практически есть всегда и поэтому в любой сети имеется принципиальная возможность появления феррорезонансных процессов на промышленной частоте, на высших или низших гармониках. В симметричных трехфазных режимах сети емкостные элементы обычно оказываются зашунтированными низким входным сопротивлением питающей сети, которое всегда имеет индуктивный характер. Поэтому в нормальных режимах феррорезонанс маловероятен. Феррорезонанс возникает в несимметричных режимах. Например, при неполнофазных режимах сети с изолированной нейтралью, когда емкость фазы относительно земли (рис. 4.40, а) включается последовательно с обмотками силового трансформатора или электромагнитного трансформатора напряжения. Такая схема образуется при обрыве одного провода с падением его на землю в системе с изолированной нейтралью. Пусть провод оборвался в фазе A , причем упал на землю конец провода, присоединенный к источнику. Упрощенная схема для этого случая представлена на рис. 4.40.

Ток в фазе A после обрыва провода будет стекать в землю через место заземления, затем возвращаться на провод через емкость C_0 , после чего он разветвляется: часть тока проходит через междуфазную емкость C_{12} , а другая – через индуктивность трансформатора L_T . Цепь тока замыкается через фазы B и C источника. В силу симметрии потенциалы нулевых точек трансформатора и звезды междуфазовых емкостей одинаковы.

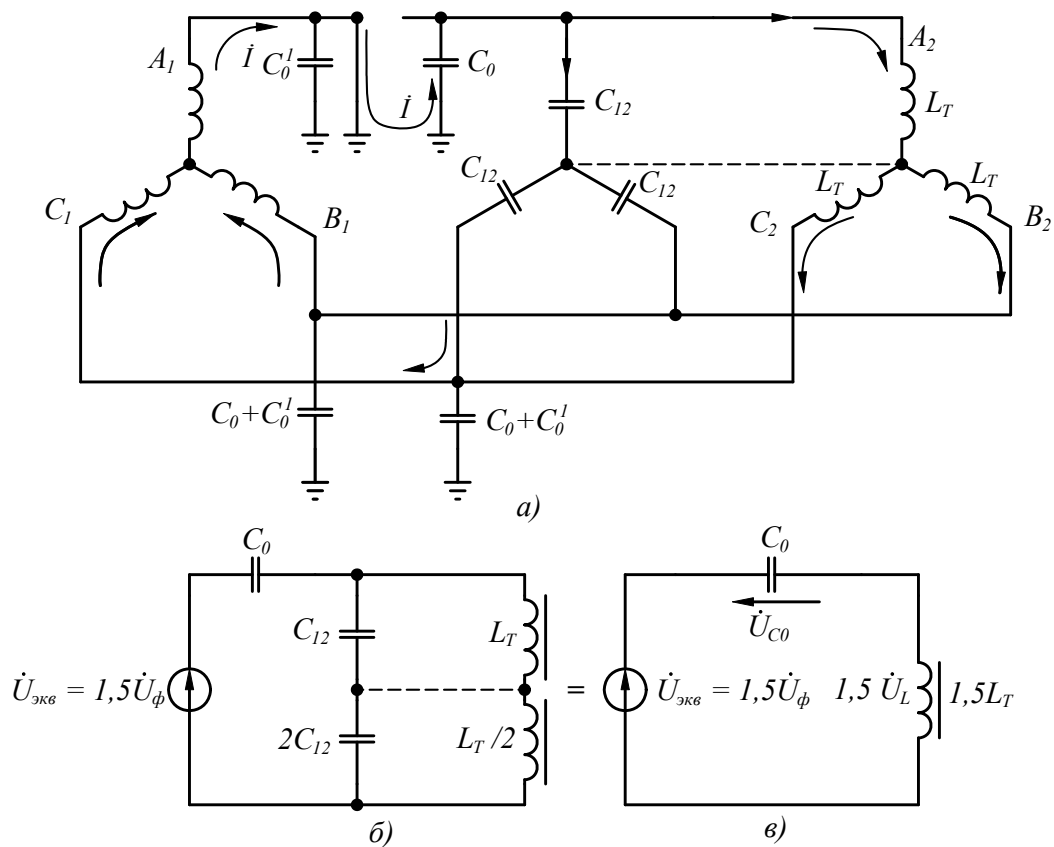


Рис.4.40. Схема замещения для случая обрыва одного провода с падением его на землю в системе с изолированной нейтралью

Поэтому схему рис. 4.40, а можно преобразовать в схему рис. 4.40, б, в которой ЭДС источника на основании правил перехода от трехфазной системы к однофазной схеме замещения будет равна $1,5U_{\phi}$.

Можно показать, что влияние междуфазовой емкости на амплитуду перенапряжений относительно невелико. Полагая в первом приближении $C_{12} \approx 0$, получим схему замещения, представленную на рис. 4.40, в. В соответствии с этой схемой можем написать:

$$\dot{U} = 1,5\dot{U}_L + \dot{U}_C, \quad \text{или} \quad \pm U = 1,5U_L - U_C, \quad (4.80)$$

где плюс соответствует режиму с отстающим током ($1,5U_L > U_C$), а минус – режиму с опережающим током.

Графическое решение уравнения (4.80) представлено на рис. 4.41, из которого видно, что в рассматриваемой схеме принципиально возможны три режима, соответствующие точкам а, б, в. Два из них являются индуктивными (б, в; $U_L > U_C$) и один – ёмкостный (а, $U_C > U_L$). При этом режимы, соответствующие точкам а, б, являются устойчивыми, а режим, соответствующий точке в – неустойчивым, т. е. физически не реализуемым. Проверка устойчивости решения осуществляется обычно путем исследования поведения схемы при небольшом изменении тока в цепи.

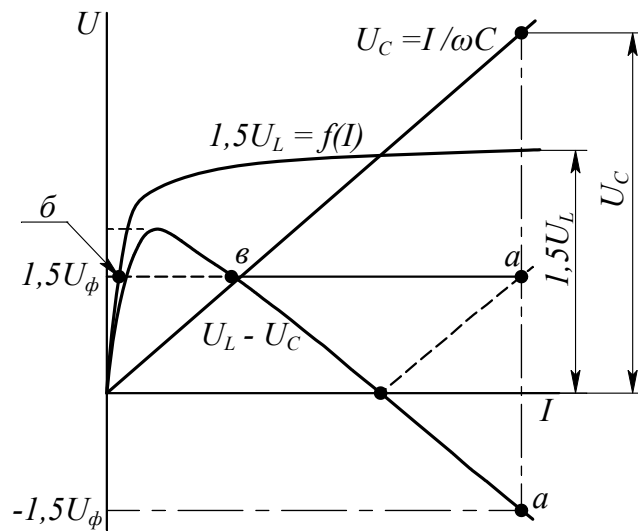


Рис. 4.41. Графическое решение уравнения для колебательного контура с нелинейной индуктивностью

С ростом нагрузки трансформатора, что эквивалентно введению в схему замещения (рис. 4.40, в) увеличивающегося активного сопротивления, область существования гармонического резонанса сужается и при некотором значении нагрузки возникновение резонансных явлений становится невозможным.

Если построить векторную диаграмму для емкостного режима, соответствующего точке *a*, то увидим, что порядок чередования фаз на трансформаторе нагрузки изменился на обратный (рис. 4.42).

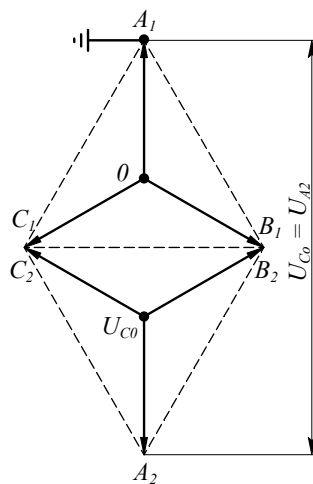


Рис. 4.42. Векторная диаграмма напряжений при «опрокидывании» чередования фаз

Произошло так называемое «опрокидывание» чередования фаз. При этом, если трансформатор имел небольшую моторную нагрузку, то после обрыва провода направление вращения двигателей может измениться на обратное. Как следует из рассмотренного нами случая, перенапряжения при несимметричном отключении фаз могут превышать $3U_\phi$ и, следовательно, представлять непосредственную опасность для изоляции. Поэтому в эксплуатации следует ограничить вероятность появления перенапряжений рассматриваемого вида.

Наиболее радикальным средством, позволяющим полностью устранить перенапряжения при обрыве проводов, является заземление нейтрали трансформатора нагрузки. Однако это требование не всегда выполнимо даже для систем 110 кВ, не говоря уже о системах более низкого напряжения. Необходимо стремиться к уменьшению вероятности несимметричных отключений, например, путем отказа от применения плавких предохранителей и выключателей с пофазным управлением. Кроме того, не следует длительно оставлять включенными холостые или слабо нагруженные трансформаторы.

4.8. Коммутационные перенапряжения

4.8.1. Перенапряжения при отключении ненагруженных линий и батарей конденсаторов

Отключение ненагруженных линий и батарей конденсаторов может сопровождаться значительными перенапряжениями, если в процессе отключения между контактами полюса выключателя происходят повторные зажигания. Повторные зажигания между расходящимися контактами выключателя возникают, если электрическая прочность межконтактного промежутка выключателя оказывается меньше, чем восстанавливающееся после гашения дуги напряжение на его контактах. Процессы, сопровождающие повторные зажигания, можно рассмотреть, представив разомкнутую линию в виде сосредоточенной емкости (рис. 4.43, а). Считаем, что выключатель отключает емкостный ток при прохождении его через нулевое значение. В этот момент напряжение на емкости максимально и равно $U_{C0} \approx -E_m$ (при не очень большой длине линии, рис. 4.43, б).

После обрыва дуги напряжение на емкости не меняется, сохраняя свое значение $U_{C0} = -E_m$. Напряжение же источника изменяется по синусоидальному закону и через полпериода достигает значения $+E_m$. Напряжение между контактами выключателя будет равно $2E_m$ и, если к этому моменту электрическая прочность между контактами окажется ниже, чем $2E_m$, то возможен пробой межконтактного промежутка, т. е. повторное включение линии. Начнется переходный процесс перезарядки линии (емкости) от начального напряжения $U_{нач} = -E_m$ до принужденного значения напряжения $U_{пр} = +E_m$ (до значения вынуждающей ЭДС).

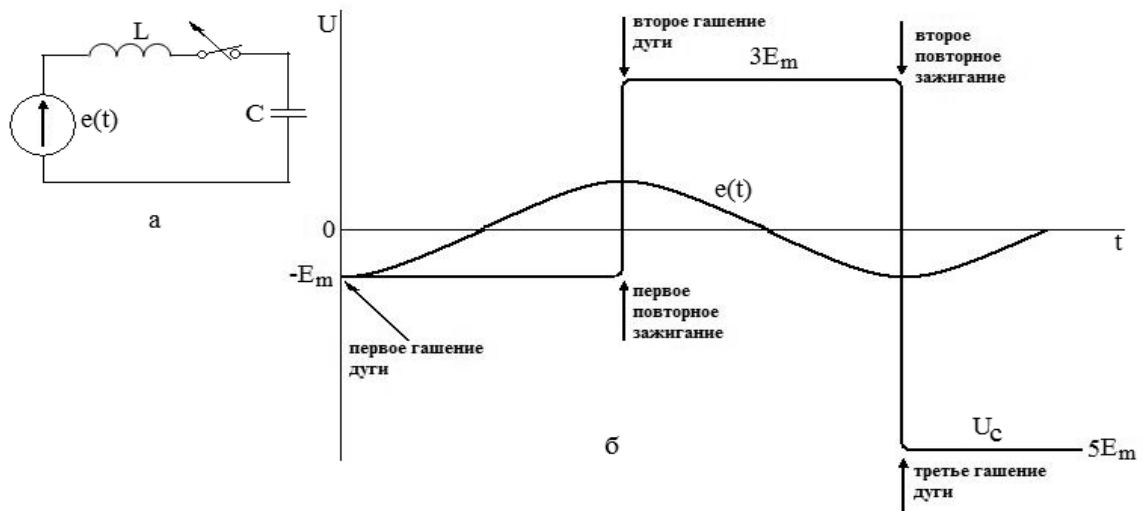


Рис. 4.43. Расчетная схема (а) и процесс повторных зажигания при отключении емкости (б)

Во время переходного процесса напряжение на линии (емкости) может достигнуть максимальной величины (без учета затухания) равной:

$$U_m = U_{np} + U_{св}, \quad (4.81)$$

где $U_{св}$ – амплитуда свободной составляющей переходного процесса, которая может быть упрощенно найдена как модуль разности:

$$U_{св} = |U_{np} - U_{нач}| = 2E_m. \quad (4.82)$$

Тогда максимальное напряжение на линии (емкости) U_m (4.81) будет равно $3E_m$. При этом в момент максимума напряжения суммарный ток проходит через нулевое значение и поэтому в выключателе вновь произойдет гашение дуги. При погасании дуги напряжение на линии (емкости) остается неизменным, равным примерно $3E_m$.

Через полпериода промышленной частоты (0,01 с) напряжение источника станет равно $-E_m$, а разность потенциалов на контактах выключателя достигнет $4E_m$. Если вновь произойдет пробой межконтактного промежутка в этот момент времени, то снова возникнут колебания напряжения на емкости с амплитудой свободной составляющей $4E_m$. А максимальное напряжение на линии (емкости) достигает $5E_m$. Если продолжить подобные рассуждения, то рассматриваемые опасные повторные зажигания могли бы привести к непрерывному возрастанию перенапряжений. Однако этого не происходит, так как современные выключатели имеют значительную скорость восстановления электрической прочности, благодаря чему в подавляющем большинстве случаев при отключении холостых линий происходит не более одного повторного зажигания дуги. Поэтому перенапряжение на линии не должно превышать $3U_{\phi}$. Однако в приведенных рассуждениях не рассматривается емкостный эффект, учет которого приводит к увеличению остающегося напряжения на линии, т.е. $U_0 > E_m$ и тогда

напряжение между контактами выключателя будет больше $2E_m$, что приведет к увеличению вероятности повторных зажиганий, к возрастанию амплитуды свободной составляющей переходного процесса и росту возможных перенапряжений.

Таким образом, повторные зажигания дуги в выключателе вблизи максимума восстанавливающегося напряжения на контактах приводят к существенным перенапряжениям и необходимо принимать меры по их ограничению. Рассмотрим основные пути ограничения перенапряжений при отключении ненагруженных линий.

1. Радикальным способом ограничения этого вида перенапряжений является увеличение скорости восстановления электрической прочности между контактами выключателя. Исключив повторные зажигания, мы полностью исключаем перенапряжения при отключении холостых линий. Однако этот способ не всегда пригоден, так как с увеличением быстродействия выключателей сильно возрастают перенапряжения при отключении холостых трансформаторов.

2. Применение выключателей с шунтирующими сопротивлениями – $R_{ш}$ (рис. 4.44).

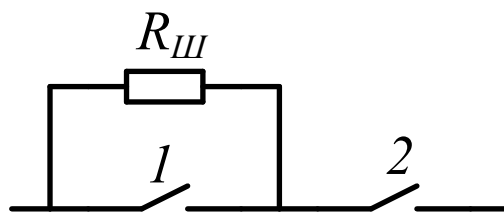


Рис. 4.44. Схема выключателя с шунтирующим сопротивлением $R_{ш}$

Выключатель имеет два разрыва 1 и 2, один из которых, например 1, зашунтирован сопротивлением. При отключении сначала размыкается разрыв 1, а затем начинают расходиться контакты разрыва 2. При прохождении тока через нуль дуга в первом разрыве гаснет, но после этого линия остается присоединенной к источнику через сопротивление $R_{ш}$.

Поэтому при изменении напряжения источника заряд на линии не остается неизменным, а частично стекает обратно в источник. Кроме того, после гашения дуги в первом разрыве ток в цепи приобретает активную составляющую и проходит через нуль уже не при максимуме напряжения. Поэтому после гашения дуги во втором разрыве линия остается заряженной до напряжения, которое существенно меньше E_m . Это уменьшает вероятность повторного зажигания, но если оно и произойдет, величина перенапряжения будет значительно снижена.

3. Применение вентильных разрядников на ЛЭП. При этом грозозащитные разрядники применяются для линий длиной не более 200 км. Ограничение связано с пропускной способностью этих разрядников.

4. Перенапряжения при отключении ненагруженных линий резко снижаются, если к линии остаются присоединенными электромагнитные трансформаторы напряжения. При увеличении напряжения на линии сердечники этих

трансформаторов очень сильно насыщаются, их индуктивность резко снижается и через эту сниженную индуктивность заряд с линии стекает в землю.

4.8.2. Коммутационные перенапряжения, возникающие при отключениях малых индуктивных токов

При отключении тока нагрузки или тока К.З. гашение дуги в выключателях высокого напряжения происходит при переходе тока через нулевое значение. В этом случае запасенная в индуктивности энергия равна нулю и перенапряжения практически не возникают. Когда же отключаются малые индуктивные токи (например, ток холостого хода трансформатора, который составляет единицы или даже доли процентов номинального тока трансформатора), обрыв тока происходит раньше его естественного прохождения через нулевое значение и в этой ситуации могут развиваться значительные коммутационные перенапряжения. Схема для анализа таких перенапряжений представлена на рис. 4.45.

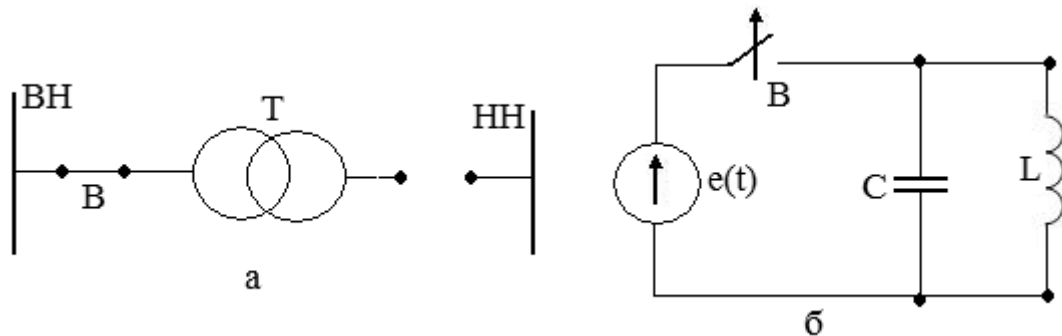


Рис. 4.45. Принципиальная (а) и расчетная (б) схемы при отключении ненагруженного трансформатора; T – трансформатор, B – выключатель, BH , HH – шины высокого и низкого напряжения, $e(t)$ – ЭДС источника питания, C – входная емкость трансформатора, L – индуктивность намагничивания трансформатора

Явление обрыва тока получило название среза тока, а ток i_0 называют током среза (рис. 4.46). Емкость C в расчетной схеме замещения включает в себя входную емкость трансформатора и суммарную емкость ошиновки от трансформатора до выключателя. Индуктивность L расчетной схемы моделирует индуктивность ненагруженного трансформатора (индуктивность намагничивания, которая может составлять десятки или сотни генри).

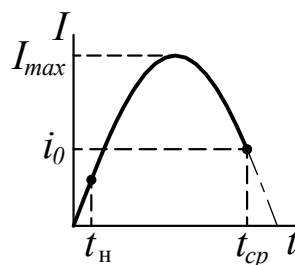


Рис. 4.46. Иллюстрация среза тока в выключателе

Пусть контакты выключателя начали расходиться в момент времени t_n , (рис. 4.46), между контактами загорается дуга, в выключателе начинается активный процесс дугогашения и в момент t_0 происходит срез тока при токе i_0 . Напряжение на емкости C в это мгновение равно U_0 . В колебательном контуре остается энергия, запасенная в индуктивности $L i_0^2/2$ и в емкости $C U_0^2/2$. В контуре возникнут колебания с максимальной амплитудой напряжения на емкости, определяемой из уравнения баланса энергии:

$$\frac{C U_m^2}{2} = \frac{C U_0^2}{2} + \frac{L}{2} i_0^2. \quad (4.83)$$

Отсюда:

$$U_m = \sqrt{U_0^2 + \frac{L}{C} i_0^2} \approx Z_T i_0, \quad (4.84)$$

где $Z_T = \sqrt{\frac{L}{C}}$.

Напряжение, определяемое по (4.84), может достигать больших значений. Реальные же напряжения ограничены пробоем межконтактного промежутка. Процесс повторных пробоев в выключателе представлен на рис. 4.46. После первого среза тока напряжение на емкости C начинает возрастать по закону:

$$U_C(t) = U_0 \cos \omega_0 t + i_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \sin \omega_0 t, \quad (4.85)$$

где $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – собственная частота колебаний контура.

На рис. 4.47 показан процесс восстановления электрической прочности межконтактного промежутка выключателя, если бы дуга погасла в момент t_n . Когда происходит срез тока (t_0 и далее), то вследствие интенсивного распада дуги прочность промежутка быстро возрастает до значений кривой $U_{эл пр}(t)$.

Повторный пробой наступит, когда напряжение на контактах выключателя $\Delta u(t)$ пересечется с кривой $U_{эл пр}(t)$. В связи с тем, что $\Delta u(t) = U_C(t) - e(t)$, то момент пробоя можно определить как точку пересечения перенапряжений на емкости с кривой $U_{эл пр}(t) + e(t)$. После повторного пробоя напряжение на емкости становится равным ЭДС, в цепи вновь появляется ток, в выключателе вновь начинается процесс дугогашения и происходит новый срез тока, но уже при меньшем значении, чем i_0 . Вследствие этого и ожидаемое напряжение оказывается меньше. Но если оно достаточно велико, то вновь повторится повторный пробой в выключателе и так будет длиться до тех пор, пока максимальное напряжение между контактами выключателя не сделается меньше восстанавливающейся прочности межконтактного промежутка выключателя.

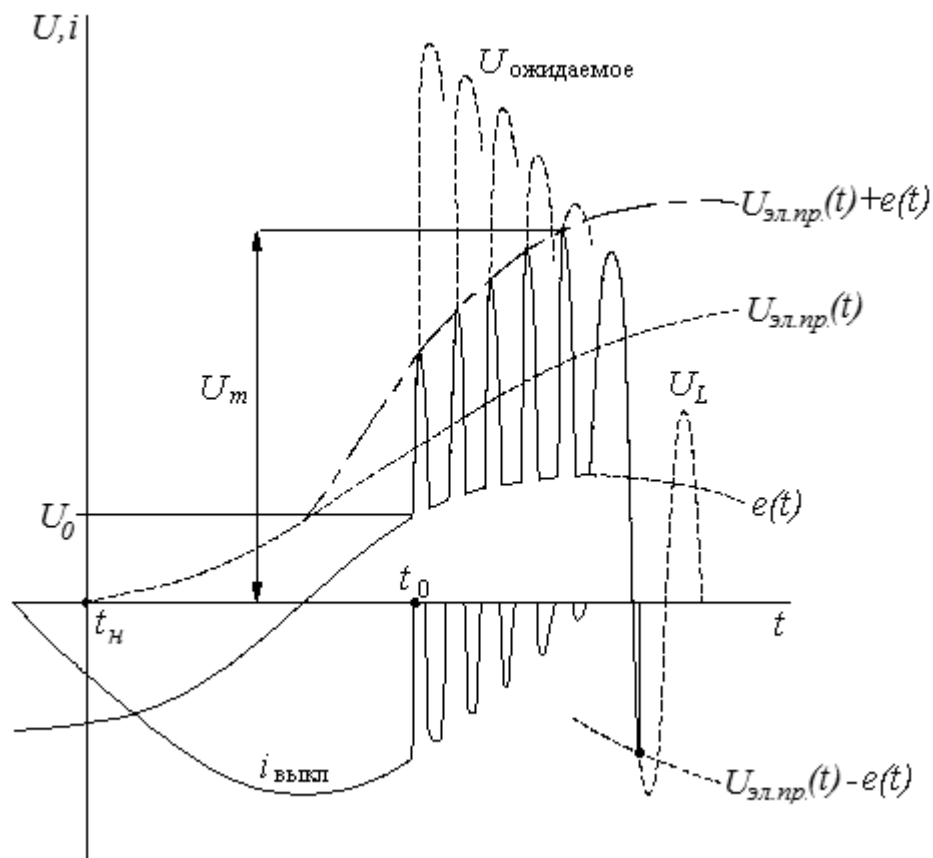


Рис. 4.47. Процесс повторного зажигания дуги в выключателе при отключение нагрузок индуктивного характера

В экспериментах по отключению трансформаторов 110–220 кВ наблюдались перенапряжения до $4,3U_{\Phi m}$ ($U_{\Phi m}$ – максимальное фазное напряжение) и до $2,75U_{\Phi m}$ для трансформаторов 380...410 кВ. Так как энергия, запасаемая в колебательном контуре, относительно невелика, то защита от этих перенапряжений может осуществляться с помощью обычных грозозащитных вентильных разрядников или ОПН.

4.8.3. Перенапряжения при однофазном замыкании на землю в системах с незаземленной нейтралью

При нарушении изоляции провода относительно земли в сетях с глухо заземленной нейтралью протекает большой ток однополусного К.З. и защита немедленно отключает линию. Иначе обстоит дело в системах с незаземленной нейтралью. Здесь через место замыкания на землю протекает относительно небольшой емкостный ток и нет необходимости немедленно отключать линию (рис. 4.48).

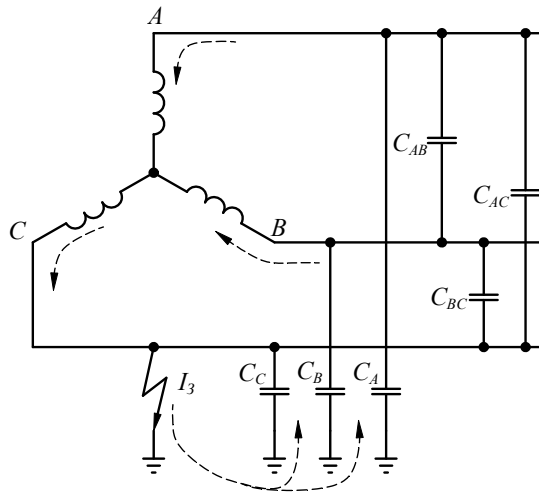


Рис. 4.48. Протекание токов в сети с изолированной нейтралью при однофазном КЗ на землю

При прохождении емкостного тока через нулевое значение возможно самопогасание дуги. На поврежденной фазе восстановится напряжение, после чего возможно повторное зажигание дуги и т.д.. Такие периодические замыкания на землю называют перемежающимися. Перемежающиеся дуги вызывают длительные перенапряжения, охватывающие всю систему. Существует несколько гипотез возникновения перенапряжений при перемежающихся дугах (Петерсен, Слепьян и Петерс, Беляков и др.). Здесь мы рассмотрим гипотезу Петерсена.

Механизм развития перенапряжений рассмотрим на эквивалентной схеме сети, представленной на рис. 4.48, где C_A , C_B , C_C – емкости проводов фаз относительно земли, C_{AC} , C_{AB} , C_{BC} – междуфазовые емкости. Для упрощения нашего рассмотрения положим $C_A \approx C_B \approx C_C \approx C$ и $C_{AB} \approx C_{AC} \approx C_{BC} \approx C_{12}$.

Пусть в момент, когда напряжение на фазе C проходило через отрицательный максимум, произошло замыкание этой фазы на землю. Заметим, что в момент, предшествующий замыканию, напряжение на двух других фазах $U_A = U_B = 0,5U_\Phi$ и, следовательно, суммарный заряд в системе $0,5U_\Phi \cdot C + 0,5U_\Phi \cdot C - U_\Phi \cdot C = 0$ и, соответственно, потенциал нейтрали $U_n = 0$. В результате замыкания фазовые (C) и междуфазовые емкости (C_{12}) здоровых фаз оказываются включенными параллельно (рис. 4.49, а и рис. 4.49, б). При этом происходит практически мгновенное перераспределение зарядов между ними, и напряжение на емкостях окажется равным:

$$U_{t=0} = \frac{\sum Q}{\sum C} = \frac{2C \cdot 0,5U_\Phi + 2C_{12} \cdot 1,5U_\Phi}{2C + 2C_{12}}. \quad (4.86)$$

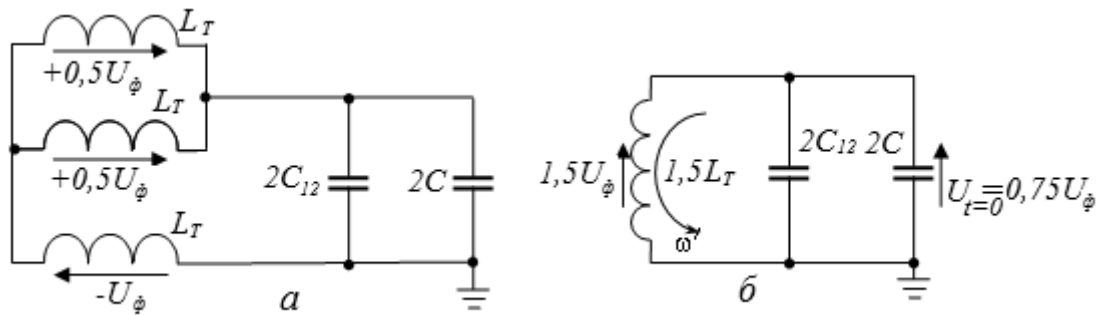


Рис. 4.49. Схема замещения сети для момента зажигания дуги

В сетях 6-35 кВ $C = (3 \dots 5)C_{12}$. Принимая $C = 3C_{12}$, получим $U_{t=0} = 0,75U_{\phi}$. Таким образом, напряжение на емкостях составляет $0,75U_{\phi}$, а в контуре действует (рис. 4.49, б) напряжение источника, равное $1,5U_{\phi}$. Следовательно, источник будет дозаряжать емкости до $1,5U_{\phi}$ в высокочастотном колебательном режиме с частотой ω' . Частота свободных колебаний ω' во много раз больше частоты сети, поэтому можно считать, что за полпериода свободных колебаний напряжение источника остается примерно постоянным и равным $1,5U_{\phi}$. Тогда максимальное напряжение на здоровых фазах, которое будет иметь место через полпериода свободных колебаний ($t = \pi/\omega'$):

$$U_m = U_{np} + U_{св};$$

$$U_{св} = (U_{np} - U_{нач}) e^{-\alpha t} = (1,5U_{\phi} - 0,75U_{\phi}) e^{-\alpha t}. \quad (4.87)$$

В первом приближении величина $e^{-\alpha t}$ может быть принята равной 0,85. Тогда:

$$U_m = 2,14 U_{\phi}. \quad (4.88)$$

Если бы замыкание оказалось металлическим, то после затухания свободных колебаний процесс был бы закончен (пунктир на рис. 4.50).

Однако в момент, когда напряжение свободных колебаний имеет максимум, ток $I_{св} = 0$. Так как $\omega' \gg \omega$, то свободная составляющая тока замыкания много больше принужденной составляющей. Поэтому можно принять, что при $I_{св} = 0$ суммарный ток через место замыкания также примерно равен нулю.

Следовательно, в момент прохода высокочастотного тока через нуль возможно погасание дуги. После погасания дуги на проводах здоровых фаз остается избыточный заряд $Q = U_m \cdot 2C$, перераспределяющийся между всеми тремя емкостями фаз относительно земли, которые при этом приобретут дополнительный потенциал:

$$U_H = \frac{Q}{3C} = \frac{2}{3} U_m = \frac{2}{3} \cdot 2,14 U_{\phi} = 1,43 U_{\phi}. \quad (4.89)$$

Этот потенциал представляет собой не что иное, как смещение нейтрали системы.

Так как заряд емкости неповрежденной фазы переходит на емкость «больной» через индуктивность обмотки трансформатора, то процесс имеет характер колебаний.

В процессе этого колебательного процесса напряжение на «больной» фазе через полпериода свободных колебаний достигнет максимальной величины (так называемый «пик гашения»):

$$U_{n.z.} = U_{np} + U_{cv}; \quad U_{cv} = U_{np} - U_{нач}; \quad U_{нач} = 0;$$

тогда:

$$U_{n.z.} = 2U_{np}. \quad (4.90)$$

Принужденное значение напряжения складывается из суммы напряжения смещения нейтрали и значения фазной ЭДС для данного момента времени, которое можно принять равным ($e_c = -U_\phi$):

$$U_{np} = U_n + e_c = 1,43U_\phi + (-U_\phi) = 0,43U_\phi, \text{ а } U_{n.z.} = 2 \cdot 0,43U_\phi = 0,86U_\phi. \quad (4.91)$$

Предположим, что первый пик гашения не вызвал немедленного повторного зажигания дуги. Предположим также, что повторного зажигания не произошло в течение всего последующего полупериода рабочей частоты (рис. 4.50). Найдем потенциалы фаз к этому моменту (складывая напряжение источника с потенциалом нейтрали):

$$U_A = -0,5U_\phi + U_n = -0,5U_\phi + 1,43U_\phi = 0,93U_\phi,$$

$$U_B = -0,5U_\phi + U_n = 0,93U_\phi,$$

$$U_C = +U_\phi + U_n = 2,43U_\phi. \quad (4.92)$$

Значительное повышение напряжения на фазе *C* создает возможность повторного зажигания дуги на прежнем месте, еще сохранившем остаточную ионизацию. Если в момент максимума напряжения на фазе произойдет новое зажигание дуги, то рассмотренный нами процесс повторится.

В момент повторного зажигания:

$$U_{t=0} = \frac{-2C_{12} \cdot 1,5U_\phi + 2C \cdot 0,93U_\phi}{2(C + C_{12})} = 0,35U_\phi. \quad (4.93)$$

Следует учесть, что теперь $U_{AC} = U_{BC} = -1,5U_\phi$.

Максимальное напряжение на здоровых фазах:

$$U_m = U_{np} + U_{cv} = -1,5U_\phi + (-1,5U_\phi - 0,35U_\phi) = -3,07U_\phi. \quad (4.94)$$

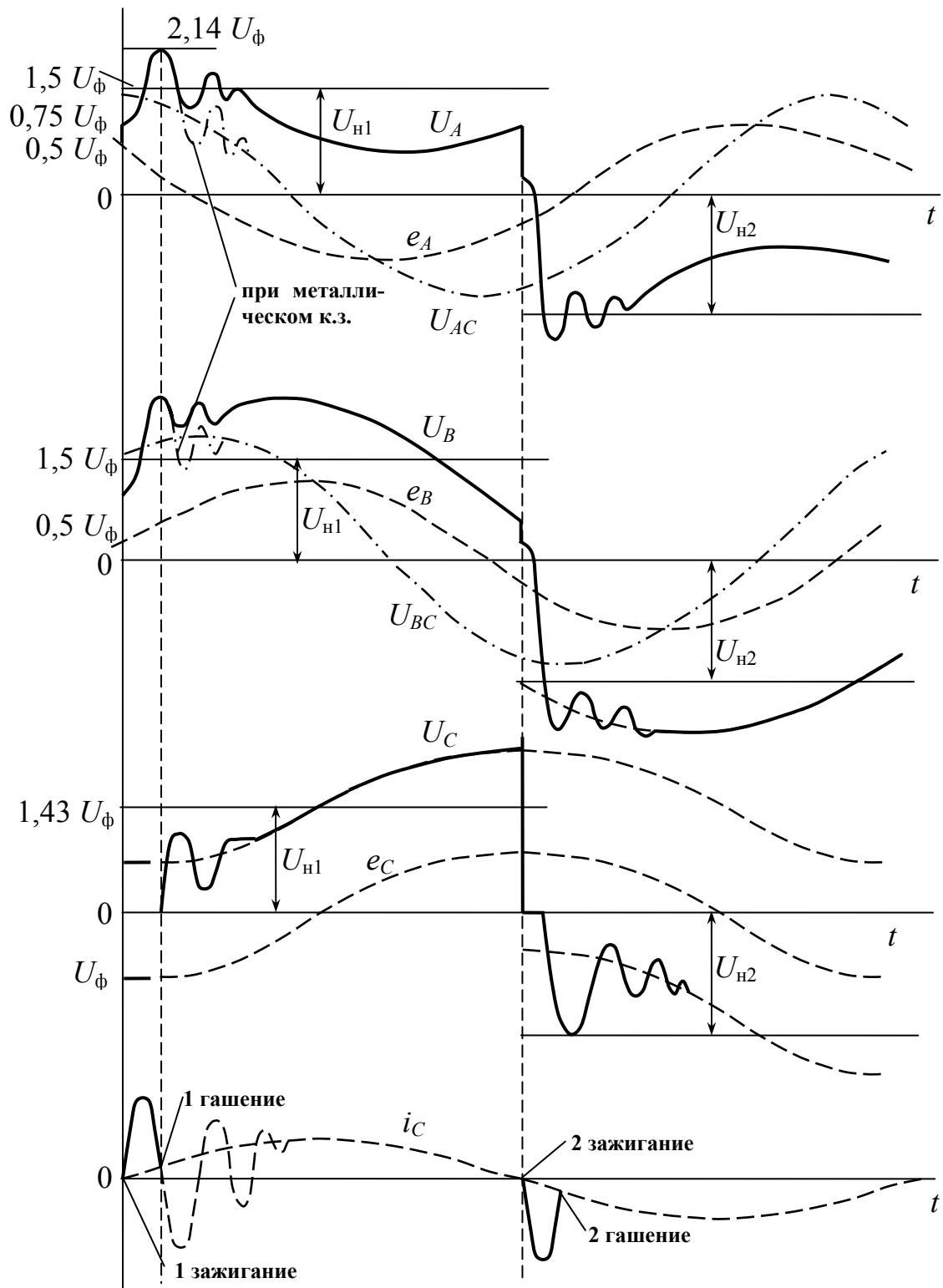


Рис. 4.50. Развитие перенапряжений при дуговом замыкании на землю (теория Петерсена)

После второго гашения дуги потенциал нейтрали примет значение:

$$U_n = \frac{2}{3}U_m = \frac{2}{3}(-3,07U_\phi) = -2,04U_\phi. \quad (4.95)$$

Поскольку в системе имеются потери, то очевидно, что после ряда зажиганий дуги напряжение в предшествующем полупериоде будет отличаться от последующего только знаком $U_{m(n)} - U_{m(n-1)}$. Тогда, используя выражения (4.89) - (4.85), нетрудно получить амплитуду предельного перенапряжения на здоровых фазах:

$$U_{m(n)} = 1,5U_{\Phi} \frac{1,5 + \frac{C}{C + C_{12}} e^{-\alpha t}}{1,5 - \frac{C}{C + C_{12}} e^{-\alpha t}}. \quad (4.96)$$

Мы рассмотрели развитие перенапряжений по теории Петерсена, которая дает абсолютный максимум возможных перенапряжений. Практически такое стечение неблагоприятных обстоятельств, которое мы приняли в расчет (замыкание в момент максимума напряжения, погасание дуги в момент перехода высокочастотного тока через ноль, отсутствие зажигания от пика гашения, повторный пробой в момент максимума напряжения на поврежденной фазе), не может иметь места. Непосредственные эксперименты на линиях показали, что в большинстве случаев перенапряжения на линиях меньше $3U_{\Phi}$ и лишь в редких случаях они приближаются к $3,5U_{\Phi}$.

4.8.4. Гашение емкостного тока замыкания на землю с помощью дугогасящих аппаратов

В системах с изолированной нейтралью через место однофазного замыкания протекает относительно небольшой емкостный ток и возможно самопогасание дуги. Однако дуговое замыкание на землю быстро самоликвидируется только при небольших токах замыкания на землю (5...10 А в сетях 35 кВ и 20...30 А в сетях 6–10 кВ). При средних токах дуга имеет перемежающийся характер и может приводить к существенным перенапряжениям, длительность которых равна времени горения дуги. При больших токах дуга имеет устойчивый характер, может гореть неограниченно долго и в конце концов перебрасывается на другие фазы, приводя к многофазному короткому замыканию и отключению линии. Поэтому во всех случаях необходима по возможности быстрая ликвидация дуги. В системах с резонансным заземлением нейтрали это осуществляется с помощью дугогасящих аппаратов.

Рассмотрим простейшую трехфазную систему, в которой произошло замыкание на землю одной из фаз (рис. 4.51). Для простоты положим, что емкости фаз на землю равны между собой.

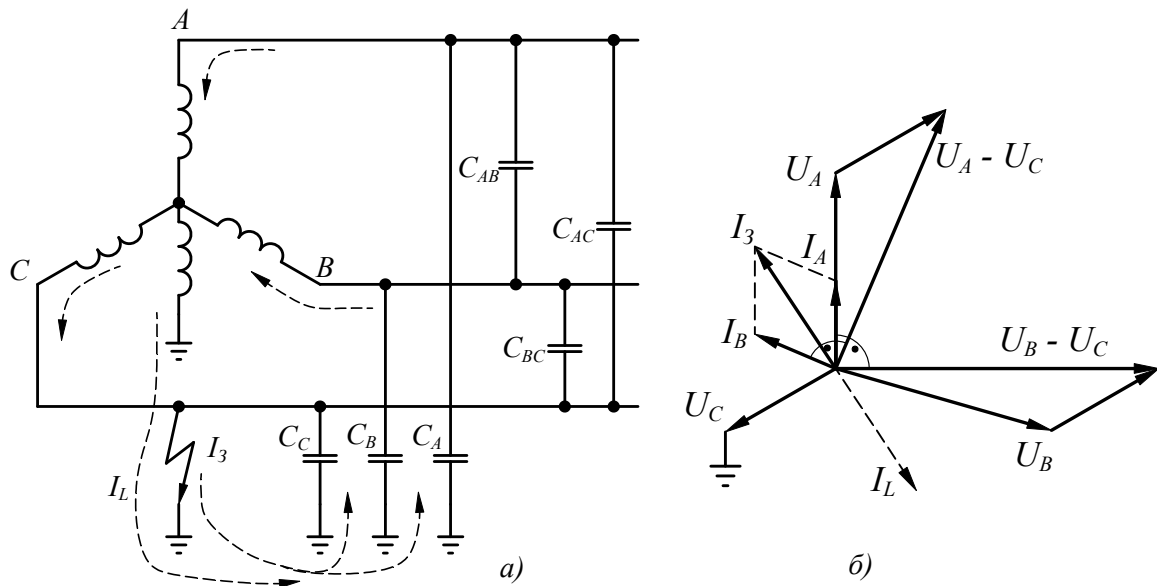


Рис. 4.51. Компенсация емкостного тока: а – схема сети при однофазном замыкании на землю, б – векторная диаграмма токов и напряжений при однофазном замыкании на землю с катушкой для компенсации емкостного тока

$$C_A = C_B = C_C = C.$$

Ток замыкания I_3 содержит две составляющие I_A и I_B , которые протекают, соответственно, под действием линейных напряжений $(\dot{U}_A - \dot{U}_C)$ и $(\dot{U}_B - \dot{U}_C)$ и по модулю равны $\sqrt{3}U_\phi \omega C$. Геометрическое сложение токов $\dot{I}_A + \dot{I}_B$ (см. векторную диаграмму на рис. 4.51, б.) дает нам суммарный ток замыкания на землю:

$$I_3 = 3U_\phi \omega C. \quad (4.97)$$

Для уменьшения (компенсации) этого тока с помощью дугогасящих аппаратов в схему вводится индуктивный ток, равный по величине и обратный по направлению току короткого замыкания на землю (рис. 4.50).

Как видно из рис. 4.51, при замыкании на землю одной из фаз напряжение на нейтрали равно U_ϕ . Ток, протекающий через катушку,

$$I_L = U_\phi / \omega L.$$

При полной компенсации емкостного тока замыкания на землю $I_L = I_3$ и, следовательно:

$$L_k = \frac{1}{3\omega^2 C}. \quad (4.98)$$

Возможны также еще два режима работы: недокомпенсация, когда $I_L < I_3$ и перекомпенсация, когда $I_L > I_3$.

При этом остаточный ток в месте замыкания на землю:

$$I_0 = \sqrt{I_a + (I_L - I_C)}, \quad (4.99)$$

где $I_a \approx U_\Phi \frac{r_k}{\omega^2 L_k^2}$ – активная составляющая тока в месте замыкания на землю;

r_k, L_k – соответственно, активное сопротивление и индуктивность дугогасящей катушки.

Из выражения (4.98) следует, что при идеальной компенсации частота собственных колебаний схемы $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{3L_K C}}$ равна частоте сети, т. е. в сети имеет место явление резонанса для токов основной частоты. Поэтому наряду с терминами «компенсация емкостного тока», «заземление через катушку Петерсена», «заземление через настроенную индуктивность» применяется термин «резонансное заземление нейтрали».

Если рассмотреть процесс зажигания и последующего гашения дуги в сети с дугогасящей катушкой, то можно показать, что зажигание дуги, так же как и в сети с изолированной нейтралью, сопровождается колебательным процессом, причем частота и амплитуда колебаний мало зависят от наличия катушки. Действительно, индуктивность катушки зашунтирована дуговым промежутком и индуктивностью поврежденной фазы L , которая значительно меньше, чем L_k . После обрыва дуги в момент перехода высокочастотного тока через нулевое значение начинается колебательный процесс перетекания избыточных зарядов с емкостей неповрежденных фаз на емкость поврежденной фазы через индуктивность рассеяния трансформаторов. Индуктивность катушки включена параллельно индуктивности поврежденной фазы, но поскольку $L_k \gg L$, она в этом случае практически не оказывает влияния ни на частоту, ни на амплитуду колебаний. После затухания колебаний нейтраль приобретает потенциал относительно земли, равный $2/3 U_m$ (U_m – напряжение на здоровых фазах в момент обрыва дуги). И до этого момента времени процесс в схеме с катушкой и в схеме без катушки протекает одинаково.

Далее в схеме без катушки это напряжение сохраняется вплоть до следующего зажигания дуги и является причиной дополнительного повышения напряжения на проводах. В схеме с дугогасящей катушкой все три емкости начинают разряжаться через неё. Частота свободных колебаний в этом случае равна частоте источника или незначительно отличается от неё, в зависимости от того, в каком режиме работает сеть (компенсация или небольшая расстройка). Амплитуда свободных колебаний примерно равна $2/3 U_m$, причем они находятся в противофазе с напряжением источника.

На рис. 4.52, а приведено напряжение на поврежденной фазе при отсутствии катушки, а на рис. 4.52, б – при наличии катушки (режим идеальной настройки).

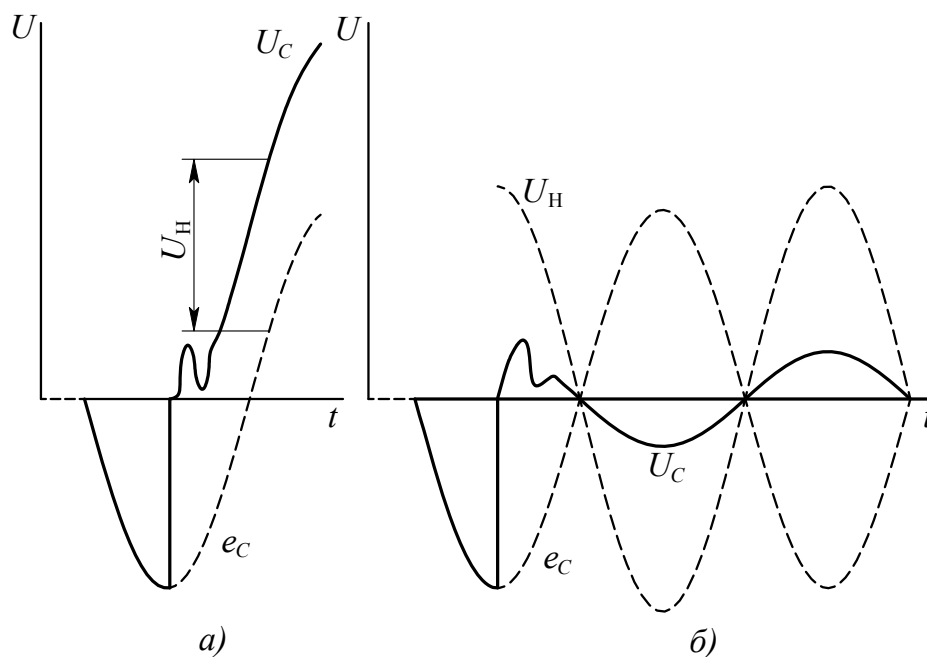


Рис. 4.52. Кривые восстановления напряжения на дуговом промежутке а – без катушки; б – с катушкой; e_c – ЭДС фазы С; U_H – напряжение нейтрали

Из сравнения кривых видно, что пик гашения в обоих случаях одинаков, но дальнейший ход процесса различен. В случае изолированной нейтрали напряжение после затухания высокочастотных колебаний возрастает и через полпериода может привести к повторному зажиганию дуги. В схеме с катушкой напряжение после затухания высокочастотных колебаний растет медленнее, так как составляющая свободных колебаний низкой частоты и фазовое напряжение направлены в противоположные стороны. Восстановление напряжения на дуговом промежутке до величины фазового напряжения произойдет после затухания свободной составляющей, т. е. через несколько полупериодов. За это время прочность дугового промежутка восстанавливается и новое зажигание дуги становится маловероятным.

Таким образом, дугогасящие аппараты способствуют гашению дуги не только за счет уменьшения тока в месте замыкания, но и благодаря существенному уменьшению скорости восстановления напряжения после погасания дуги. Так как по теории Н.Н. Белякова максимальные напряжения при дуговом замыкании на землю могут достигаться уже при втором зажигании дуги и определяются в основном величиной пика гашения, то включение катушки Петерсена не оказывает существенного влияния на предельно возможные перенапряжения. Однако она резко ограничивает их длительность, что очень важно для трансформаторной изоляции, и уменьшает вероятность появления перенапряжений, близких к предельным.

4.8.5. Смещение нейтрали в сетях с дугогасящими аппаратами

При нормальной работе сети потенциал нейтрали всегда несколько отличается от нуля, так как полной симметрии фаз даже при строго симметричной

нагрузке достичь практически невозможно. В частности, при горизонтальном расположении проводов емкость средней фазы по отношению к земле на 10 % ниже, чем емкости крайних фаз. Смещение нейтрали ($U_{\text{но}}$) при этом не превышает 3...4 % фазового напряжения и не представляет никакой опасности. Однако условия существенно меняются при включении дугогасящих аппаратов.

Найдем напряжение на нейтрали в случае простейшей схемы, представленной на рис. 4.53, а.

Используя известный из курса ТОЭ метод замены источника напряжения источником тока, несложно получить схему замещения, представленную на рис. 4.53, б, в которой

$$E = \frac{\sum_1^3 E_i y_i}{\sum_1^3 y_i}, \quad (4.100)$$

где E_i – эдс фаз; $y_i = \frac{1}{r_i} + j\omega C_i$ – проводимость фаз.

В воздушных линиях активные сопротивления r_i при отсутствии короны малы и ими можно пренебречь. Тогда $y_i = j\omega C_i$:

$$\dot{Z} = \frac{1}{\sum_{i=1}^3 y_i}. \quad (4.101)$$

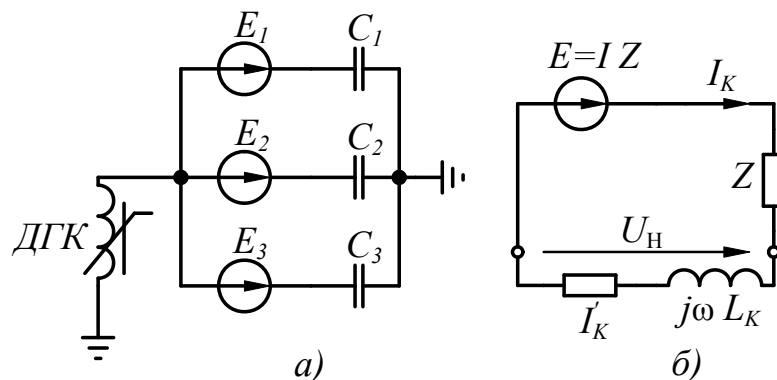


Рис. 4.53. Простейшая расчетная схема (а) и схема замещения (б) для определения смещения нейтрали

При отсутствии дугогасящей катушки напряжение на нейтрали $U_{\text{но}} = E$. При полной симметрии системы, когда $E_1 = E_2 = E_3 = 0$ и $C_1 = C_2 = C_3$

$$U_{\text{но}} = E = \frac{y_i \sum_1^3 \dot{E}_i}{\sum_1^3 y_i} = \frac{\sum_1^3 \dot{E}_i}{3} = 0 \quad (4.102)$$

При наличии катушки

$$U_{\text{н}} = I_K (r_K + j\omega L_K), \quad (4.103)$$

где $I_K = \frac{\dot{E}}{Z + r_K + j\omega L_K}$.

Используя приведенные соотношения и учитывая, что $r_K \ll j\omega L_K$, получим

$$\dot{U}_{\text{н}} = \dot{U}_{\text{но}} \frac{j\omega L_K}{r_K + j(\omega L_K - \frac{1}{3\omega C})}. \quad (4.104)$$

Модуль этой величины

$$|U_{\text{н}}| = U_{\text{но}} \frac{\omega L_K}{\sqrt{r_K^2 + (\omega L_K - \frac{1}{3\omega C})^2}}. \quad (4.105)$$

При идеальной настройке катушки $\omega L_K = \frac{1}{3\omega C}$, и, следовательно, $U_{\text{но}} = \frac{\omega L_K}{r_K}$, т.е. при идеальной настройке катушки смещение нейтрали во столько раз больше смещения, имеющего место при отсутствии катушки, во сколько раз индуктивное сопротивление катушки больше активного. Отношение $\omega L_K/r_K$ может достигать 20. При этом в случае горизонтального расположения проводов линии:

$$U_{\text{н}} = U_{\text{но}} \times 20 \approx 0,7U_{\text{ф}}, \quad (4.106)$$

что, безусловно, недопустимо, главным образом, в силу влияния линии электропередачи на соседние линии связи. При обрыве провода, при одновременном замыкании и размыкании контактов выключателя, при пофазных испытаниях и т.п. смещение нейтрали существенно возрастает. Уменьшение смещения нейтрали можно достичь двумя путями:

- уменьшением величины $U_{\text{но}}$;
- некоторой расстройкой катушки.

Для уменьшения $U_{\text{но}}$ в системах с резонансным заземлением нейтрали следует обращать особенно серьезное внимание на симметрию емкостей фаз и

в случае необходимости применять транспозицию проводов. При этом достаточно уменьшить $U_{\text{но}}$ до $0,01U_{\text{ф}}$.

Некоторая расстройка катушки, не приводящая к ухудшению условий гашения дуги, является желательной и особенно целесообразна в сетях, не имеющих транспозиции. Учитывая возможность отключения одной из фаз на участке линии, рекомендуется работать с перекомпенсацией, так как режим недокомпенсации после отключения какого-либо участка может перейти в режим настройки.

4.9. Средства защиты от перенапряжений

В сетях до 35 кВ часто для защиты используют открытые разрядные промежутки – защитные разрядники (“рога”) и трубчатые разрядники. Срабатывание таких разрядников вызывает резкий спад напряжения, возникновение переходных процессов и опасных перенапряжений на продольной изоляции высоковольтных устройств (трансформаторы, генераторы, реакторы и т. д.) Кроме этого, такие разрядники имеют крутую вольт-секундную характеристику (ВСХ), т. к. форма электрического поля резконеоднородная. Это не позволяет осуществлять защиту объектов в области коротких времен воздействия напряжения (грозовые перенапряжения) (рис. 1.20).

Одним из разрядников такого типа является трубчатый разрядник (РТ), рис. 4.54.

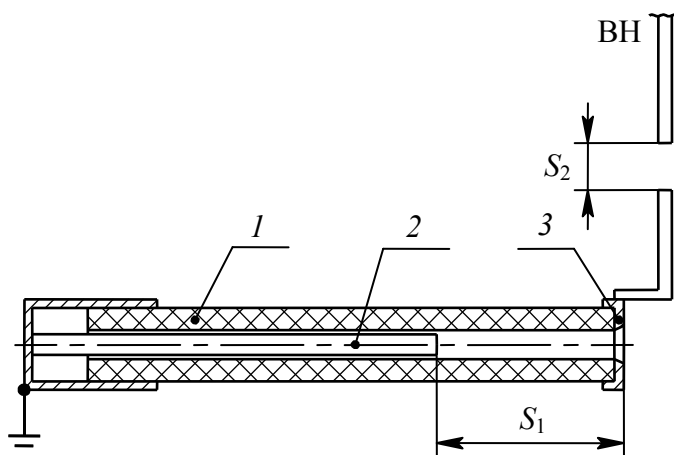


Рис. 4.54. Устройство трубчатого разрядника: S_1 – основной промежуток; S_2 – внешний искровой промежуток; 1 – диэлектрическая труба; 2 – стержневой электрод; 3 – открытый электрод

Электроды искрового промежутка помещаются в диэлектрическую трубу (1) из газогенерирующего материала (например, винипласт). Основной промежуток S_1 обеспечивает дугогашение. Промежуток S_2 служит для отделения газогенерирующей трубки от сети, чтобы избежать ее разложения от токов утечки. При появлении перенапряжений пробивается S_1 и S_2 . Через них протекает импульсный ток и сопровождающий ток промышленной частоты. Температура повышается, происходит интенсивное газовыделение. Давление повышается до

десятков атмосфер. Газ выходит через открытый электрод (3). Создается продольное дутье. Дуга выдувается наружу. При переходе тока через 0 дуга гаснет. Из-за недостатков (крутая ВСХ) РТ не применяются для защиты ответственного оборудования.

Наиболее широкое распространение в сетях высокого напряжения получили вентильные разрядники (РВ), которые имеют пологую ВСХ. Они состоят из нескольких искровых промежутков (ИП), включенных последовательно, последовательных нелинейных рабочих сопротивлений (НС) и шунтирующих сопротивлений ($R_{ш}$) (рис. 4.55).

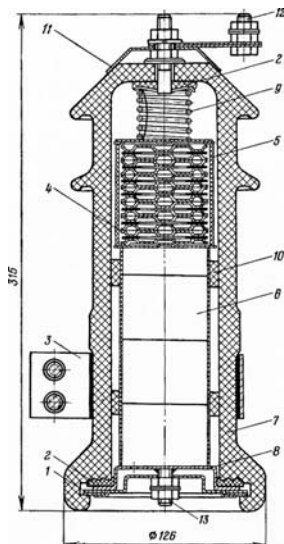


Рис. 4.55. Конструкция вентильного разрядника РВ-10: 1 – нижний фланец, 2 – герметик, 3 – фланец крепления РВ, 4 – искровые разрядники, 5 – изоляционный корпус разрядников, 6 – нелинейные рабочие сопротивления, 7 – корпус РВ, 8, 13 – заземленный электрод, 9 – пружина, 10 – демпфирующие прокладки, 11, 12 – высоковольтный электрод

Искровые промежутки служат для отделения нелинейного сопротивления от постоянного воздействия рабочего напряжения и протекающего через него тока, который разрушает нелинейное сопротивление. Нелинейное сопротивление служит для ограничения сопровождающего тока до величины, необходимой для гашения дуги. $R_{ш}$ служит для выравнивания распределения напряжения по элементарным разрядным промежуткам с целью исключения ложного срабатывания разрядника.

РВ ограничивает перенапряжения и гасит дугу сопровождающего тока без отключения сети или подстанции.

После гашения дуги разрядник возвращается в исходное состояние и готов к повторной работе. Число срабатываний РВ – 20 или 50.

В простейших РВ (типа РВС, РВП) ток гашения дуги составляет 80 А. Более современные РВ имеют ток гашения дуги 250 А.

Материалами НС являются вилит и тервит. Вольт-амперная характеристика их описывается выражением

$$U = K \cdot I^\alpha,$$

где α – коэффициент вентильности; K – постоянная.

Для вилита $\alpha = 0,11-0,2$; для тервита $\alpha = 0,15-0,25$.

РВ делятся на 4 группы. Наилучшими защитными свойствами обладают РВ I группы, но они и более дорогие.

IV группа – РВП (подстанционные);

III группа – РВС (станционные);

II группа – РВМ (магнитовентильные), РВМГ (магнитовентильные, грозовые);

I группа – РВТ (токоограничивающие), РВРД (с растягивающейся дугой).

Существенное улучшение защитных характеристик может быть достигнуто при отказе от использования ИП. Для этого требуются материалы с резко нелинейной ВАХ. Этим требованиям отвечает материал на основе оксида цинка, из которого изготавливают нелинейные резисторы – варисторы. Защитные устройства на их основе носят название ограничителей перенапряжений нелинейных (ОПН) (рис. 4.56). Коэффициент нелинейности ОПН составляет $\alpha = 0,02-0,1$. ОПН собираются из отдельных дисков (варисторов), которые помещаются в герметичный фарфоровый корпус.



Рис. 4.56. Внешний вид ОПН

ОПН подключаются непосредственно к сети и заземляются через регистратор срабатываний. Малый коэффициент нелинейности ОПН позволяет глубоко ограничивать перенапряжения и применять их в сетях сверхвысокого и ультравысокого классов напряжений.

Литература к главе № 4

1. Техника высоких напряжений / Под ред. Г.С. Кучинского /.- С-П.: Энергоатомиздат.: 2003.-608с.

2. В.В.Базуткин, К.П. Кадомская и др. Перенапряжения в электрических системах и защита от них. Энергоатомиздат.: 1995.-320 с.
3. В.В. Базуткин, В.П.Ларионов и др. Техника высоких напряжений. М. Энергия. 1986.-464 с.
4. Техника высоких напряжений / Под ред. М.В. Костенко/, -М.: Энергия, 1973г.- 486 с.
5. Тиходеев Н.Н., Шур С.С. Изоляция электрических сетей. Энергия.: 1979.-304 с.
6. Л.В. Дмоховская Инженерные расчеты внутренних перенапряжений в электропередачах.- М.: Энергия, 1972.-296 с.
7. Техника высоких напряжений / Под ред. Д.В. Разевига /.- М.: Энергия, 1976.-506 с.
8. Prevelectron 2 Millenium (Молниеприемник с упреждающей стримерной эмиссией – Early streamer emission – ESE) – Новости электротехники, 2013, №1, с. 32-33.
9. Базелян Э. Еще раз про ESE-молниеотводы. – Новости электротехники, 2010, №1, с. 18-19.
10. Дмитриев В., Красавина М. Варисторы для ОПН. "Старение" в процессе эксплуатации. – Новости электротехники, 2010, №1, с. 38-41.
11. Кадыков Ю.М., Кадыкова О. Планетарная энергетика. Экологические и экономические аспекты. – Новости электротехники, 2010, №1, с. 48-53.

Контрольные вопросы к главе № 4:

1. Классификация перенапряжений и их кратность.
2. В чем состоит принципиальное отличие внешних перенапряжений от внутренних?
3. Почему грозовые перенапряжения наиболее опасны для сетей средних классов напряжения, а коммутационные для сетей высших классов напряжений?
4. Грозозащита ЛЭП и подстанций.
5. Зона защиты двух стержневых молниеотводов.
6. Защита подстанций от набегающих волн.
7. Зона защиты тросового молниеотвода.
8. Почему при прохождении по линии импульсов высокого напряжения происходит значительное изменение фронта импульса?
9. Каким образом импульсная корона влияет на параметры грозового импульса, распространяющегося по линии электропередачи?
10. Почему при воздействии на обмотку трансформатора импульсного напряжения возникает неравномерное распределение напряжения по виткам обмотки?
11. В чем отличие емкостной передачи волн перенапряжения в трансформаторах от электромагнитной?
12. Основные защитные устройства от перенапряжений.

13. Основные параметры молниевых разрядов.
14. Как определяется защитный угол троса?
15. Как определяется потенциал вершины опоры при прямом ударе молнии в опору с тросом?
16. От чего зависит величина резонансных перенапряжений на ЛЭП при несимметричных коротких замыканиях на землю?
17. В каком режиме перенапряжения весьма существенны при феррорезонансе?
18. Меры защиты от перенапряжений, возникающих при отключении ненагруженных линий.
19. Схема включения и принцип работы вентильного разрядника.
20. Устройство вентильного разрядника.
21. Принцип работы ограничителя перенапряжений.

Приложение 1

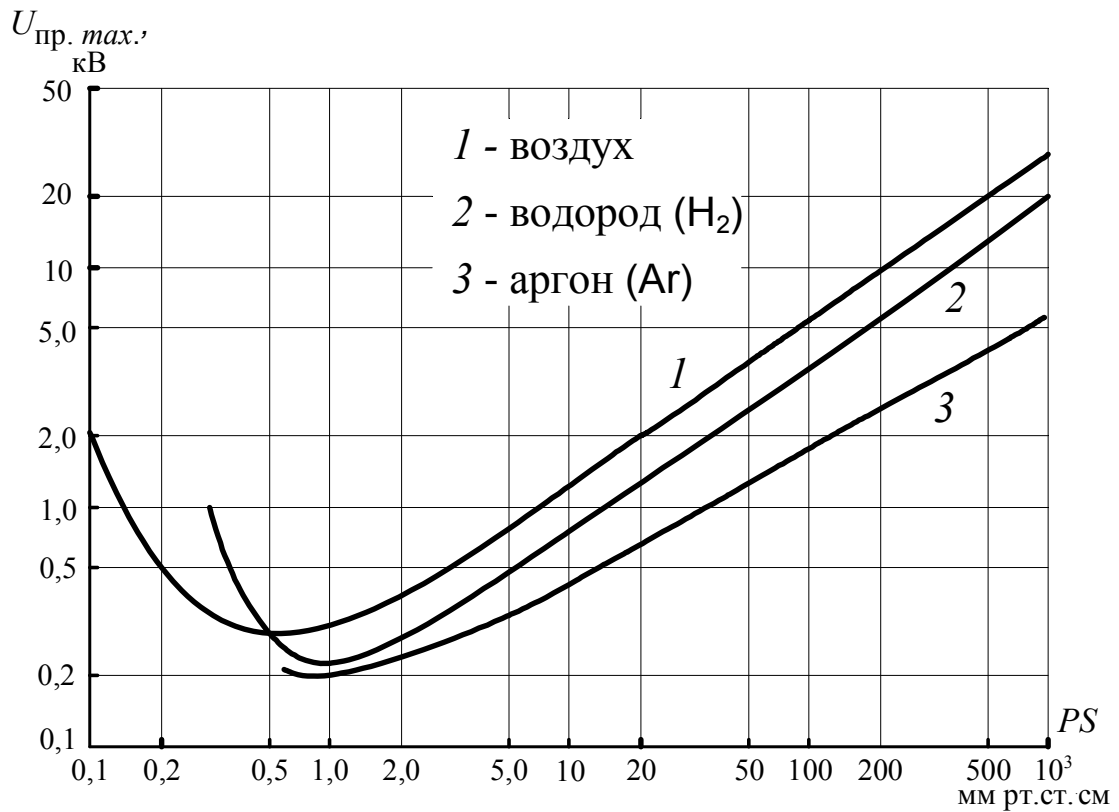


Рис. П1. Кривые Пашена для воздуха, водорода и аргона

В приложении 1, табл. П.1.1, приведены основные электрические характеристики некоторых газов при нормальных условиях. Видно, что существуют газы, у которых электрическая прочность выше, чем у воздуха, в шесть и более раз. Это, как правило, электроотрицательные газы. Наиболее широкое распространение в энергетике получил элегаз (SF_6).

Таблица П1.1

Электрические характеристики газов при температуре +20 °С и давлении 760 мм рт. ст. (101326 Па)

Диэлектрик	$E_{пр}$, кВ/см	ϵ	$T_{кип}$, °С	Свойство	Химический состав	Литература
Воздух	30	1,00059	-194,0	Электроотрицательный	N ₂ , O ₂ , Ar, CO ₂ , H ₂	[П3, П4]
Азот	29	1,00058	-195,8	Электроотрицательный	N ₂	[П3, П4]
Аргон	7,0	1,00056	-186,0	Электроположительный	Ar	[П3]
Водород	18	1,00027	-252,8	Электроположительный	H ₂	[П3, П4]
Углекислый газ	27	1,00096	-78,5	Электроположительный	CO ₂	[П3, П4]
Элегаз (гексафторид серы)	72	1,00191	-63,8	Электроотрицательный	SF ₆	[П3, П4]
Фреон-11 (трихлорфторметан)	90-132	1,0016	-24,1	Электроотрицательный	CCl ₃ F	[П3, П4]
Тетрафторметан	189	1,0006	-127,9	Электроотрицательный	CCl ₄	[П3, П4]

Электрические характеристики жидких диэлектриков

Диэлектрик	$E_{пр}$, кВ/см ($U_{пр}$, кВ)	ϵ	$tg\delta$	Объемное сопротивл. (ρ), ом·см	Темпера- тура за- мерзания ($T_{зам}$), °С	Литера- тура
Трансформаторное масло марки ТАп ТУ 38-101-281-80	280 (70)	2,3	0,215	$5 \cdot 10^{10}$	-45	[П3]
Трансформаторное масло марки Т-750	300 (75)	2,25	0,056	10^{11}	-55	[П3]
Трансформаторное масло марки Тк ТУ 38-401-358-84	320 (80)	2,2	0,004	10^{12}	-45	[П3]
Конденсаторное масло ГОСТ 5775-68	200	2,1...2,3	0,005	10^{12}	-45	[П3, П4]
Кабельное масло МН-4	180	2,2	0,003	10^{11}	-45	[П3]
Совол-10	220	4,3	0,03	10^{12}	-6	[П3]
Трихлордифенил	200	5,9	0,015	$3 \cdot 10^9$	-18	[П3]
Кремнийорганическое масло типа ПМС-10	(35)	2,6...2,7	0,0002	$2 \cdot 10^{12}$	-65	[П3]
Кремнийорганическое масло типа ПЭС-3	(45)	2,4	0,0003	10^{11}	-70	[П3]
Фторуглеводородные жидкости типа Хладон-12	(32)	2,52	0,0002	10^{12}	–	[П3]
Касторовое масло	150	4...4,5	0,01...0,03	–	-15	[П3, П4]

Электрические характеристики твердых диэлектриков

Диэлектрик	Торговая марка	$E_{пр}$, кВ/см	ε	$tg\delta$	Объемное сопротивление (ρ), ом·см	Рабочая температура (максимальная) ($T_{раб}$), °С	Литература
Полиэтилен низкой плотности (ПЭНП)	–	450...550	2,2...2,3	0,0002	10^{15}	90	[П3]
Полиэтилен высокой плотности (ПЭВП)	–	450...550	2,2...2,4	0,0003	10^{15}	90	[П3]
Поливинилхлорид (ПВХ)	винипласт	350...450	3,2	0,02	10^{13}	90	[П3]
Политетрафторэтилен (ПТФЭ)	фторопласт	250...270	1,9...2,2	0,002	$10^{15} \dots 10^{18}$	до 260	[П4]
Полиметилметакрилат (ПММК)	оргстекло	150...250	3,6	0,06	$10^{10} \dots 10^{11}$	–	[П3]
Полистирол (ПС)	стирофлекс	250	2,5...2,6	0,0002	10^{15}	70	[П3]
Полиэтилентерефталат (ПЭТФ)	лавсан, майлар, дакрон	1800	3,1...3,2	0,003	10^{15}	120	[П3]
Полиформальдегид	-	200...230	3,7	0,004	10^{12}	105	[П3]
Поли-ε-капроамид	капрон	220	5,0...14,0	0,06...0,1	10^{11}	105	[П3]
Эпоксидный заливочный компаунд (ЭЗК) типа КЭ-3	–	370	4,4	0,008	$3,5 \cdot 10^{13}$	–	[П3]
Гетинакс (тип 113)	-	84	5,5	0,35	10^7	–	[П3]
Текстолит (тип 171)	–	50...100	5,0...6,0	0,3...0,05	10^6	105	[П3]
Стеклотекстолит (тип 221)	–	115	5,5	0,04	10^{10}	130	[П3]

Резина типа РТИ-1	–	419	3,4	0,021	$2,4 \cdot 10^{13}$	–	[П3]
Фарфор (Урал-изолятор)	–	330	6,0...7,0	0,025	$3,1 \cdot 10^{11}$	-70	[П3]
Эбонит	–	170...250	3,5	0,01	10^{15}	–	[П2]
Дельта-древесина	–	80...160	7,0...8,0	0,06...0,1	$10^{10} \dots 10^{12}$	–	[П2]

Приложение 2

Таблица П2.1

Разрядные напряжения шаровых промежутков (при импульсах 50 % разрядные напряжения), кВ_{макс} при 20°C и 760 мм рт. ст. для переменного напряжения, постоянного напряжения обеих полярностей и для стандартной импульсной волны отрицательной полярности. Один шар заземлен

Расстояние между шарами, см	Диаметр шаров, см										
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150
0,05	2,8										
0,10	4,7										
0,15	6,4										
0,20	8,0	8,0									
0,25	9,6	9,6									
0,30	11,2	11,2									
0,40	14,4	14,3	14,2								
0,50	17,4	17,4	17,2	16,8	16,8	16,8					
0,60	20,4	20,4	20,2	19,9	19,9	19,9					
0,70	23,2	23,4	23,2	23,0	23,0	23,0					
0,80	25,8	26,3	26,2	26,0	26,0	26,0					
0,90	28,3	29,2	29,1	28,9	28,9	28,9					
1,0	30,7	32,0	31,9	31,7	31,7	31,7	31,7				
1,2	(35,1)	37,6	37,5	37,4	37,4	37,4	37,4				
1,4	(38,5)	42,9	42,9	42,9	42,9	42,9	42,9				
1,5	(40,0)	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5				
1,6		48,1	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1				
1,8		53,0	53,5	53,5	53,5	53,5	53,5				
2,0		57,5	58,5	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0		
2,2		61,5	63,0	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5		
2,4		65,5	67,5	69,5	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0		
2,6		(69,0)	72,0	74,5	75,0	75,0	75,5	75,5	75,5		
2,8		(72,5)	76,0	79,5	80,0	80,5	81,0	81,0	81,0		
3,0		(75,5)	79,5	84,0	85,0	85,5	86,0	86,0	86,0	86,0	
3,5		(82,5)	(87,5)	95,0	97,0	98,0	99,0	99,0	99,0	99,0	
4,0		(88,5)	(95,0)	105	108	110	112	112	112	112	
4,5			(101)	115	119	122	125	125	125	125	
5,0			(107)	123	129	133	137	138	138	138	138
5,5				(131)	138	143	149	151	151	151	151
6,0				(138)	146	152	161	164	164	164	164
6,5				(144)	(154)	161	173	177	177	177	177
7,0				(150)	(161)	169	184	189	190	190	190
7,5				(155)	(168)	177	195	202	203	203	203
8,0					(174)	(185)	206	214	215	215	215
9,0					(185)	(198)	226	239	240	241	241

Продолжение табл. П2.1

Рас- стоя- ние между шара- ми, см	Диаметр шаров, см								
	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
10		(195)	(209)	244	263	265	266	266	266
11			(219)	261	286	290	292	292	292
12			(229)	275	309	315	318	318	318
13				(289)	331	339	342	342	342
14				(302)	353	363	366	366	366
15				(314)	373	387	390	390	390
16				(326)	392	410	414	414	414
17				(337)	411	432	438	438	438
18				(347)	429	453	462	462	462
19				(357)	445	473	486	486	486
20				(366)	460	492	510	510	510
22					489	530	555	560	560
24					515	565	595	610	610
26					(540)	600	635	655	660
28					(565)	635	675	700	705
30					(585)	665	710	745	750
32					(605)	695	745	790	795
34					(625)	725	780	835	840
36					(640)	750	815	875	885
38					(655)	(775)	845	915	930
40					(670)	(800)	875	955	975
45						(850)	945	1050	1080
50						(895)	1010	1130	1180
55						(935)	(1060)	1210	1260
60						(970)	(1110)	1280	1340

Расстояние между шарами, см	Диаметр шаров, см								
	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
65							(1160)	1340	1410
70							(1200)	1390	1480
75							(1230)	1440	1540
80								(1490)	1600
85								(1540)	1660
90								(1580)	1720
100								(1660)	1840
110								(1730)	(1940)
120								(1800)	(2020)
130									(2100)
140									(2180)
150									(2250)

Примечания: 1. Данные таблицы неприменимы к импульсным напряжениям с амплитудой меньше 10 кВ.

2. Данные для $\frac{s}{D} > 0,5$ имеют пониженную точность и поэтому заключены в скобки.

Таблица П2.2

Разрядные напряжения шаровых промежутков (при импульсах 50 % разрядные напряжения), кВ_{max} при 20 °С и 760 мм рт. ст. для стандартной импульсной волны положительной полярности. Один шар заземлен

Расстояние между шарами, см	Диаметр шаров, см										
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150
0,05											
0,10											
0,15											
0,20											
0,25											
0,30	11,2	11,2									
0,40	14,4	14,3	14,2								

Продолжение табл. П2.2

Расстояние между шарами, см	Диаметр шаров, см										
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150
0,50	17,4	17,4	17,2	16,8	16,8	16,8					
0,60	20,4	20,4	20,2	19,9	19,9	19,9					
0,70	23,2	23,4	23,2	23,0	23,0	23,0					
0,80	25,8	26,3	26,2	26,0	26,0	26,0					
0,90	28,3	29,2	29,1	28,9	28,9	28,9					
1,0	30,7	32,0	31,9	31,7	31,7	31,7	31,7				
1,2	(35,1)	37,8	37,6	37,4	37,4	37,4	37,4				
1,4	(38,5)	43,3	43,2	42,9	42,9	42,9	42,9				
1,5	(40,0)	46,2	45,9	45,5	45,5	45,5	45,5				
1,6		49,0	48,6	48,1	48,1	48,1	48,1				
1,8		54,5	54,0	54,0	54,0	54,0	54,0				
2,0		59,5	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0		
2,2		64,0	64,0	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5		
2,4		69,0	69,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0		
2,6		(73,0)	73,5	75,5	75,5	75,5	75,5	75,5	75,5		
2,8		(77,0)	78,0	80,5	80,5	80,5	81,0	81,0	81,0		
3,0		(81,0)	82,0	85,5	85,5	85,5	86,0	86,0	86,0	86,0	
3,5		(90,0)	(91,5)	97,5	98,0	98,5	99,0	99,0	99,0	99,0	
4,0		(97,5)	(101)	109	110	111	112	112	112	112	
4,5			(108)	120	122	124	125	125	125	125	
5,0			(115)	130	134	136	138	138	138	138	138
5,5				(139)	145	147	151	151	151	151	151
6,0				(148)	155	158	163	164	164	164	164
6,5				(156)	(164)	168	175	177	177	177	177
7,0				(163)	(173)	178	187	189	190	190	190
7,5				(170)	(181)	187	199	202	203	203	203
8,0					(189)	(196)	211	214	215	215	215
9,0					(203)	(212)	233	239	240	241	241

Продолжение табл. П2.2

Расстояние между шарами, см	Диаметр шаров, см								
	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
10		(215)	(226)	254	263	265	266	266	266

Рас- стоя- ние между шара- ми, см	Диаметр шаров, см								
	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
11			(238)	273	287	290	292	292	292
12			(249)	291	311	315	318	318	318
13				(308)	334	339	342	342	342
14				(323)	357	363	366	366	366
15				(337)	380	387	390	390	390
16				(350)	402	411	414	414	414
17				(362)	422	435	438	438	438
18				(374)	442	458	462	462	462
19				(385)	461	482	486	486	486
20				(395)	480	505	510	510	510
22					510	545	555	560	560
24					540	585	600	610	610
26					570	620	645	655	660
28					(595)	660	685	700	705
30					(620)	695	725	745	750
32					(640)	725	760	790	795
34					(660)	755	795	835	840
36					(680)	785	830	880	885
38					(700)	(810)	865	925	935
40					(715)	(835)	900	965	980
45						(890)	980	1060	1090
50						(940)	1040	1150	1190
55						(985)	(1100)	1240	1290
60						(1020)	(1150)	1310	1380
65							(1200)	1380	1470
70							(1240)	1430	1550
75							(1280)	1480	1620
80								(1530)	1690
85								(1580)	1760
90								(1630)	1820
100								(1720)	1930
110								(1790)	(2030)
120								(1860)	(2120)
130									(2200)
140									(2280)
150									(2350)

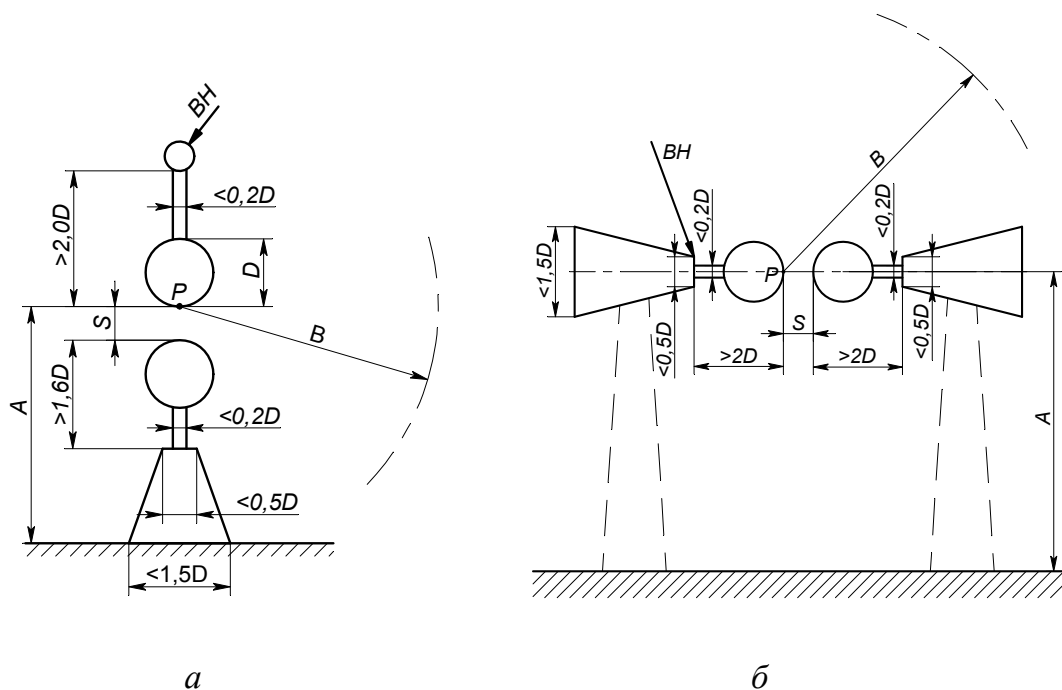


Рис. П2.1. Эскиз стандартных измерительных шаров. Указанные на чертеже размеры должны удовлетворять требованиям табл. П3.3: ВН – провод от источника измеряемого напряжения; Р – точка максимальной напряженности на поверхности незаземленного шара

Таблица П2.3

Расстояния от измерительных шаров до поверхности земли и до посторонних предметов

Диаметр шаров D , см	Наименьшее значение А	Наибольшее значение А	Наименьшее значение В
6,25	$7D$	$9D$	$14D$
10-15	$6D$	$8D$	$12D$
25	$5D$	$7D$	$10D$
50	$4D$	$6D$	$8D$
75	$4D$	$6D$	$8D$
100	$3,5D$	$5D$	$7D$
150	$3D$	$4D$	$6D$
200	$3D$	$4D$	$6D$

Приложение 3

ПЗ.1 Испытание изоляции электрооборудования повышенным напряжением промышленной частоты

Испытание изоляции обмоток маслонаполненных трансформаторов при вводе их в эксплуатацию и капитальных ремонтах без смены обмоток и изоляции не обязательно. Испытание изоляции сухих трансформаторов обязательно.

При капитальном ремонте с полной сменой обмоток и изоляции испытание повышенным напряжением обязательно для всех типов трансформаторов. Значение испытательного напряжения равно заводскому. При капитальном ремонте с частичной сменой изоляции или при реконструкции трансформатора значение испытательного напряжения равно 0,9 заводского.

Значения испытательных напряжений приведены в табл. ПЗ.1 и ПЗ.2. Сухие трансформаторы испытываются по нормам табл. ПЗ.1 для облегченной изоляции.

Продолжительность приложения испытательного напряжения составляет 1 мин.

Таблица ПЗ.1

Испытательные напряжения промышленной частоты электрооборудования классов напряжения до 35 кВ с нормальной и облегченной изоляцией

Класс напряжения электрооборудования, кВ	Испытательное напряжение, кВ					
	Силовые трансформаторы, шунтирующие и дугогасящие реакторы			Аппараты, трансформаторы тока и напряжения, токоограничивающие реакторы, изоляторы, вводы, конденсаторы связи, экранированные токопроводы, сборные шины, КРУ и КТП		
	На заводе-изготовителе	При вводе в эксплуатацию	В эксплуатации	На заводе-изготовителе	Перед вводом в эксплуатацию и в эксплуатации	
Фарфоровая изоляция					Другие виды изоляции	
До 0,69 3	5,0/3,0	4,5/2,7	4,3/2,6	2,0	1	1
	18,0/10,0	16,2/9,0	15,3/8,5	24,0	24,0	21,6
6	25,0/16,0	22,5/14,4	21,3/13,6	32,0 (37,0)	32,0 (37,0)	28,8 (33,3)
10	35,0/24,0	31,5/21,6	29,8/20,4	42,0 (48,0)	42,0 (48,0)	37,8 (43,2)
15	45,0/37,0	40,5/33,3	38,3/31,5	55,0 (63,0)	55,0 (63,0)	49,5 (56,7)
20	55,0/50,0	49,5/45,0	46,8/42,5	65,0 (75,0)	65,0 (75,0)	58,5 (67,5)
35	85,0	76,5	72,3	95,0 (120,0)	95,0 (120,0)	85,5 (108,0)

Примечания:

1. Испытательные напряжения, указанные в виде дроби, распространяются на электрооборудование: числитель – с нормальной изоляцией, знаменатель – с облегченной изоляцией.

2. Испытательные напряжения для аппаратов и КРУ распространяются как на их изоляцию относительно земли и между полюсами, так и на промежу-

ток между контактами с одним или двумя (цифра в скобках) разрывами на полюс. В случаях если испытательное оборудование не позволяет обеспечить испытательное напряжение выше 100 кВ, допускается проводить испытание при максимально возможном испытательном напряжении, но не менее 100 кВ.

3. Если электрооборудование на заводе-изготовителе было испытано напряжением, отличающимся от указанного, испытательные напряжения при вводе в эксплуатацию и в эксплуатации должны быть соответственно скорректированы.

Значения испытательного напряжения основной изоляции:

- для трансформаторов тока,
- трансформаторов напряжения,
- выключателей масляных, электромагнитных, воздушных, вакуумных,
- разъединителей, отделителей, короткозамыкателей,
- проходных изоляторов и вводов,

разных классов напряжений должно выбираться согласно табл. ПЗ.2.

Таблица ПЗ.2

Испытательные напряжения промышленной частоты герметизированных силовых трансформаторов

Класс напряжения трансформатора, кВ	Испытательное напряжение, кВ		
	На заводе-изготовителе	При вводе в эксплуатацию	В эксплуатации
3	10	9,0	8,5
6	20	18,0	17,0
10	28	25,2	23,8
15	38	34,2	32,3
20	50	45,0	42,5

ПЗ.2. Контроль качества трансформаторных масел при их эксплуатации в электрооборудовании

Нормативные значения показателей качества приводятся в табл. ПЗ.3. На основании полученных результатов лабораторных испытаний масла определяют области его эксплуатации. Ухудшение даже одного показателя качества масла приводит к снижению надежности работы электрооборудования, и требуется более учащенный и расширенный контроль для прогнозирования срока его службы и (или) принятия специальных мер по восстановлению эксплуатационных свойств масла с целью предотвращения его замены и вывода электрооборудования в ремонт.

Требования к качеству эксплуатационных масел

Показатель качества масла и номер стандарта на метод испытания	Категория электрооборудования	Значение показателя качества масла		Примечание
		ограничивающее область нормального состояния	предельно допустимое	
1	2	3	4	5
1. Пробивное напряжение по ГОСТ 6581-75, кВ, не менее	Электрооборудование: до 15 кВ включительно	-	20	
	до 35 кВ включительно	-	25	
	от 60 до 150 кВ включительно	40	35	
	от 220 до 500 кВ включительно	50	45	
	750 кВ	60	55	
2. Кислотное число по ГОСТ 5985-79, мг КОН/г масла, не более	Силовые и измерительные трансформаторы, негерметичные маслонаполненные вводы	0,10	0,25	
3. Температура вспышки в закрытом тигле по ГОСТ 6356-75, °С, не ниже	Силовые и измерительные трансформаторы, негерметичные маслонаполненные вводы	Снижение более чем на 5°С в сравнении с предыдущим анализом	125	
4. Влажосодержание: по ГОСТ 7822-75, % массы (г/т), не более	Трансформаторы с пленочной или азотной защитой, герметичные маслонаполненные вводы, герметичные измерительные трансформаторы	0,0015 (15)	0,0025 (25)	Допускается определение данного показателя методом Карла Фишера или хроматографическим методом по РД 34.43.107-95

1	2	3	4	5
	Силовые и измерительные трансформаторы без специальных защит масла, негерметичные маслонаполненные вводы	-	0,0 030 (30)	
	Электрооборудование, при отсутствии требований предприятий-изготовителей по количественному определению данного показателя	Отсутствие	Отсутствие	
5. Содержание механических примесей:				
ГОСТ 6370-83, % (класс чистоты по ГОСТ 17216-71, не более);	Электрооборудование до 220 кВ включительно	Отсутствие (13)	Отсутствие (13)	
РТМ 34.70.653-83, %, не более (класс чистоты по ГОСТ 17216-71, не более)	Электрооборудование свыше 220 до 750 кВ включительно	0,0020 (11)	0,0030 (12)	
6. Тангенс угла диэлектрических потерь по ГОСТ 6581-75, %, не более, при температуре 70 °С/90 °С	Силовые и измерительные трансформаторы, высоковольтные вводы: 110-150 кВ включительно; 220-500 кВ включительно; 750 кВ	8/12 5/8 2/3	10/15 7/10 3/5	Проба масла дополнительной обработке не подвергается. Норма tgδ при 70 °С факультативна

7. Содержание водорастворимых кислот и щелочей, мг КОН/г, не более	Силовые трансформаторы, герметичные высоковольтные вводы, герметичные измерительные трансформаторы до 750 кВ включительно	0,014	–	Определение данного показателя производится по РД 34.43.105-89
8. Содержание антиокислительной присадки АГИДОЛ-1 (2,6-дитретбутил-4-метилфенол или ионол) по РД 34.43.105-89, % массы, не менее	Негерметичные высоковольтные вводы и измерительные трансформаторы до 500 кВ включительно Трансформаторы без специальных защит масла, негерметичные маслonaполненные вводы свыше 110 кВ	0,030 0,1	– –	
9. Содержание растворимого шлама, % массы, не более	Силовые и измерительные трансформаторы, негерметичные высоковольтные вводы свыше 110 кВ	–	0,005	Определение данного показателя производится по РД 34.43.105-89
10. Газосодержание в соответствии с инструкциями предприятия-изготовителя, % объема, не более	Трансформаторы с пленочной защитой, герметичные маслonaполненные вводы	2	4	Допускается определение хроматографическим методом по РД 34.43.107-95
11. Содержание фурановых производных, % массы, не более (в том числе фурурола)*	Трансформаторы и вводы свыше 110 кВ	0,0015 (0,001)	-	Определение данного показателя производится хроматографическими методами по РД 34.43.206-94 или РД 34.51.304-94

ПЗ.3. Испытание изоляции кабелей повышенным выпрямленным напряжением

Испытательное напряжение принимается в соответствии с табл. ПЗ.4.
В Нормативах приняты следующие условные обозначения категорий контроля:

П - при вводе в эксплуатацию нового электрооборудования и электрооборудования, прошедшего восстановительный или капитальный ремонт и реконструкцию на специализированном ремонтном предприятии;

К - при капитальном ремонте на энергопредприятии;

С - при среднем ремонте;

Т - при текущем ремонте электрооборудования;

М - между ремонтами.

Разрешается техническому руководителю энергопредприятия в процессе эксплуатации (М), исходя из местных условий, как исключение, уменьшать уровень испытательного напряжения для кабельных линий напряжением 6 – 10 кВ до $4U_{ном}$.

Для кабелей на напряжение до 35 кВ с бумажной и пластмассовой изоляцией длительность приложения полного испытательного напряжения при приемосдаточных испытаниях составляет 10 мин, а в процессе эксплуатации – 5 мин.

Для кабелей с резиновой изоляцией на напряжение 3 – 10 кВ длительность приложения полного испытательного напряжения – 5 мин. Кабели с резиновой изоляцией на напряжение до 1 кВ испытаниям повышенным напряжением не подвергаются.

Для кабелей на напряжение 110 – 500 кВ длительность приложения полного испытательного напряжения при приемосдаточных испытаниях и в эксплуатации составляет 15 мин.

Таблица ПЗ.4

Испытательное выпрямленное напряжение, кВ, для силовых кабелей												
Категория испытания	Кабели с бумажной изоляцией на напряжение, кВ											
	до 1	2	3	6	10	20	35	110	150	220	330	500
П	6	12	18	36	60	100	175	285	347	510	670	865
К	2,5	10-17	15-25	36	60	100	175	285	347	510	670	865
М	-	10-17	15-25	36	60	100	175	285	347	510	670	865
Категория испытаний	Кабели с пластмассовой изоляцией на напряжение, кВ						Кабели с резиновой изоляцией на напряжение, кВ					

	0,66 *	1*	3	6	10	110	3	6	10
П	3,5	5,0	15	36	60	285	6	12	20
К	-	2,5	7,5	36	60	285	6	12	20
М	-	-	7,5	36	60	285	6**	12**	20**

* Испытание выпрямленным напряжением одножильных кабелей с пластмассовой изоляцией без брони (экранов), проложенных на воздухе, не производится.

** После ремонтов, не связанных с ремонтом кабеля, изоляция проверяется мегаомметром на напряжение 2500 В, а испытание повышенным выпрямленным напряжением не производится.

Допустимые токи утечки в зависимости от испытательного напряжения и допустимые значения коэффициента асимметрии при измерении тока утечки приведены в табл. ПЗ.5. Абсолютное значение тока утечки не является браковочным показателем. Кабельные линии с удовлетворительной изоляцией должны иметь стабильные значения токов утечки. При проведении испытания ток утечки должен уменьшаться. Если не происходит уменьшения значения тока утечки, а также при его увеличении или нестабильности тока испытание производить до выявления дефекта, но не более чем 15 мин.

Таблица ПЗ.5

Токи утечки и коэффициенты асимметрии для силовых кабелей

Кабели напряжени- ем, кВ	Испыта- тельное напряже- ние, кВ	Допустимые значения токов утечки, мА	Допустимые значения коэффициента асиммет- рии (I_{\max}/I_{\min})
	45	0,3	8
10	50	0,5	8
	60	0,5	8
20	100	1,5	10
35	140	1,8	10
	150	2,0	10
	175	2,5	10
110	285	Не нормируется	Не нормируется
150	347	То же	То же
220	510	"-"	"-"
330	670	"-"	"-"
500	865	"-"	"-"

Периодичность испытаний кабелей в процессе эксплуатации

Кабели на напряжение 2..35 кВ:

- 1 раз в год – для кабельных линий в течение первых двух лет после ввода в эксплуатацию, а в дальнейшем:

- 1 раз в 2 года – для кабельных линий, у которых в течение первых 2 лет не наблюдалось аварийных пробоев и пробоев при профилактических испытаниях и 1 раз в год для кабельных линий, на трассах которых производились строительные и ремонтные работы и на которых систематически происходят аварийные пробой изоляции;

- 1 раз в 3 года – для кабельных линий на закрытых территориях (подстанции, заводы и др.);

- во время капитальных ремонтов оборудования для кабельных линий, присоединенных к агрегатам, и кабельных перемычек 6...10 кВ между сборными шинами и трансформаторами в ТП и РП.

Кабели на напряжение 110...500 кВ:

- через 3 года после ввода в эксплуатацию и в последующем 1 раз в 5 лет.

Кабели на напряжение 3...10 кВ с резиновой изоляцией:

а) в стационарных установках – 1 раз в год;

б) в сезонных установках – перед наступлением сезона;

в) после капитального ремонта агрегата, к которому присоединен кабель.

При смешанной прокладке кабелей в качестве испытательного напряжения для всей кабельной линии принимать наименьшее из испытательных напряжений по табл. П2.4.

П2.4. Воздушные линии электропередачи

Измерение сопротивления изоляторов

Измерение сопротивления фарфоровых подвесных изоляторов производится мегаомметром на напряжение 2500 В только при положительной температуре окружающего воздуха. При монтаже изоляторов сопротивление изоляции измеряется непосредственно перед установкой изоляторов.

Сопротивление каждого подвесного изолятора должно быть не менее 300 МОм.

Необходимость испытания штыревых изоляторов на ВЛ определяется с учетом фактических показателей надежности изоляторов и местных условий эксплуатации.

Измерение распределения напряжения по изоляторам

Распределение напряжения по фарфоровым изоляторам в поддерживающих и натяжных гирляндах производится на ВЛ, находящейся под напряжением, при положительной температуре окружающего воздуха с помощью измерительной штанги или штанги с постоянным искровым промежутком. При проверке изоляторов измерительной штангой изолятор бракуется, если значение измеренного на нем напряжения менее 50 % необходимого. При проверке изоляторов штангой с постоянным искровым промежутком изолятор бракуется, если пробой промежутка не происходит при напряжении, соответствующем

дефектному состоянию наименее электрически нагруженного изолятора гирлянды.

Периодичность измерений принимается в соответствии с ТИ ВЛ 35–800 кВ.

ПЗ.5. Электродвигатели переменного тока

Измерение сопротивления изоляции. Производится мегаомметром, напряжение которого указано в табл. ПЗ.6. Допустимые значения сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции $R_{60''}/R_{15''}$ указаны в табл. ПЗ.6 –ПЗ.8.

Таблица ПЗ.6

Допустимые значения сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции

Испытуемый элемент	Вид измерения	Напряжение мегаомметра, В	Допустимое значение сопротивления изоляции, МОм, и коэффициента абсорбции	Примечание
1	2	3	4	5
1. Обмотка статора	П К, Т*	2500/1000 //500**	В соответствии с указаниями табл. П2.8 Для электродвигателей, находящихся в эксплуатации, допустимые значения сопротивления изоляции $R_{60''}$ и коэффициент абсорбции не нормируются, но должны учитываться при решении вопроса о необходимости их сушки	В эксплуатации определение коэффициента абсорбции $R_{60''}/R_{15''}$ обязательно только для электродвигателей напряжением выше 3 кВ или мощностью более 1 МВт

1	2	3	4	5
2. Обмотка ротора	П К, Т*	1000 (допускается 500)	0,2 –	Измерение производится у синхронных электродвигателей и электродвигателей с фазным ротором на напряжение 3 кВ и выше или мощностью более 1 МВт
3. Термоиндикаторы с соединительными проводами	П, К	250	–	
4. Подшипники	П, К	1000	–	Измерение производится у электродвигателей на напряжение 3 кВ и выше, подшипники которых имеют изоляцию относительно корпуса. Измерение производится относительно фундаментной плиты при полностью собранных маслопроводах. В эксплуатации измерение производится при ремонтах с выемкой ротора

* При текущих ремонтах измеряется, если для этого не требуется специально проведения демонтажных работ.

** Сопротивление изоляции измеряется при номинальном напряжении обмотки до 0,5 кВ включительно мегаомметром на напряжение 500 В, при номинальном напряжении обмотки свыше 0,5 кВ до 1 кВ – мегаомметром на напряжение 1000 В, а при номинальном напряжении обмотки выше 1 кВ – мегаомметром на напряжение 2500 В.

Допустимые значения сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции для обмоток статора электродвигателей

Мощность, номинальное напряжение электродвигателя, вид изоляции обмоток	Критерии оценки состояния изоляции обмотки статора	
	Значение сопротивления изоляции, МОм	Значение коэффициента абсорбции $R_{60''}/R_{15''}$
1. Мощность более 5 МВт, терморезистивная и микалентная компаундированная изоляция	Согласно условиям включения синхронных генераторов п. 3.2.	
2. Мощность 5 МВт и ниже, напряжение выше 1 кВ, терморезистивная изоляция	При температуре 10-30°C сопротивление изоляции не ниже десяти мегаом на киловольт номинального линейного напряжения	Не менее 1,3 при температуре 10-30°C
3. Двигатели с микалентной компаундированной изоляцией, напряжение свыше 1 кВ, мощность от 1 до 5 МВт включительно, а также двигатели меньшей мощности наружной установки с такой же изоляцией напряжением свыше 1 кВ	Не ниже значений, указанных в табл. 5.3	Не ниже 1,2
4. Двигатели с микалентной компаундированной изоляцией, напряжение свыше 1 кВ, мощность менее 1 МВт, кроме указанных в п. 3	Не ниже значений, указанных в табл. 5.3.	-
5. Напряжение ниже 1 кВ, все виды изоляции	Не ниже 1,0 МОм при температуре 10-30°C	-

Наименьшие допустимые значения сопротивления изоляции для электродвигателей (табл. ПЗ.8, пп. 3 и 4)

Температура обмотки, °С	Сопротивление изоляции R_{60} , МОм, при номинальном напряжении обмотки, кВ		
	3-3,15	6-6,3	10-10,5
10	30	60	100
20	20	40	70
30	15	30	50
40	10	20	35
50	7	15	25
60	5	10	17
75	3	6	10

Оценка состояния изоляции обмоток электродвигателей при решении вопроса о необходимости сушки. Электродвигатели переменного тока включаются без сушки, если значения сопротивления изоляции обмоток и коэффициента абсорбции не ниже указанных в табл. ПЗ.6 – ПЗ.8.

Испытание повышенным напряжением промышленной частоты. Значение испытательного напряжения принимается согласно табл. ПЗ.9.

Продолжительность приложения испытательного напряжения 1 мин.

Таблица ПЗ.9

Испытательные напряжения промышленной частоты для обмоток электродвигателя переменного тока

Испытуемый элемент	Вид испытания	Мощность электродвигателя, кВт	Номинальное напряжение электродвигателя, кВ	Испытательное напряжение, кВ
1	2	3	4	5
1. Обмотка статора***	П	Менее 1,0	Ниже 0,1	0,8 ($2U_{\text{НОМ}}+0,5$)
		От 1,0 и до 1000	Ниже 0,1 Выше 0,1	0,8 ($2U_{\text{НОМ}}+1$) 0,8 ($2U_{\text{НОМ}}+1$), но не менее 1,2
		От 1000 и более От 1000 и более	До 3,3 включительно Свыше 3,3 до 6,6 включи-	0,8 ($2U_{\text{НОМ}}+1$) $0,8 \cdot 2,5U_{\text{НОМ}}$

		От 1000 и более	тально Свыше 6,6	0,8 ($U_{ном}+3$)
	К	40 и более, а также электродвигатели ответственных механизмов*	0,4 и ниже	1,0
			0,5	1,5
			0,66	1,7
			2,0	4,0
			3,0	5,0
			6,0	10,0
			10,0	16,0
		Менее 40	0,66 и ниже	1,0
2. Обмотка ротора синхронных электродвигателей, предназначенных для непосредственного пуска, с обмоткой возбуждения, замкнутой на резистор или источник питания***	П	–	–	8-кратное $U_{ном}$ системы возбуждения, но не менее 1,2 и не более 2,8
	К	–	–	1,0
3. Обмотка ротора электродвигателя с фазным ротором***	П, К	–	–	$1,5U_p^{**}$, но не менее 1,0
4. Резистор цепи гашения поля синхронных двигателей	П, К	–	–	2,0
5. Реостаты и пуско-регулирующие резисторы	П, К	–	–	$1,5U_p^{**}$, но не менее 1,0

* Испытание необходимо производить при капитальном ремонте (без смены обмоток) тотчас после останова электродвигателя до его очистки от загрязнения.

** U_p – напряжение на кольцах при разомкнутом неподвижном роторе и полном напряжении на статоре.

*** С разрешения технического руководителя предприятия испытание двигателей напряжением до 1000 В при вводе в эксплуатацию может не производиться.

Измерение сопротивления постоянному току. Измерение производится при практически холодном состоянии машины.

Сопротивление обмотки постоянному току статора и ротора производится у синхронных электродвигателей и асинхронных электродвигателей с фазным ротором.

Измерение производится у электродвигателей на напряжение 3 кВ и выше.

Приведенные к одинаковой температуре измеренные значения сопротивлений различных фаз обмоток, а также обмотки возбуждения синхронных двигателей не должны отличаться друг от друга и от исходных данных больше чем на 2 %.

Испытания электродвигателей с жесткими катушками или со стержнями при смене обмоток

Испытание стали статора. Электродвигатели мощностью 40 кВт и выше испытываются перед укладкой обмотки. Испытание проводится при повреждениях стали, частичной или полной перекалиновке пазов, частичной или полной замене обмотки статора до укладки и после заклиновки новой обмотки.

Первые испытания активной стали (если они не выполнялись по указанным ниже причинам) производятся на всех электродвигателях мощностью 40 кВт и более, проработавших свыше 15 лет, а затем через каждые 5...8 лет при каждой выемке ротора.

У электродвигателей мощностью менее 40 кВт испытание проводится при полной замене обмотки и при ремонте стали, по решению главного инженера энергопредприятия, но не реже, чем 1 раз в 10 лет.

Электродвигатели с косвенным охлаждением обмоток испытываются при значении индукции в спинке статора $1 \pm 0,1$ Тл, электродвигатели с непосредственным охлаждением обмоток и все электродвигатели, изготовленные после 01.07.1977 г., испытываются при индукции $1,4 \pm 0,1$ Тл. Продолжительность испытания при индукции 1,0 Тл – 90 мин, при 1,4 Тл – 45 мин.

Если индукция отличается от нормированного значения 1,0 или 1,4 Тл, но не более чем на $\pm 0,1$ Тл, то длительность испытания должна соответственно изменяться, а определенные при испытаниях удельные потери в стали уточняться по формулам:

$$t_{\text{исп}} = 90 \left(\frac{1,0}{B_{\text{исп}}} \right)^2$$

или

$$t_{\text{исп}} = 45 \left(\frac{1,4}{B_{\text{исп}}} \right)^2 ;$$

$$P_{1,0} = P_{\text{исп}} \left(\frac{1,0}{B_{\text{исп}}} \right)^2$$

или

$$P_{1,4} = P_{\text{исп}} \left(\frac{1,4}{B_{\text{исп}}} \right)^2,$$

где $B_{\text{исп}}$ – индукция при испытании, Тл; $t_{\text{исп}}$ – продолжительность испытания, мин; $P_{\text{исп}}$ – удельные потери, определенные при $B_{\text{исп}}$, Вт/кг; $P_{1,0}$ и $P_{1,4}$ – удельные потери в стали, Вт/кг, приведенные к индукции 1,0 и 1,4 Тл.

Определяемый с помощью приборов инфракрасной техники или термомпар наибольший перегрев зубцов (повышение температуры за время испытания относительно начальной) и наибольшая разность нагревов различных зубцов не должны превышать 25 и 15°C. Удельные потери в стали не должны отличаться от исходных данных более чем на 10%. Если такие данные отсутствуют, то удельные потери не должны быть более приведенных в табл. ПЗ.10.

Таблица ПЗ.10

Допустимые удельные потери сердечника

Марка стали		Допустимые удельные потери, Вт/кг, при	
Новое обозначение	Старое обозначение	$B = 1,0$ Тл	$B = 1,4$ Тл
1511	Э 41	2,0	4,0
1512	Э 42	1,8	3,6
1513	Э 43	1,6	3,2
1514	Э 43 А	1,5	2,9
Направление проката стали сегментов вдоль спинки сердечника (поперек зубцов)			
3412	Э 320	1,4	2,7
3413	Э 330	1,2	2,3
Направление проката стали сегментов поперек спинки сердечника (вдоль зубцов)			
3412	Э 320	1,7	3,3
3413	Э 330	2,0	3,9

Примечание. Для электродвигателей, отработавших свыше 30 лет, при удельных потерях, более указанных выше и табл. ПЗ.10, решение о возможности продолжения эксплуатации машины и необходимых для этого мерах следует принимать с привлечением специализированных организаций с учетом данных предыдущих испытаний и результатов испытаний дополнительными методами.

Для более полной оценки состояния сердечника следует применять в качестве дополнительного электромагнитный метод, основанный на локации

магнитного потока, вытесняемого из активной стали при образовании местных контуров замыканий.

Если намагничивающая обмотка выполняется с охватом не только сердечника, но и корпуса машины, допустимые удельные потери могут быть увеличены на 10 % относительно указанных в табл. ПЗ.10.

Измерения производятся также при кольцевом намагничивании, но малым током (с индукцией в спинке сердечника около 0,01-0,05 Тл).

Метод позволяет выявлять замыкания листов на поверхности зубцов и в глубине сердечника и контролировать состояние активной стали непосредственно при проведении работ по устранению дефектов.

При этом, если заводом-изготовителем не указываются более жесткие требования, то при индукции 1 Тл удельные потери в стали не должны превышать 5 Вт/кг, наибольший нагрев зубцов не должен быть более 45 °С, а наибольшая разность нагрева различных зубцов 30 °С.

Измерение сопротивления изоляции обмоток. Измерение производится у электродвигателей на напряжение до 0,66 кВ включительно мегаомметром на напряжение 1000 В, а на напряжение выше 0,66 кВ - мегаомметром на напряжение 2500 В. Допустимые значения сопротивления изоляции обмоток указаны в табл. П2.6 – П2.8.

Испытание повышенным напряжением промышленной частоты. Испытательное напряжение при полной смене обмотки статора принимается согласно табл. ПЗ.11. Продолжительность приложения испытательного напряжения 1 мин.

Таблица ПЗ.11

Испытательное напряжение промышленной частоты при ремонте обмотки статора электродвигателей (с жесткими катушками или со стержневой обмоткой)

Испытуемый элемент	Испытательное напряжение, кВ для электродвигателей на номинальное напряжение, кВ							
	до 0,5 включительно	2	3	6	10	до 3 включительно	6	10
		мощностью до 1000 кВт					мощностью свыше 1000 кВт	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Отдельная катушка (стержень) ¹⁾ перед укладкой ²⁾	4,5	11	13,5	21,5	31,5	13,5	23,5	34
2. Обмотки после укладки в пазы до пайки межкатушечных соединений	3,5	9	11,5	18,5	29,0	11,5	20,5	30
3. Обмотки после пайки и изолировки соединений	3,0	6,5	9,0	15,8	25,0	9,0	18,5	27

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4. Главная изоляция обмотки собранной машины (каждая фаза по отношению к корпусу при двух других заземленных). У электродвигателей, не имеющих выводов каждой фазы отдельно, допускается производить испытание всей обмотки относительно корпуса	- ³⁾	5,0	7,0	13,0	21,0	7,0	15,0	23

¹⁾ Если стержни или катушки изолированы микалентной без компаундирования изоляцией, то испытательное напряжение, указанное в пп. 1 и 2, может быть снижено на 5 %.

²⁾ Если катушки или стержни после изготовления были испытаны данным напряжением, то при повторных испытаниях перед укладкой допускается снизить испытательное напряжение на 1 кВ.

³⁾ Испытательное напряжение в соответствии с ГОСТ 183-74 устанавливается равным $2U_{\text{ном}}+1$ кВ, но не ниже 1,5 кВ.

Испытание витковой изоляции обмотки импульсным напряжением высокой частоты. Испытательные напряжения витковой изоляции после укладки новой обмотки или новых катушек принимаются по табл. ПЗ.12. Продолжительность испытаний 3-10 с. Испытания проводятся при наличии аппаратуры, предназначенной для таких испытаний.

Таблица ПЗ.12

Импульсные испытательные напряжения обмоток статора после укладки в пазы

Номинальное напряжение обмотки, кВ	Напряжение на выводах катушки (амплитудное значение), кВ	Наибольшее допустимое значение междувиткового напряжения (амплитудное значение), В
до 0,5	2,0	500
0,5-3,0	3,5	600
3,0-3,3	5,0	800
6,0-6,6	9,0	1400
10,0-11,0	12,0	1900

Примечания:

1. Междувитковое испытательное напряжение определяется как частное от деления значений, указанных в столбце 2, на число витков в катушке.

2. Если междувитковые напряжения превышают значения, указанные в столбце 3, то испытательное напряжение на выводах катушки снижается до значения, равного произведению допустимого междувиткового напряжения из столбца 3 на число витков в катушке.

Испытательные напряжения витковой изоляции катушек до укладки их в пазы должны быть выбраны по стандарту или нормами предприятия, в соответствии с чертежами которого изготовлены катушки. Испытательные напряжения витковой изоляции катушек после их укладки не должны превышать 85% этого значения.

Допускается снижение испытательного напряжения по сравнению с значением, указанным в табл. П2.12, если это необходимо для выполнения данного условия.

Испытания витковой изоляции оставшейся части обмотки при замене нескольких катушек производятся, как правило, лишь для катушек, отгибающихся при подъеме шага и снова уложенных в пазы, выводы которых были распаяны. Испытательные напряжения для этого случая выбираются в соответствии с документацией ремонтной организации, но должны составлять не менее 50 % значений, указанных в табл. П3.12. При наличии испытательной аппаратуры, позволяющей производить испытания всей оставшейся части обмотки без дополнительной ее распайки, применяются такие же испытательные напряжения, как и для отгибавшихся катушек.

Измерение сопротивления обмоток постоянному току. Измеренное значение сопротивления обмоток не должно отличаться от нормированного (см. табл. П3.13) более чем на 3% для электродвигателей напряжением до 0,5 кВ включительно и более чем на 2 % для остальных электродвигателей.

Таблица П3.13

Нормы отклонений значений сопротивления постоянному току

Испытуемый элемент	Вид испытания	Норма	Примечание
1	2	3	4
1	2	3	4
1. Обмотка статора	П, К	Значения сопротивления обмотки не должны отличаться друг от друга более чем на 2%, ветвей - на 5%. Результаты измерений сопротивлений одних и тех же ветвей и фаз не должны отличаться от исходных данных более чем на 2%	Измеряется сопротивление каждой фазы или ветви в отдельности. Сопротивления параллельных ветвей измеряются при доступности отдельных выводов. Для отдельных видов машин (генераторов переменного тока, систем возбуждения, малых генераторов и др.) разница в сопротивлениях отдельных фаз и ветвей может быть превышена в

			соответствии с заводскими данными
2. Обмотка ротора	П, К	Значение измеренного сопротивления не должно отличаться от исходных данных более чем на 2%	У роторов с явными полюсами, кроме того, измеряются сопротивления каждого полюса в отдельности или попарно и переходного контакта между катушками
3. Обмотки возбуждения коллекторного возбуждителя	П, К	Значение измеренного сопротивления не должно отличаться от исходных данных более чем на 2%	
4. Обмотка якоря возбуждителя (между коллекторными пластинами)	П, К	Значения измеренного сопротивления не должны отличаться друг от друга более чем на 10% за исключением случаев, когда это обусловлено схемой соединения	
5. Резистор цепи гашения поля, реостаты возбуждения	П, К	Значение измеренного сопротивления не должно отличаться от исходных данных более чем на 10%	

Испытание на нагревание. Электродвигатели мощностью 200 кВт и выше напряжением свыше 1000 В испытываются на нагревание после полной смены обмотки статора, а также после реконструкции системы охлаждения. Условия проведения испытания, методы и средства измерения температур – по ГОСТ.

По результатам испытания оценивается соответствие нагревов требованиям ГОСТ и ТУ и устанавливается наибольшая температура обмотки статора, допустимая в эксплуатации.

Испытания электродвигателей при полной смене всыпных обмоток

Измерение сопротивления изоляции обмоток. Измерение производится мегаомметром на напряжение 500 или 1000 В (см. табл. П3.6)

Допустимые значения сопротивления изоляции обмоток указаны в табл. П2.7.

Испытание повышенным напряжением промышленной частоты. Испытательное напряжение при полной смене обмотки статора принимается согласно табл. ПЗ.14.

Таблица ПЗ.14

Испытательное напряжение промышленной частоты при ремонте выпущенных обмоток электродвигателей

Испытуемый элемент	Испытательное напряжение, кВ, для электродвигателей мощностью, кВт	
	0,2-10,0	более 10 до 1000
1. Обмотки после укладки в пазы до пайки межкатушечных соединений	2,5	3,0
2. Обмотки после пайки и изолировки межкатушечных соединений, если намотка производится по группам или по катушкам	2,3	2,7
3. Обмотки после пропитки и запрессовки обмотанного сердечника	2,2	2,5
4. Главная изоляция обмотки собранного электродвигателя	$2U_{\text{ном}}+1,0$, но не ниже 1,5	$2U_{\text{ном}}+1,0$, но не ниже 1,5

Измерение сопротивления обмотки постоянному току. Измеренное значение сопротивления обмоток не должно отличаться от нормированного (см. табл. П2.13) более чем на 3%.

Испытание электродвигателей с жесткими катушками или со стержнями при частичной смене обмоток

Измерение сопротивления изоляции обмоток. Измерение производится у электродвигателей на напряжение до 0,66 кВ включительно мегаомметром на напряжение 1000 В, а на напряжение выше 0,66 кВ - мегаомметром на напряжение 2500 В.

Допустимые значения сопротивления изоляции обмоток указаны в табл. П2.7.

Испытание повышенным напряжением промышленной частоты. Испытательное напряжение при частичной смене обмотки статора электродвигателей принимается согласно табл. ПЗ.15.

Таблица ПЗ.15

Испытательное напряжение промышленной частоты обмотки статора электродвигателей при частичной смене обмотки статора

Испытуемый элемент	Испытательное напряжение, кВ
1. Оставшаяся часть обмотки	$2U_{\text{НОМ}}$
2. Запасные катушки (секции, стержни) перед закладкой в электродвигатель	$2,25U_{\text{НОМ}}+2,0$
3. То же после закладки в пазы перед соединением со старой частью обмотки	$2U_{\text{НОМ}}+1,0$
4. Главная изоляция обмотки полностью собранного электродвигателя	$1,7U_{\text{НОМ}}$
5. Витковая изоляция	По табл. ПЗ.2.

Измерение сопротивления обмотки постоянному току. Измеренное значение сопротивления обмоток не должно отличаться от нормированного (см. табл. П2.13) более чем на 3% для электродвигателей напряжением до 0,5 кВ включительно и более чем на 2% для остальных электродвигателей.

Испытания, проводимые при ремонтах обмотки ротора асинхронных электродвигателей с фазным ротором

Значение испытательного напряжения при полной смене обмотки ротора принимается согласно табл. ПЗ.16.

При частичной смене обмотки после соединения, пайки и бандажировки значение испытательного напряжения принимается равным $1,5U_{\text{НОМ}}$, но не ниже 1 кВ.

Продолжительность приложения испытательного напряжения 1 мин.

Таблица ПЗ.16

Испытательное напряжение промышленной частоты обмотки ротора электродвигателей при полной смене обмотки

Испытуемый элемент	Испытательное напряжение, кВ
1. Стержни обмотки после изготовления, но до закладки в пазы	$2U_{\text{НОМ}}+3,0$
2. Стержни обмотки после закладки в пазы, но до соединения	$2U_{\text{НОМ}}+2,0$
3. Обмотка после соединения, пайки и бандажировки	$2U_{\text{р}}^*+1,0$
4. Контактные кольца до соединения с обмоткой	$2U_{\text{р}}+2,2$
5. Оставшаяся часть обмотки после выемки заменя-	$2U_{\text{р}}$, но не ниже

емых катушек (секций, стержней)	1,2
6. Вся обмотка после присоединения новых катушек секций, стержней	1,7 U_p , но не ниже 1,0

* U_p - напряжение на кольцах при разомкнутом и неподвижном роторе и номинальном напряжении на статоре.

Для роторов синхронных электродвигателей испытания проводятся по нормам для роторов синхронных явнополюсных генераторов и синхронных компенсаторов.

Приложение № 4

П.4. Примеры полимерных кремнийорганических изоляторов

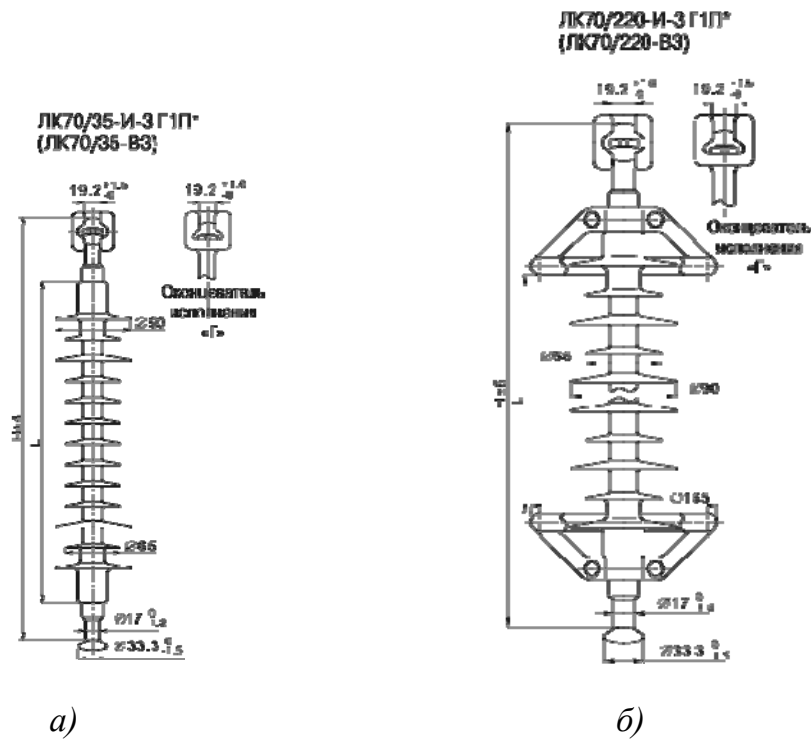


Рис. П.3.1 Стержневые (а) и подвесные (б) изоляторы 35 и 220 кВ типа

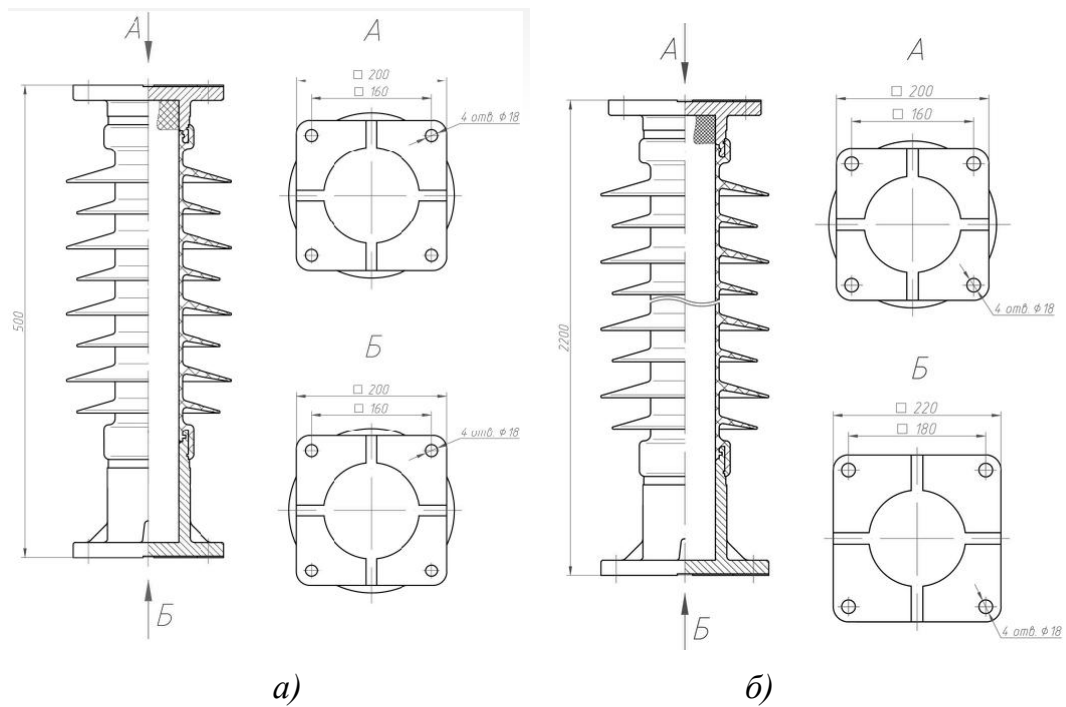


Рис. П.3.2. Опорные изоляторы 35 (а) и 220 кВ (б) типа ОСК-10-35-А-4 УХЛ1 и ОСК-8-220-Б-4 УХЛ1, соответственно

Библиографический список приложений

П1. Штегер Г. Электроизоляционные материалы. – М., Гос-энергоиздат, 1961. – 264 с.

П2. Варденбург А. К. Пластические массы в электротехнической промышленности. – М.-Л., ГЭИ, 1963. – 285 с.

П3. Справочник по электротехническим материалам. Т. 1./ Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – М., Энергоатомиздат, 1986. – 368 с.

П4. Справочник по электротехническим материалам. Т. 1. / Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – М., Энергия, 1974. – 584 с.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1.....	5
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕДАХ.....	5
1.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ.....	5
1.1.1. Виды электрических полей.....	5
1.1.2. Виды ионизации.....	6
1.1.3. Лавина электронов.....	12
1.1.4. Стримерная форма разряда.....	14
1.1.5. Искровой разряд.....	15
1.1.6. Закон Пашена.....	17
1.1.7. Разряд в неоднородных полях.....	19
1.1.8. Лидерный разряд в длинных промежутках.....	21
1.1.9. Молния.....	22
1.1.10. Дуговой разряд.....	25
1.1.11. Коронный разряд.....	25
1.1.12. Поверхностный разряд.....	32
1.1.13. Понятие электрического пробоя.....	38
1.1.14. Влияние времени приложения напряжения на электрическую прочность газовой изоляции.....	39
1.1.14. Эффект полярности.....	42
1.1.15. Барьерный эффект.....	44
1.2. Пробой конденсированных сред.....	46
1.2.1. Пробой жидких диэлектриков.....	46
1.2.1.1. Влияние условий эксплуатации на электрическую прочность жидкостей.....	47
1.2.1.2. Механизм пробоя жидких диэлектриков.....	56
1.2.2. Пробой твердых диэлектриков.....	57
1.2.2.1. Влияние условий эксплуатации на электрическую прочность твердых диэлектриков.....	58
1.2.2.2. Механизм электрического пробоя твердых диэлектриков.....	61
1.2.2.3. Тепловой пробой твердых диэлектриков.....	68
1.2.2.4. Длительная электрическая прочность твердых диэлектриков.....	72
Литература к главе № 1.....	76
Контрольные вопросы к главе №1.....	78
ГЛАВА 2.....	80
ВЫСОКОВОЛЬТНОЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ.....	80
2. 1. Методы и устройства получения высокого переменного напряжения.....	80
2.2. Методы и устройства регулирования высокого переменного напряжения.....	84
2.3. Методы и устройства получения высокого напряжения постоянного тока.....	87

2.3.1. Схемы выпрямления тока высокого напряжения	90
2.3.2. Каскадный генератор постоянного тока высокого напряжения	93
2.4. Методы и устройства получения высоковольтных импульсов напряжения	96
2.5. Методы получения импульсных токов	99
2.6. Измерение высоких напряжений и импульсных токов.....	102
2.6.1. Делители для измерения высоких напряжений	105
2.6.2. Измерение больших импульсных токов	109
Литература к главе № 2	111
Контрольные вопросы к главе № 2:	112
ГЛАВА 3.....	113
ИЗОЛЯЦИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.....	113
3.1. Классификация электрической изоляции	113
3.2. Условия работы и требования, предъявляемые к электрической изоляции высоковольтного оборудования	114
3.3. Наружная изоляция электроустановок	117
3.3.1. Изоляция воздушных линий электропередачи	118
3.3.2. Опорные изоляторы	123
3.3.3. Проходные изоляторы	127
3.3.4. Высоковольтные вводы	129
3.4. Изоляция силовых конденсаторов.....	135
3.4.1. Расчет емкости конденсаторов.	135
3.4.2. Характеристики основных материалов, применяемых в высоковольтных конденсаторах	137
3.4.3. Основы электрического расчета косинусных конденсаторов	138
3.5. Изоляция трансформаторов высокого напряжения.....	140
3.5.1. Изоляция трансформаторов тока	140
3.5.2. Изоляция трансформаторов напряжения.....	142
3.5.3. Изоляция силовых трансформаторов.....	142
3.5.4. Изоляция испытательных трансформаторов.....	144
3.6. Изоляция силовых кабелей высокого напряжения.....	144
3.6.1. Кабели с вязкой пропиткой	145
3.6.2. Маслонаполненные кабели	147
3.6.3. Газонаполненные кабели.....	148
3.6.4. Кабели в стальных трубах под давлением масла или газа.....	149
3.6.5. Кабельные линии в трубах со сжатым газом	150
3.6.6. Кабели с резиновой или пластмассовой изоляцией	150
3.7. Изоляция вращающихся машин высокого напряжения.....	151
3.8. Методы профилактических испытаний изоляции высоковольтного оборудования	155
3.8.1. Физические процессы в многослойном диэлектрике.....	155
3.8.2. Методы профилактических испытаний изоляции оборудования высокого напряжения	157
Литература	158

Контрольные вопросы к главе № 3	159
ГЛАВА 4.....	160
ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	160
4.1. Классификация видов перенапряжений	160
4.2. Уровни и координация изоляции	163
4.3. Волновые процессы в линиях	165
4.3.1. Волновые процессы в длинных линиях	165
4.3.2. Преломление и отражение волн в узловых точках.....	168
4.3.3. Определение напряжения на вентильном разряднике при воздействии волны грозового перенапряжения.....	171
4.3.4. Многократные отражения в линиях конечной длины.....	172
4.3.5. Искажение и затухание волн.....	173
4.4. Волновые процессы в трансформаторах	176
4.5. Атмосферные перенапряжения.....	181
4.5.1. Параметры молнии.....	181
4.5.2. Молниеотводы	182
4.5.2.1. Зоны защиты молниеотводов.....	183
4.5.3. Грозозащита линий электропередачи	186
4.5.3.1. Индуктированные перенапряжения на ЛЭП.....	186
4.5.3.2. Перенапряжения от прямого удара молнии в линию без троса.....	190
4.5.3.3. Перенапряжения прямого удара молнии в линию с тросом.....	192
4.6. Квазистационарные перенапряжения	198
4.6.1. Резонансные перенапряжения на основной частоте в установившемся режиме при холостом ходе односторонне питаемой линии	198
4.6.2. Влияние продольных и поперечных компенсирующих устройств на вынужденную составляющую напряжения	203
4.7. Феррорезонансные перенапряжения.....	205
4.8. Коммутационные перенапряжения	208
4.8.1. Перенапряжения при отключении ненагруженных линий и батареи конденсаторов	208
4.8.2. Коммутационные перенапряжения, возникающие при отключениях малых индуктивных токов	211
4.8.3. Перенапряжения при однофазном замыкании на землю в системах с незаземленной нейтралью.....	213
4.8.4. Гашение емкостного тока замыкания на землю с помощью дугогасящих аппаратов.....	218
4.8.5. Смещение нейтрали в сетях с дугогасящими аппаратами.....	221
4.9. Средства защиты от перенапряжений.....	224
Литература к главе № 4	226
Контрольные вопросы к главе № 4:	227
Приложение 1	229
Приложение 2	234

Приложение 3	240
ПЗ.1 Испытание изоляции электрооборудования повышенным напряжением промышленной частоты	240
ПЗ.2. Контроль качества трансформаторных масел при их эксплуатации в электрооборудовании	241
ПЗ.3. Испытание изоляции кабелей повышенным выпрямленным напряжением.....	245
ПЗ.4. Воздушные линии электропередачи	247
ПЗ.5. Электродвигатели переменного тока	248
Приложение № 4.....	262
П.4. Примеры полимерных кремнийорганических изоляторов	262
Библиографический список приложений	263