

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Электроснабжение»

**В. В. Курганов**

# **ИЗОЛЯЦИЯ И ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

**КУРС ЛЕКЦИЙ**

**по одноименной дисциплине  
для студентов специальностей 1-43 01 02  
«Электроэнергетические системы и сети»  
и 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»  
дневной и заочной форм обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

**Гомель 2010**

УДК 621.311.1.015.38(075.8)  
ББК 31.241я73  
К93

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 7 от 30.03.2010 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого  
*А. Н. Бохан*

**Курганов, В. В.**

К93

Изоляция и перенапряжение в электроэнергетических системах : курс лекций по одноим. дисциплине для студентов специальностей 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» и 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» днев. и заоч. форм обучения / В. В. Курганов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. – 93 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-964-7.

В курсе лекций рассмотрены электрические характеристики внешней и внутренней изоляции электроустановок, методы и техника испытания изоляции, грозовые и внутренние перенапряжения, а также устройства защиты от них.

Для студентов специальностей 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» и 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.311.1.015.38(075.8)  
ББК 31.241я73

ISBN 978-985-420-964-7

© Курганов В. В., 2010  
© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2010

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Данный курс, согласно учебным планам, последние 20 лет назывался по-разному, сначала «Техника высоких напряжений» (ТВН), затем «Защита от перенапряжений и изоляция в электроустановках», потом снова ТВН и с 2009/2010 учебного года – «Изоляция и перенапряжения в электроэнергетических системах». Не важно как называется курс, речь идет об одном и том же предмете, классическое название которого «Техника высоких напряжений» и существующие учебники по этой дисциплине имеют такое же название [1]–[3].

Знание данного предмета для инженера-энергетика имеет особое значение. Все аварии или повреждения в электроустановках связаны с перекрытием или пробоем изоляции. При разборе «полетов» и поиска виновных в этой аварии, как правило, наказывают лиц, ответственных за эксплуатацию данной электроустановки, хотя причина аварии может быть разная, субъективная – не вовремя или не верно произведены очередные испытания изоляции и объективная – возникли разного рода перенапряжения, 100%-ной защиты от которых не существует. В этом случае необходимо сделать грамотный анализ причин повреждения и наметить пути их устранения, а без знания предмета ТВН это невозможно.

Курс лекций предназначен в основном для студентов заочной формы обучения, что касается студентов дневного обучения, то он не может заменить лекции, читаемые в аудитории, поскольку здесь изложен материал в сжатой форме с минимумом иллюстрационного материала и пояснения. Для студентов дневной формы обучения данный курс лекций рекомендуется использовать при подготовке к экзамену или коллоквиуму.

## ВВЕДЕНИЕ

Для транспортировки электроэнергии от электростанций до потребителей, расположенных на значительных расстояниях, применяются линии электропередачи высокого напряжения (ЛЭП). Чем больше расстояние и передаваемая мощность, тем экономически выгодней применять ЛЭП с более высоким классом напряжения.

Пропускная способность или натуральная мощность линии зависит от квадрата напряжения

$$S_{\text{н}} = U^2 / Z_{\text{л}},$$

где  $Z_{\text{л}} = \sqrt{L_0 / C_0}$  – волновое сопротивление линии.

Так как мощность в трехфазной сети зависит от произведения тока на напряжение  $S_{\text{н}} = \sqrt{3} UI$ , то, повысив напряжение, можно уменьшить величину тока, протекающего по проводам и, следовательно, снизить потери электроэнергии или применить провода меньшего сечения  $P_{\text{пот}} = I^2 R_{\text{л}}$ .

Первые промышленные передачи высокого напряжения начали применять в начале XX в. При этом сразу же возникли вопросы, связанные с изоляцией и перенапряжениями, решение которых породило новое направление науки и техники, называемое техникой высоких напряжений (ТВН). Первую книгу по ТВН написал инженер Петерсен в 1911 г. Если в прошлом повреждения изоляции линии и электрооборудования подстанций вследствие грозových явлений и коммутационных перенапряжений, а также отсутствия контроля были массовым явлением, то сейчас, благодаря применению новейших средств контроля изоляции и методов защиты от перенапряжений, аварийность изоляции резко снизилась.

Предмет «Техника высоких напряжений» в электроэнергетике предусматривает как изучение физических процессов в изоляции, так и изучение форм и величин перенапряжений, воздействующих на изоляцию, а также решение вопросов координации изоляции и защитных средств от перенапряжений.

Рассмотрим этапы истории освоения высоких напряжений в электроэнергетике.

Первую электропередачу трехфазного переменного тока применил Доливо-Добровольский, построив опытную линию Лауффен – Франкфурт-на-Майне напряжением 15 кВ длиной 170 км. Эта линия

была продемонстрирована на международной электротехнической выставке в 1891 г. Затем ее перевели на напряжение 28 кВ без усиления изоляции. В последующие 20 лет в разных странах строились промышленные электропередачи напряжением до 66 кВ.

В 1912 г. впервые освоили класс напряжения 110 кВ (линия Лаухамер-Риза).

1929 г. – 220 кВ (Рейнская линия); 1936 г. – 287 кВ (США).

1952 г. – 380 кВ (Швеция); 1959 г. – 525 (СССР).

1965 г. – 735 кВ (Канада); 1970 г. – 1000 кВ (США).

1987 г. – 1150 кВ (СССР, опытный участок линии).

В нашей республике и странах СНГ в электроэнергетике принят следующий стандарт номинальных напряжений, кВ: 6, 10, 20, 35, 110, 150, 220, 330, 500, 750, 1150. Номинальные напряжения до 35 кВ называются средними напряжениями (СН), 110–220 кВ – высокими напряжениями (ВН), в диапазоне от 330 до 750 кВ – сверхвысокими напряжениями (СВН) и свыше 1000 кВ – ультравысокими (УВН). Передачи СВН и УВН отличаются от СН и ВН тем, что требуют применения специальных устройств для ограничения внутренних перенапряжений, поскольку усиление изоляции на них методом экстраполирования (пропорционального увеличения) экономически становится не выгодным.

Наряду с переменным током строились электропередачи постоянного тока. Наибольшее распространение получили дальние передачи напряжением 800 кВ. Преимущество постоянного тока особенно сказывается на сверхдальних передачах, где стоимость линии, состоящей из двух проводов с меньшим уровнем изоляции, оказывается существенно ниже, чем передача переменного тока, требующая, кроме того, дорогостоящие устройства поперечной и продольной компенсации. Постоянный ток экономически выгодней для электроснабжения морских островов одножильным кабелем большого сечения, так как в качестве обратного провода можно использовать морскую воду.

При продаже электроэнергии в зарубежные страны часто применяют так называемые вставки постоянного тока, т. е. электропередачу нулевой длины с выпрямительно-инверторной подстанцией (например, выборгская вставка Россия – Финляндия). Качество продаваемой электроэнергии при этом не зависит от возмущающих воздействий в собственных энергетических системах, таких как перетоки мощности при качаниях, изменение частоты или напряжения.

# 1. РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНЕШНЕЙ ИЗОЛЯЦИИ

Такие газы, как воздух и электрический газ (элегаз) широко используются в электроэнергетике. Воздух как естественный внешний изолятор применяется на линиях электропередачи и на подстанциях – сборные шины, распределительные устройства и т. д. Внешняя изоляция не имеет такого понятия, как старение, в отличие от внутренней изоляции электрических машин и аппаратов.

Для обеспечения надежной и безаварийной работы изоляционной конструкции необходимо знать, как влияют на электрическую прочность газа различные факторы: форма и длительность воздействия напряжения, температура, влажность, давление (плотность) газа, характер электрического поля и т. п.

## 1.1. Электрическая прочность газовых промежутков

Если между двумя электродами, расположенными в газовой среде, приложить напряжение определенной величины, то в цепи возникнет ток, обусловленный электрическим разрядом в газе.

Основной причиной разряда в газе является ударная ионизация молекул или атомов, которая возникает под действием свободных электронов, ускоряемых электрическим полем. Свободные электроны в газовом промежутке появляются за счет внешнего ионизатора, в качестве которого может быть ультрафиолетовое излучение Солнца, радиоактивное излучение Земли, космические излучения. В одном кубическом сантиметре воздуха при нормальных условиях постоянно находится 500–1000 свободных электронов.

Свободный электрон, разогнавшись в электрическом поле, сталкивается с нейтральными частицами газа и выбивает из них еще один свободный электрон, способный также ионизировать газ. Этот процесс называется ударной ионизацией. Бывают и другие виды ионизации: фотоионизация под действием коротковолнового излучения и термоионизация при температуре газа свыше 3000 °С.

Интенсивность процесса ударной ионизации газа характеризуется коэффициентом ударной ионизации  $\alpha$ , который определяет число актов ионизации, осуществляемых одним электроном на единичном пути вдоль силовых линий электрического поля. Для разных газов коэффициент  $\alpha$  разный. Чем больше  $\alpha$ , тем меньше электрическая прочность газа. Наименьшей электрической прочностью обладают инертные газы,

например, гелий, который используется в люминесцентных лампах. У них внешние орбиты атомов полностью заполнены электронами и тем самым возрастает эффективное сечение, увеличивающее вероятность ионизирующего столкновения.

Общим показателем ионизации для всех газов является длина свободного пробега электронов, т. е. расстояние между нейтральными частицами газа. Чем больше это расстояние, тем большую возможность имеет электрон разогнаться и приобрести достаточную энергию для ионизации. Длина свободного пробега электронов зависит от плотности газа. Чем больше плотность, тем меньше длина свободного пробега.

Таким образом, зависимость коэффициента ударной ионизации аппроксимируется следующим выражением:

$$\alpha = \delta h \left( \frac{E}{\delta} - a \right), \quad (1.1)$$

где  $E$  – напряженность поля;  $\delta$  – относительная плотность газа;  $a$  и  $h$  – постоянные для данного газа, например, для воздуха  $a = 24,5$ ;  $h = 0,5$ .

Анализируя данную формулу, видим, что с увеличением плотности  $\delta$  коэффициент  $\alpha$  уменьшается, так как знаменатель отношения  $E/\delta$  растет в квадратичной зависимости.

Если напряженность поля достаточно велика, то свободный электрон, летя к аноду и встречаясь с атомом газа, произведет первое ионизирующее столкновение. В результате появится еще один свободный электрон, который также будет производить ударную ионизацию. Этот постепенно усиливающийся поток электронов называется лавиной электронов, созданной одним начальным электроном.

Рассмотрим по какому закону увеличивается число электронов в лавине, возникшей в газовом промежутке, изображенном на рис. 1.1.

Допустим, что в головке лавины, прошедшей путь  $x$  от катода, содержится  $n$  электронов. На пути  $dx$  каждый из них произведет  $\alpha dx$  ионизаций. Общее увеличение числа электронов на пути  $dx$  будет равно

$$dn = n\alpha dx \quad \text{или} \quad dn/n = \alpha dx.$$

После интегрирования в пределах от 1 до  $n$  и от 0 до  $x$  получим:

$$\ln n = \int_0^x \alpha dx \quad \text{или} \quad n = e^{\int_0^x \alpha dx}. \quad (1.2)$$

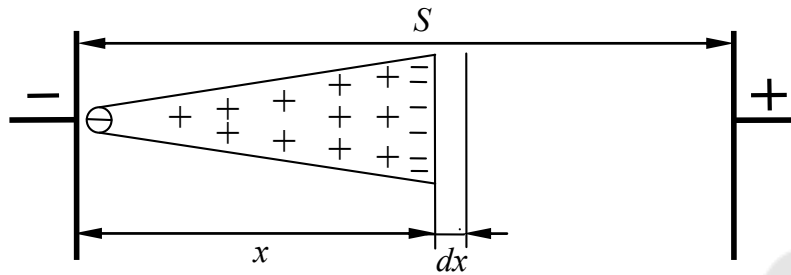


Рис. 1.1. Развитие лавины электронов в однородном поле

В однородном поле с двумя плоскими электродами напряженность поля и плотность газа во всех точках одинаковая. В этом случае коэффициент  $\alpha$  можно вынести за знак интеграла, тогда

$$n = e^{\alpha dx}. \quad (1.3)$$

Разряд, созданный внешним ионизатором, сопровождается малым по величине током и слабым свечением (темновой разряд). Для создания дугового разряда, независящего от внешнего ионизатора, необходимо появление в газовом промежутке вторичного электрона, выбитого из поверхности катода за счет электронной эмиссии. Такая фаза разряда называется самостоятельным разрядом.

Лавина электронов состоит из заряженных частиц обоих знаков – электронов, расположенных в головке лавины, и положительных ионов, заполняющих тело лавины (рис. 1.1). Положительные ионы движутся в сторону катода и бомбардируют его поверхность. Если энергия ионов превышает работу выхода электронов из поверхности металла, то у катода появляются вторичные свободные электроны.

Число вторичных электронов пропорционально числу ионов, которое, в свою очередь, на 1 меньше числа электронов в головке лавины с учетом вычета начального электрона, т. е.

$$n_2 = \gamma(n - 1),$$

где  $\gamma$  – коэффициент вторичной ионизации.

Для образования самостоятельного разряда достаточно, чтобы одна лавина создала хотя бы один вторичный электрон. Следовательно, для возникновения самостоятельного разряда должно быть выполнено условие  $\gamma(n - 1) \geq 1$ , или с учетом выражения (1.2):



$$\gamma \left( e^{\int_0^x \alpha dx} - 1 \right) \geq 1. \quad (1.4)$$

Для однородного поля

$$\gamma(e^{\alpha x} - 1) \geq 1. \quad (1.5)$$

## 1.2. Пробивное напряжение газа в однородном поле. Закон Пашена

В однородном поле при выполнении условия (1.5) наступает пробой всего газового промежутка. Поэтому его целесообразно переписать в следующий вид:

$$e^{\alpha S} = 1 + \frac{1}{\gamma} \quad \text{или} \quad \alpha S = \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right), \quad (1.6)$$

где  $S$  – расстояние между электродами.

Поскольку коэффициент  $\gamma$  можно считать постоянным, то условие самостоятельности разряда в однородном поле следующее:

$$\alpha S = K = \text{const}. \quad (1.7)$$

Иными словами, для пробоя газового промежутка каждый электрон на пути  $S$  должен осуществить вполне определенное число актов ионизации, равное  $K$ . Например, для воздуха  $K \approx 20$  при  $S = 1$  см.

Подставив значение  $\alpha$  из выражения (1.1), получим:

$$h\delta S \left( \frac{E}{\delta} - \alpha \right)^2 = K. \quad (1.8)$$

В однородном поле связь между напряжением и напряженностью следующая:

$$E = U/S \quad \text{или} \quad E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}}/S,$$

где  $U_{\text{пр}}$  и  $E_{\text{пр}}$  – пробивное напряжение и пробивная напряженность.

Тогда выражение (1.8) примет вид:

$$h\delta S \left( \frac{U_{\text{пр}}}{\delta S} - \alpha \right)^2 = K.$$

Решив это уравнение относительно  $U_{\text{пр}}$ , получим:

$$U_{\text{пр}} = \alpha \delta S + \sqrt{K/h} \cdot \sqrt{\delta S}. \quad (1.9)$$

Это приближенное математическое выражение является экспериментально установленным законом Пашена, который гласит:

При неизменной температуре пробивное напряжение газа в однородном поле является функцией произведения плотности газа на расстояние между электродами, т. е.  $U_{\text{пр}} = f(\delta S)$ .

Для увеличения пробивного напряжения равносильно либо увеличить давление газа, либо увеличить во столько же раз расстояние между электродами.

Графически закон Пашена изображается U-образной кривой 1 на рис. 1.2. Причем левая часть U-образной кривой является нарушением закона Пашена, характерной для вакуумной изоляции. При глубоком вакууме вероятность ионизирующего столкновения свободного электрона с нейтральными частицами газа ничтожно мала.

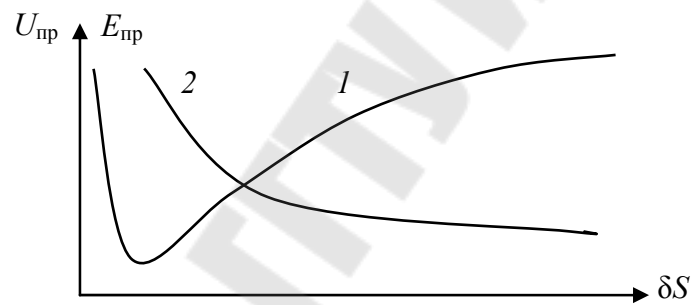


Рис. 1.2. Зависимость пробивного напряжения и пробивной напряженности от плотности газа и расстояния между электродами

Разделив левую и правую части выражения (1.9) на  $S$ , получим:

$$\frac{U_{\text{пр}}}{S} = \alpha \delta + \frac{\sqrt{K/h}}{\sqrt{\delta S}} \quad \text{или} \quad \frac{E_{\text{пр}}}{\delta} = \alpha + \frac{\sqrt{K/h}}{\sqrt{\delta S}}. \quad (1.10)$$

Отсюда следует, что при  $\delta = \text{const}$  с увеличением расстояния  $S$  пробивная напряженность газа монотонно уменьшается, стремясь к постоянной  $\alpha$ . Графически эта функция изображена кривой 2 на рис. 1.2.

Таким образом, с уменьшением толщины газового промежутка относительная электрическая прочность газа увеличивается. Это важное свойство относится не только к газу, но и к жидким и твердым ди-

электрикам и широко используется на практике для уменьшения габаритов изоляционной конструкции. Например, если в газовом промежутке разместить дополнительные электроды в виде металлической фольги, изолированные от основных электродов, то электрическую прочность всей конструкции можно увеличить до 40 % при тех же ее габаритах. Аналогично для увеличения пробивного напряжения промежутка с толстым слоем твердого диэлектрика применяют несколько тонких слоев, разделенных металлическими обкладками.

### **1.3. Коронный разряд в резконеоднородном поле**

Резконеоднородное поле появляется в газовых промежутках с электродами в виде стержень – плоскость, провод – провод, провод – земля и т. п. В таких промежутках наибольшая напряженность поля появляется у электрода с малым радиусом кривизны. Если в этой области напряженность поля достигнет критического значения, при котором выполняется условие самостоятельности разряда по выражению (1.4), то возникает особая форма разряда, называемая коронным разрядом. Возникновение коронного разряда вблизи острого электрода не означает пробоя всего газового промежутка, так как в остальной части промежутка напряженность поля меньше критического значения.

В зоне ионизации вначале возникает лавинная форма коронного разряда в виде светящегося ореола у стержня. С увеличением напряженности поля плотность лавин настолько возрастает, что фотоны, излучаемые лавинами, приобретают энергию, достаточную для осуществления фотоионизации газа в области головки лавины. Образуются новые лавины, впереди породивших их начальных лавин. И таким образом последовательно увеличивается число лавин. В итоге появляется тонкий проводящий канал, заполненный плазмой, который называется стримером, а сама форма разряда – стримерной формой коронного разряда. Стримеры хаотично вырываются из чехла короны, но не распространяются дальше границы зоны ионизации промежутка.

### **1.4. Пробивное напряжение газа в резконеоднородном поле**

С дальнейшим ростом напряжения зона ионизации газа расширяется и длина стримеров возрастает. При этом сокращается расстояние между головкой стримера и противоположным электродом (рис. 1.3). В результате увеличивается емкость указанного промежутка, а значит – и емкостной ток, проходящий по каналу стримера.

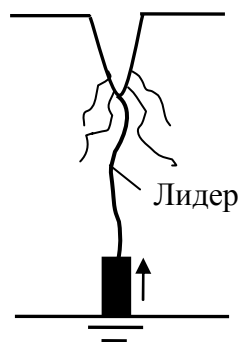


Рис. 1.3. Стримерно-лидерная фаза разряда газа в неоднородном поле

Емкостной ток стримера настолько возрастает, что разогревает его канал до температуры свыше  $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , достаточной для термоионизации газа, соприкасающегося с каналом лидера. При этом толщина стримера возрастает, его сопротивление уменьшается, и напряженность поля на его головке резко увеличивается. Такой термоионизированный стример называется лидером. Лидер как бы является продолжением коронирующего электрода, и он быстро увеличивается в длине, сокращая расстояние до противоположного электрода. При этом очень малом расстоянии напряженность поля данного промежутка настолько возрастает, что на противоположном электроде возникает автоэлектронная эмиссия, и газ в этом промежутке мгновенно превращается в плазму с большой концентрацией заряженных частиц. Этот процесс называется главным или обратным разрядом, поскольку он движется в обратном направлении по каналу лидера.

Образование стримеров и превращение одного из них в лидер, на головке которого напряженность поля достигает очень больших величин, приводит к тому, что пробивное напряжение газа промежутка с резконеоднородным полем существенно меньше (в 4–5 раз), чем в однородном поле при прочих равных условиях.

### 1.5. Влияние полярности электродов на пробивное напряжение газа

Как ранее отмечалось (§ 1.1), тело лавины электронов состоит из положительных ионов, подвижность которых намного меньше электронов, так как их масса примерно на три порядка больше электронов. Поэтому при движении лавины образуется «облако» положительного объемного заряда, расположенного вблизи стержня. Если полярность стержня положительная, то положительный объемный заряд, суммиру-

ясь с внешним электрическим полем источника питания, увеличивает результирующую напряженность поля вблизи стержня и приближает этот максимум к противоположному электроду и, как следствие, уменьшается пробивное напряжение промежутка стержень – плоскость.

При отрицательной полярности стержня объемный заряд вычитается из внешнего поля. Результирующая напряженность уменьшается, а пробивное напряжение промежутка растет.

Таким образом, пробивное напряжение газового промежутка при положительном стержне меньше, чем при отрицательном примерно в 2,5 раза. Более подробно этот раздел изложен в [4, лаборатор. работа № 2].

## 1.6. Методы повышения электрической прочности газов

Диапазон различий электрической прочности известных науке газов очень широкий и в целом достигает 200 крат. Наиболее слабый из них гелий, электрическая прочность которого в 17 раз меньше воздуха. С другой стороны, пары фтороорганического соединения  $C_7F_{14}$  обладают электрической прочностью, превосходящей трансформаторное масло. Но этот газ токсичен и разлагается при повышении температуры.

В электроэнергетике кроме естественного воздуха применяется гексофторид серы  $SF_6$ , так называемый элегаз. Атомы фтора обладают способностью присоединять лишний электрон с образованием устойчивых отрицательных ионов. Коэффициент ударной ионизации при этом снижается, а электрическая прочность элегаза растет и в целом он в 2,5 раза прочнее воздуха. Такие газы принято называть электроотрицательными. Кроме фтора, электроотрицательны и кислород, хлор, фреон, водяной пар и другие газы.

Увеличить электрическую прочность воздуха или элегаза можно за счет повышения давления (закон Пашена). Мировая промышленность выпускает широкую номенклатуру герметизированного элегазового электрооборудования на различные номинальные напряжения, вплоть до 800 кВ. В настоящее время разрабатываются силовые кабели с элегазовой изоляцией. Воздух также применяется под давлением 3–4 кг·с/см<sup>2</sup> в воздушных выключателях 110 кВ и выше, но в последнее время они заменяются на элегазовые выключатели.

В электроустановках среднего класса напряжений 6–10 кВ применяют вакуумные выключатели. Глубокий вакуум не только резко

повышает электрическую прочность изоляции, но и способствует быстрому гашению дуги в выключателе.

Газовая изоляция герметизированного электрооборудования, работающего на переменном токе, имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что при периодическом изменении полярности электродов электрическая прочность изоляционного промежутка неодинаковая. Наименьшее значение она имеет при положительной полярности электрода, имеющего наименьший радиус кривизны. Это относится не только к газам, но и к жидким диэлектрикам.

Для увеличения пробивного напряжения промежутка при переменном напряжении применяют диэлектрические барьеры. Барьер (тонкий слой электрокартона или бакелита) располагают вблизи острого электрода. При этом объемный положительный заряд лавины, двигаясь к катоду (к плоскости), растекается равномерным слоем по поверхности барьера и делает более равномерным электрическое поле между барьером и катодом. В результате пробивное напряжение газового промежутка в резконеоднородном поле с диэлектрическим барьером увеличивается и не зависит от полярности электродов. Этот вопрос подробно изложен в [4, лаборатор. работа № 2].

### 1.7. Разряды в газовых промежутках при импульсных напряжениях

В эксплуатации на изоляционные конструкции воздействуют не только напряжения промышленной частоты, но и импульсные перенапряжения, порождаемые грозовыми явлениями. Длительность грозового импульса в среднем составляет 50 мкс, а фронт его нарастания – 1,2 мкс. Стандартный импульс напряжения обозначается 1,2/50.

Предположим, что на газовый промежуток воздействует импульсное напряжение следующей формы (рис. 1.4).

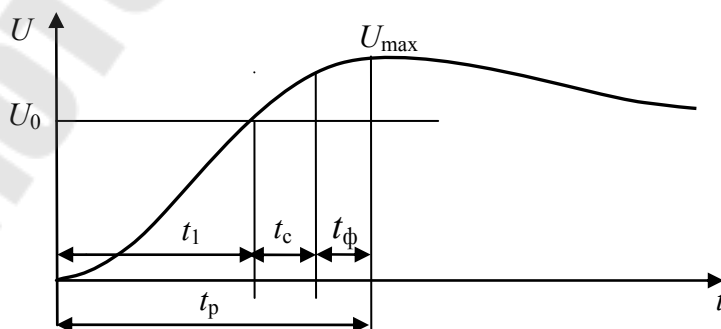


Рис. 1.4. Форма импульсного напряжения

Если  $U_0$  – напряжение, при котором выполняется условие самостоятельности разряда, то до времени  $t_1$  разряд не наступит. Для развития разряда в промежутке должны появиться свободные электроны. Поэтому время  $t_c$  – время статистического ожидания свободных электронов, а  $t_\phi$  – время формирования стримерно-лидерной стадии разряда. Сумму  $t_c + t_\phi = t_3$  называют временем запаздывания разряда. С увеличением амплитуды импульса  $U_{\max}$  время запаздывания уменьшается. Зависимость полного времени разряда  $t_p$  от амплитуды импульса называется вольт-секундной характеристикой изоляционного промежутка (ВСХ). На рис. 1.5 приведены две ВСХ для промежутка с резконеоднородным полем (кривая 1) и с однородным полем (кривая 2).

В резконеоднородном поле на крутизну ВСХ в основном влияет время  $t_\phi$ . В однородном поле время  $t_\phi$  практически равно нулю, поэтому и кривая 2 более пологая.

Для защиты изоляции от волн грозových перенапряжений параллельно ей включают разрядник с искровым промежутком, ВСХ которого всеми точками проходит ниже примерно на 20 % ВСХ защищаемой изоляции. Изоляция линии работает в резконеоднородном поле, поэтому достаточно для защиты применить простые трубчатые разрядники с ВСХ по типу кривой 1. Изоляция трансформатора или электрической машины работает в более-менее однородном поле. В этом случае применяют более сложные вентильные разрядники, имеющие пологую ВСХ по типу кривой 2.

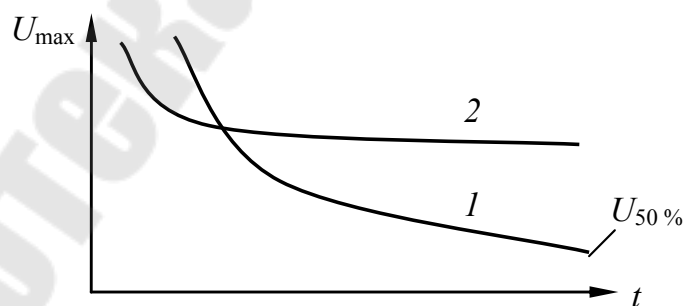


Рис. 1.5. Вольт-секундные характеристики газовых промежутков

Основным показателем, характеризующим ВСХ изоляционной конструкции, является так называемое пятидесятипроцентное разрядное напряжение  $U_{50\%}$ . Это минимальное значение амплитуды импульса,

при котором разряд наступает в 50 % случаев подачи напряжения во время испытания. Напряжение  $U_{50\%}$  соответствует концам кривых 1 и 2 ВСХ. Для каждого выпущенного заводом электрооборудования указывается значение  $U_{50\%}$  его изоляции с тем, чтобы на практике можно было скоординировать изоляцию с защитным разрядником. Показатель  $U_{50\%}$  соответствует пределу электрической прочности изоляции при импульсных напряжениях.

В качестве испытательной установки для снятия ВСХ применяют генератор импульсных напряжений (ГИН), который вырабатывает импульсы стандартной формы с параметрами 1,2/50 различной амплитуды вплоть до 8 МВ как положительной, так и отрицательной полярности.

Конструкции и характеристики защитных разрядников необходимо изучить по [4, лаборатор. работа № 2].

Отметим, что более эффективным средством защиты от перенапряжений в настоящее время являются так называемые нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН). С массовым производством ОПН ими стали заменять не только вентильные разрядники на подстанциях, но и трубчатые разрядники на воздушных линиях, так как последние не надежны в эксплуатации.

В ОПН в качестве нелинейного резистора применяется специальный состав на основе окислов цинка, который позволяет не только увеличить пропускную способность разрядника, но и отказаться от применения искровых промежутков, имеющих в вентильном разряднике. При грозовых перенапряжениях через вентильный разрядник после его срабатывания протекает сопровождающий ток 80–150 А, вызванный рабочим напряжением источника питания, который затем гасится в искровом промежутке. В ОПН нелинейность резистора на основе окислов цинка настолько высокая, что при рабочем напряжении сопровождающий ток составляет величину не более 1–2 миллиампера и нет смысла его гасить (отключать). Отсутствие искровых промежутков в ОПН позволило его использовать не только для защиты от грозовых перенапряжений, но и для ограничения коммутационных перенапряжений в электроустановках. Для вентильного разрядника такая функция исключена принципиально.



## 1.8. Коронный разряд на проводах линии электропередачи

### 1.8.1. Общие положения

При проектировании линии электропередачи одним из условий выбора диаметра проводов является проверка их на коронный разряд. При этом в хорошую погоду без осадков потери на корону должны быть равны нулю.

Согласно формуле Пика, критическая напряженность поля на поверхности провода, при которой возникает коронный разряд, определяется как

$$E_{\text{к}} = 30,3\delta m \left( 1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta r}} \right), \text{ кВ/см}, \quad (1.11)$$

где  $\delta$  – относительная плотность воздуха;  $r$  – радиус провода, см;  $m$  – коэффициент гладкости поверхности провода.

Обычно провода ЛЭП выполняются витыми многопроволочными, у них  $m \approx 0,85$ . Во время осадков в виде дождя или снега коэффициент гладкости снижается и это приводит к возникновению коронного разряда и соответственно – потерь на корону и радиопомех при нормальном рабочем напряжении. Для приближенного расчета потерь на корону дифференцировано выбирают по специальным кривым значения  $m$  в зависимости от пяти видов погоды: хорошая погода, туман, гололед или изморозь, дождь, мокрый или сухой снег. Диапазон значений коэффициента  $m$  находится в пределах 0,85–0,55.

Коронный разряд на проводах, как правило, имеет стримерную форму. При коронировании в зоне ионизации непрерывно образуются заряженные частицы (ионы) обоих знаков. Частицы того же знака, что и коронирующий провод, под действием электрического поля отталкиваются от провода и образуют в воздухе около провода объемный заряд. Положительный объемный заряд образуется самой лавиной электронов, а отрицательные ионы появляются за счет того, что электроны лавины, отталкиваясь от провода, заряженного отрицательно, выходят во внешнюю область, теряют свою активность и прилипают к нейтральным частицам воздуха.

Важнейшим свойством объемного заряда является то, что он регулирует напряженность поля на поверхности провода и делает его постоянным, равным критическому значению. Допустим, напряжение на линии стало выше критического значения. Это сразу же приведет

к возрастанию объемного заряда. Напряженность поля промежутка между коронирующим проводом и объемным зарядом при этом уменьшается, так как знаки их зарядов одинаковые. Это немедленно вызовет снижение интенсивности ионизации в чехле короны, так как объемный заряд малоподвижный и он некоторое время сохраняет свой повышенный заряд.

Переходя от напряженности к напряжению, и учитывая свойство регулирования, получим напряжение на объемном заряде:

$$\Delta U_{\text{об}} = U - U_{\text{к}}, \quad \text{причем } U_{\text{к}} = \text{const},$$

где  $U$  и  $U_{\text{к}}$  – соответственно напряжение на проводе и критическое напряжение, при котором возникает коронный разряд.

При постоянном напряжении на линии объемный разряд движется в сторону противоположного электрода (другой провод или земля) и нейтрализуется там. При переменном напряжении знак заряда на проводе периодически изменяется, и объемный заряд совершает возвратно-поступательное движение, не удаляясь от коронирующего провода на расстояние в несколько десятков сантиметров (40–60 см).

На рис. 1.6 приведена диаграмма напряжения на коронирующем проводе при переменном напряжении.

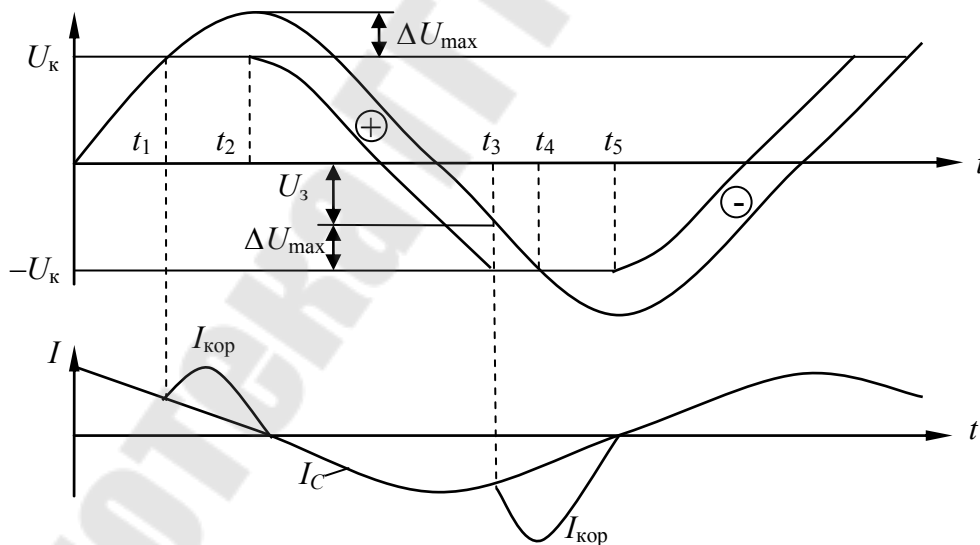


Рис. 1.6. Коронный разряд на проводах при переменном напряжении

Корона зажигается в момент  $t_1$ , когда напряжение на проводе достигает критического значения. Далее идет процесс накопления объемного разряда положительного знака. Напряженность поля на

поверхности провода при этом остается постоянной за счет регулирующего эффекта объемного разряда. Когда напряжение на линии станет равным амплитудному значению  $U_{\max}$ , объемный заряд достигнет своей максимальной величины  $\Delta U_{\max}$ . В момент снижения напряжения  $t_2$  корона гаснет, а объемный заряд в процессе уменьшения напряжения будет оставаться неизменным, равным  $\Delta U_{\max}$ .

В следующий полупериод корона зажжется в момент времени  $t_3$ , т. е. намного раньше, чем в первом полупериоде. На рис. 1.6 напряжение зажигания короны обозначено  $U_3$ . При этом следует иметь в виду, что знак объемного заряда был положительным, а потенциал на проводе стал отрицательным.

Следовательно, в момент  $t_3$  результирующее напряжение в промежутке провод–объемный заряд достигло критического значения  $U_k$ , т. е.

$$U_k = U_3 + \Delta U_{\max}.$$

Так как

$$\Delta U_{\max} = U_{\max} - U_k,$$

то

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

Если  $U_{\max} > 2U_k$ , то корона зажжется раньше, чем напряжение перейдет через нулевое значение.

После зажигания отрицательной короны ионы отрицательного знака будут компенсировать оставшийся положительный объемный заряд и в момент  $t_4$  произойдет полная его нейтрализация. Далее идет процесс наращивания отрицательного объемного заряда и в момент амплитуды  $t_5$  корона снова гаснет. В последующие полупериоды процесс повторяется.

Таким образом, при переменном напряжении источник отдает двойной заряд, половина которого тратится на компенсацию заряда противоположного знака.

Ток утечки коронирующей линии состоит из суммы емкостного тока линии  $I_C$  и тока короны  $I_{\text{кор}}$ , который появляется в период горения короны. Чем меньше напряжение  $U_k$ , тем больше и продолжительней длится ток короны и, следовательно, больше потери на корону. Потери на корону достигают 20–30 % общих потерь электроэнергии в ли-

нии и наибольшего значения они достигают в плохую погоду с осадками в виде моросящего дождя или сухого снега.

При переменном напряжении формула Пика (1.11) за счет особенности зажигания короны преобразуется в следующий вид:

$$E_k = 23,3\delta m \left[ 1 + \frac{0,62}{(r\delta)^{0,38}} \right]. \quad (1.12)$$

### 1.8.2. Методы снижения потерь на корону

Согласно формуле Пика, увеличить  $E_k$  можно только за счет увеличения диаметра провода. Для того чтобы корона отсутствовала в хорошую погоду, минимальные диаметры проводов  $d_{\min}$  линий должны быть следующими:

Таблица 1.1

**Минимальные диаметры проводов воздушных линий по условию коронного разряда**

$U_{\text{ном}}$ , кВ	$d_{\min}$ , см
110	1,25
220	2,5
330	3,8
500	5,8
750	8,3
1150	13

Начиная с номинального напряжения 330 кВ и выше, минимальные диаметры проводов по условию короны значительно превышают сечения проводов, выбранных по условию пропускной способности линии. Компромиссным решением в этом случае могут быть полый провод в виде трубки или расширенный провод (множество фасонных трубок в сердцевине многожильного витого провода). Такой способ применяется в странах, где по условию высокой стоимости земли отчуждения требуется уменьшить габариты линии. В мировой практике наибольшее распространение получили расщепленные провода, т. е. вместо одного провода в фазе применяют несколько проводов меньшего сечения, находящихся друг от друга на расстоянии нескольких десятков сантиметров и расположенных в вершинах правильного многоугольника. При номинальном напряжении 330 кВ расщепляют фазу на 2 провода, 500 кВ – на 3 провода, 750 кВ – на 4–5 проводов и 1150 кВ – на 8 проводов.

На рис. 1.7 изображена схема расщепленной фазы ЛЭП-500 кВ.

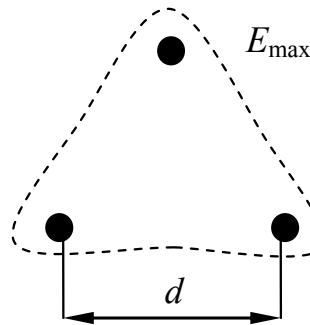


Рис. 1.7. Расположение проводов в расщепленной фазе ВЛ-500 кВ

Шаг расщепления  $d$  выбирают оптимальным с точки зрения уменьшения максимального значения напряженности поля на проводе с одной стороны, и увеличения емкости расщепленного провода с другой стороны. Для ВЛ-500 кВ  $d_{\text{опт}} = 40$  см.

### 1.8.3. Радиопомехи, создаваемые коронным разрядом

Ток коронного разряда состоит из ряда кратковременных импульсов, обусловленных образованием стримеров в чехле короны. Поэтому коронный разряд сопровождается электромагнитными излучениями, спектр частот которых находится в диапазоне от 0,15 до 100 МГц. Это оказывает мешающее влияние на различные радиоприемные устройства, расположенные в окрестности линии.

Уровень интенсивности радиопомех оценивается по выражению

$$Y = 20 \cdot \lg E, \text{ дБ},$$

где  $E$  – напряженность поля вблизи поверхности земли на расстоянии 50 м от коронирующей линии, мкВ/м.

ГОСТ регламентирует допустимый уровень радиопомех на частотах 150 кГц–40 дБ, 1 МГц–34 дБ и 20 МГц–26 дБ.

На линиях ультравысоких классов напряжений (УВН) при выборе проводов определяющим фактором, как правило, является не потеря энергии на корону, а радиопомехи. Коронный разряд на линиях УВН сопровождается колебаниями проводов в расщепленной фазе и, как следствие, – акустическим шумом, достигающим значения до 70 дБ.

Коронный разряд бывает не только на проводах линии, но и на изоляторах гирлянды, что оказывает отрицательное влияние на корро-

зию металлических опор линии. Корона сопровождается выделением озона и окислов азота, способствующих развитию коррозии.

Способность заряжать нейтральные частицы газа отрицательно-го объемного заряда при коронном разряде используется в промышленности, например, в электрофильтрах дымоходов или при окраске изделий в электростатическом поле.

### **1.9. Разряды в воздухе вдоль поверхности твердого диэлектрика**

Этот раздел подробно изложен в [4, лаборатор. работа № 3]. Здесь следует обратить внимание, что конструируют изоляторы таким образом, чтобы пробивное напряжение его диэлектрика было всегда больше напряжения перекрытия по поверхности изолятора. При кратковременном перенапряжении происходит разряд в воздухе по поверхности, однако, изолятор при этом не выходит из строя. В качестве диэлектриков для изоляторов применяется в основном фарфор и стекло, которые обладают большой диэлектрической проницаемостью и не стареют с течением времени.

Для увеличения напряжения перекрытия изоляторов применяют следующие меры: делают поверхность изолятора более развитой, производят уплотнения между диэлектриком и электродами, увеличивают диаметр проходного изолятора для затруднения развития скользящего разряда и т. п.

Конструкции и характеристики типовых изоляторов, а также распределение напряжения по изоляторам в гирлянде необходимо изучить по [4, лаборатор. работа № 4].

### **1.10. Разряды загрязненной и увлажненной поверхности диэлектрика**

На поверхности изоляторов, установленных на открытом воздухе, оседают различные загрязнения, неизбежно присутствующие в атмосфере. Увлажнение слоя загрязнения при морозящем дожде, росе, тумане и других осадках ведет к образованию слабого электролита, по которому проходит ток утечки. Ток утечки нагревает слой загрязнения, увеличивая скорость испарения влаги. Если на некоторых участках скорость испарения превысит скорость поступления влаги, то поверхность на этих участках изолятора высыхает, сопротивление их возрастает, и большая часть напряжения прикладывается на эти небольшие промежутки. Происходит их перекрытие с образованием

частичных дуг длиной в несколько миллиметров. Эти дуги неустойчивые и, вследствие хаотичности процесса, быстро гаснут, затем вновь возникают уже в других местах поверхности.

В целом образование частичных дуг не приводит к немедленному перекрытию изолятора. Однако длительное их воздействие приводит к образованию обугленных следов на поверхности, которые называются треками, снижающие электрическую прочность изолятора. По этой причине изоляторы, работающие на открытом воздухе, должны обладать высокой трекингостойкостью. Для этой цели поверхность фарфоровых изоляторов глазуируют, стеклянные изоляторы закаляют.

Разрядное напряжение загрязненного и увлажненного изолятора определяется по имперической формуле

$$U_p \approx K \left( \frac{\rho_{\text{п}}}{\Delta D_3} \right)^{0,4} l_y, \quad (1.13)$$

где  $K$  – постоянный коэффициент для данного типа изолятора;  $\rho_{\text{п}}$  – удельное объемное сопротивление загрязненной поверхности;  $\Delta$  – толщина слоя загрязнения;  $D_3$  – эквивалентный (усредненный) диаметр изолятора;  $l_y$  – полная длина пути тока утечки по поверхности.

Как видно из формулы, для увеличения  $U_p$  наиболее эффективно увеличить  $l_y$ . При этом, чтобы не увеличивать строительную высоту изолятора, его поверхность делают сильно развитой в виде тарелок, ребер, юбок.

Способность изолятора работать в условиях загрязнения характеризуется удельной длиной пути тока утечки по поверхности  $\lambda$  (обозначаются буквами А, Б, В в маркировке изолятора). Изоляторы, работающие в районах с повышенной загрязненностью воздуха, имеют  $\lambda = 5-6$  см/кВ, а в чистых районах  $\lambda \approx 2$  см/кВ. В химически агрессивных средах применяют гидрофобную пасту, которой покрывают поверхность изолятора для увеличения  $\rho_{\text{п}}$ .

Одной из основных характеристик изолятора является его фактическая величина разрядного напряжения или разрядная напряженность в различных условиях. В каталогах для типовых изоляторов приводятся сухоразрядное, мокроразрядное и грязеразрядное напряжения. Мокроразрядное напряжение определяется при воздействии на изолятор искусственного дождя, а грязеразрядное – солевого тумана (морская соль) или после окунания его в жидкий цемент, после опрыскивания влажной пылью.

При выборе формы изолятора учитывается эффективность самоочистки поверхности при сильном дожде, например, подвесные тарельчатые изоляторы, собирающиеся в гирлянды, выполняют с гладкой верхней поверхностью и с развитой (ребристой) нижней.

Число изоляторов в гирлянде выбирают по двум условиям:

– по условию возможного загрязнения

$$n \geq \lambda U_{\phi \max} / (0,9l_y); \quad (1.14)$$

– по условию работы под дождем

$$n \geq 1,1K_{\Pi} U_{\phi \max} / (HE_{\text{м.р}}), \quad (1.15)$$

где  $U_{\phi \max}$  – максимальное фазное напряжение линии;  $K_{\Pi}$  – допустимая кратность внутренних перенапряжений;  $H$  – строительная высота одного изолятора;  $E_{\text{м.р}}$  – мокроразрядная напряженность, зависящая от категории исполнения изолятора  $E_{\text{м.р}} = 200\text{--}260$  кВ/м;  $\lambda$  и  $l_y$  – указанные выше значения относятся к одному изолятору.

Для повышения надежности число изоляторов в гирлянде на линиях 35–330 кВ увеличивают на один по отношению к расчетному значению, на линиях 500 кВ и выше – на два. На линиях с деревянными опорами, наоборот, уменьшают на один изолятор.

### Контрольные вопросы

1. Что характеризует коэффициент ударной ионизации и от чего он зависит?
2. По какому закону увеличивается число электронов в лавине?
3. В чем заключается условие самостоятельности разряда в газе?
4. От чего зависит пробивное напряжение газа? Закон Пашена.
5. Как зависит относительная электрическая прочность газа от расстояния между электродами?
6. Объясните стримерно-лидерную фазу разряда газа в неоднородном поле?
7. Как влияет полярность электродов на пробивное напряжение газа?
8. Влияние диэлектрического барьера на пробивное напряжение газа.
9. Объясните, что такое элегаз и как он используется в электроустановках?
10. Назовите параметры стандартного испытательного импульса напряжения.



11. Для чего снимают вольт-секундную характеристику изоляционной конструкции и разрядников?
12. Объясните принцип работы вентильного разрядника и ОПН.
13. Как возникает коронный разряд на проводах линии?
14. Для чего и как расщепляют фазные провода на линии?
15. Как измерить интенсивность радиопомех при коронном разряде на линии?
16. От чего зависит напряжение перекрытия по поверхности изолятора?
17. Что означает трекингостойкость изолятора наружной установки?
18. Как рассчитать для линии число подвесных изоляторов в гирлянде?
19. Почему напряжение по изоляторам в гирлянде распределяется неравномерно?

## 2. ВНУТРЕННЯЯ ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК И ЕЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

### 2.1. Особенности внутренней изоляции

Внутренняя изоляция находится внутри закрытого корпуса электрической машины или аппарата и состоит из комбинации жидких и твердых диэлектриков. Поэтому кратковременные изменения давления, температуры и влажности воздуха на ее характеристики не успевают повлиять. Оказывают влияние лишь длительные воздействия внешних факторов, соизмеримые со сроком службы изоляции.

На рис. 2.1 приведена специфическая зависимость электрической прочности внутренней изоляции от времени воздействия напряжения.

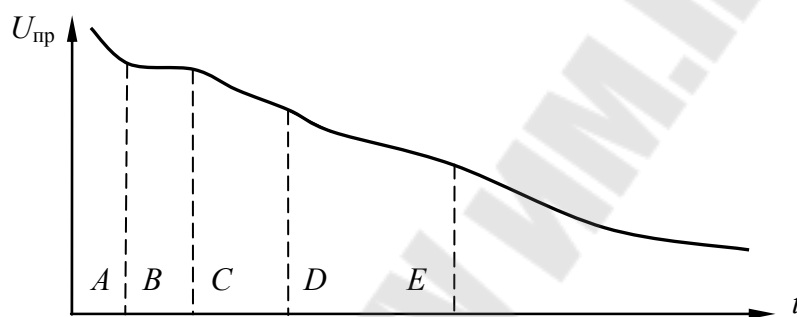


Рис. 2.1. Зависимость пробивного напряжения внутренней изоляции от времени воздействия напряжения

Область *A* (до 0,1 мс) соответствует вольт-секундной характеристике изоляции при воздействии импульсных напряжений. В области *B* (10–30 мс) пробивное напряжение изоляции остается неизменным, химические и тепловые процессы не успевают развиваться. При времени воздействия несколько минут (область *C*) происходит снижение электрической прочности за счет образования проводящих мостиков из примесей в жидких диэлектриках, например, из увлажненных волокон целлюлозы и других химических процессов. При времени воздействия до нескольких часов (область *D*) пробой изоляции обусловлен тепловыми процессами. В области *E* происходит постепенное, длящееся годами, снижение электрической прочности вследствие старения изоляции, вплоть до конца срока службы 25–30 лет.

Принято различать кратковременную электропрочность (области *A*, *B*, *C*) и длительную (*D* и *E*). Кратковременную электропрочность можно оценить непосредственным испытанием изоляции высоким напряжением. Длительную электропрочность оценивают по косвенным показателям неразрушающих методов контроля изоляции.

## 2.2. Регулирование электрических полей во внутренней изоляции

Электрические поля между электродами внутренней изоляции стараются сделать более однородными для увеличения  $U_{пр}$ . Однако традиционный метод скругления острых краев электродов не всегда подходит или не дает желаемых результатов. В этих случаях применяют следующие три способа регулирования.

### Полупроводящие покрытия

Этот способ в основном применяется в электромашинах. Элемент такой изоляции в пазе статора электрической машины показан на рис. 2.2, а.

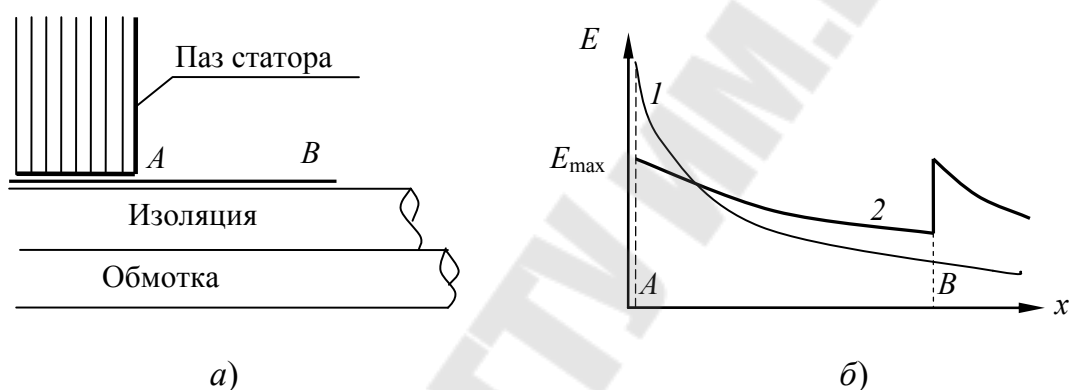


Рис. 2.2. Регулирования электрического поля с помощью полупроводящего покрытия

Между шихтованным магнитопроводом и твердой изоляцией обмотки машины прокладывается тонкий слой полупроводящего покрытия, обладающего большим объемным сопротивлением. В качестве полупроводящего покрытия применяют железисто-азбестовую ленту или серебросодержащую стеклоленту, либо наносят несколько слоев маслоглифталевого лака. Покрытие как бы выносит часть потенциала острого электрода на некоторое расстояние от него. В результате максимальная напряженность поля в точке A значительно снижается. Распределение напряженности поля без покрытия (кривая 1) и с покрытием (кривая 2) показано на рис. 2.2, б.

В реальной изоляции применяют многослойное полупроводящее покрытие с разной длиной  $l$  отдельных слоев (длина A–B) с различными удельными объемными сопротивлениями  $\rho_{п}$ . Для выравнивания максимумов отдельных зубцов в кривой 2 для всех слоев должно выполняться условие  $l\rho_{п} = \text{const}$ .

## Конденсаторная разделка края электрода

Конденсаторную разделку применяют в кабельных муфтах и проходных изоляторах. Элемент такой конструкции показан на рис. 2.3, *a* на примере разделки концевой кабельной муфты.

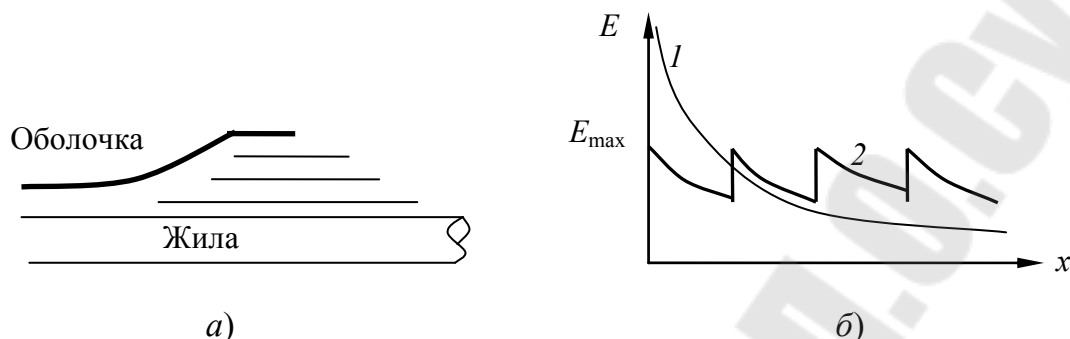


Рис. 2.3. Регулирования электрического поля с помощью дополнительных электродов

Между острым электродом и жилой кабеля прокладывают дополнительные электроды в виде медной фольги, уложенной между слоями бумажно-масляной изоляции. Дополнительные электроды образуют отдельные конденсаторы. Напряженность поля в толще диэлектрика распределяется обратно пропорционально емкостям последовательно включенных конденсаторов. Для равномерного распределения напряженностей (кривая 2 на рис. 2.3, *б*) должно выполняться условие

$$lr = \text{const},$$

где  $l$  – длина дополнительного электрода;  $r$  – радиус прокладки дополнительного электрода.

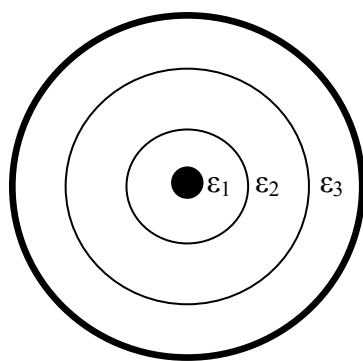
## Градирирование изоляции

Этот способ применяется в одножильных кабелях высокого напряжения. Между жилой и оболочкой кабеля размещают трехслойную изоляцию с различной диэлектрической проницаемостью каждого слоя (рис. 2.4, *a*).

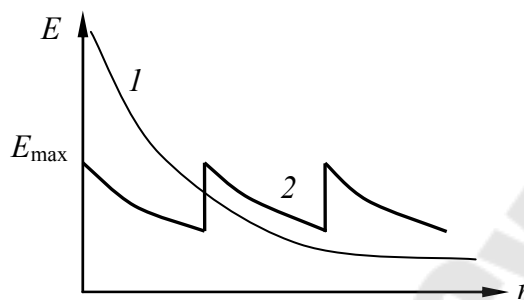
Для равномерного распределения напряженностей в радиальном направлении (кривая 2 на рис. 2.4, *б*) должно выполняться условие

$$\epsilon r = \text{const},$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость слоя изоляции;  $r$  – радиус прокладки данного слоя изоляции.



а)



б)

Рис. 2.4. Регулирования электрического поля методом градирования изоляции

Градирование в бумажно-масляной изоляции кабеля выполняется с помощью бумаги разной плотности и толщины. Например, за счет трехслойного градирования кабеля напряжением 110 кВ удалось уменьшить толщину изоляции с 17 до 13 мм. В кабелях с пластмассовой изоляцией градирование выполняется из сшитого полиэтилена разной плотности.

Рассмотренные способы регулирования электрического поля пригодны только к изоляции, работающей на переменном напряжении. При постоянном напряжении первостепенное значение имеет удельное активное сопротивление изоляции, от величины которого зависит ток утечки.

### 2.3. Основные виды внутренней изоляции

Внутренняя изоляция электрических машин и аппаратов состоит из комбинации нескольких диэлектриков, поскольку отдельно взятый диэлектрик не может удовлетворить всему перечню предъявляемых требований: малые диэлектрические потери; высокая теплопроводность и теплостойкость; механическая прочность; эластичность; негорючесть; нетоксичность, ремонтнопригодность и т. д. Наибольшее распространение получили следующие виды внутренней изоляции.

#### *Бумажно-масляная изоляция*

Бумагу высокой плотности, изготовленную из сульфатной целлюлозы, пропитывают минеральными маслами: трансформаторным, конденсаторным, кабельным (маслоканифольной смесью). Пропитку производят при температуре 90–120 °С и под вакуумом, чтобы внутри изоляции не осталось газовых включений (пузырьков).

В кабелях применяют ленточную бумагу, а в конденсаторах – рулонную с прослойками из полипропиленовой пленки.

### ***Маслонаполненная изоляция***

Основным диэлектриком служит трансформаторное масло, но оно в чистом виде не применяется, так как плохо работает в резконеоднородном поле и пробивное напряжение масла зависит от полярности электродов. Поэтому в масле устанавливают барьеры из электрокартона или бакелита, а сами электроды изолируют, т. е. обматывают бумажно-масляной изоляцией для исключения образования проводящих мостиков из примесей, присутствующих в масле. Такую изоляцию еще называют маслбарьерной. Она обладает высокой теплопроводностью и ремонтнопригодностью, так как масло можно слить и просушить.

Маслонаполненную изоляцию применяют в трансформаторах, реакторах и высоковольтных вводах.

### ***Изоляция на основе слюды***

Слюда из всех известных минералов обладает самой высокой электропрочностью, теплопроводностью и теплостойкостью. Поэтому ее в основном применяют для изоляции электрических машин (генераторов, компенсаторов и электродвигателей). Основным материалом служит микалента – это слой щипанной слюды, оклеенной с двух сторон тонкой бумагой. Микалентой обматывают провода или катушки обмотки, затем пропитывают либо битумным компаундом и получают компаундированную изоляцию, либо эпоксидными или полиэфирными смолами – терморезистивную изоляцию. Пропитку производят под вакуумом и при нагреве. Недостатком компаундированной изоляции является термопластичность. Поэтому она применяется в электромашинках малой и средней мощности.

### ***Литая изоляция на основе эпоксидных смол***

Основным материалом служит эпоксидная или эпоксидно-диановая смола, в которую добавляют пылевидный кварц в качестве пластификатора. Основной недостаток такой изоляции заключается в том, что она допускает небольшие газовые включения в стадии ее изготовления. Поэтому применяют такую изоляцию в электрических аппаратах с номинальным напряжением не более 35 кВ, например, в измерительных трансформаторах тока с литой изоляцией.

## Пластмассовая изоляция

Применяется пока только в силовых кабелях на номинальные напряжения до 220 кВ. Основным материалом служит сшитый полиэтилен (сшиты полимерные цепи) низкой и высокой плотности. Допустимая рабочая температура до 90 °С.

### 2.4. Длительная электрическая прочность внутренней изоляции

Качество изоляции в процессе эксплуатации постепенно снижается вследствие ее старения. Основными факторами, вызывающими старения изоляции, являются частичные разряды, нагрев и увлажнение. Рассмотрим их более подробно.

#### 2.4.1. Частичные разряды в газовых включениях

Газовые включения в жидких или твердых диэлектриках могут появиться в эксплуатации в результате химических реакций или растрескивания, расслоения от механических нагрузок, либо из-за остаточной деформации при кратковременном сильном нагреве. Размеры газовых включений (пузырьков) не превышают долей миллиметра, но они являются причиной электрического старения изоляции.

На рис. 2.5 приведена схема замещения изоляции с газовым включением и диаграмма напряжения на нем при переменном напряжении.

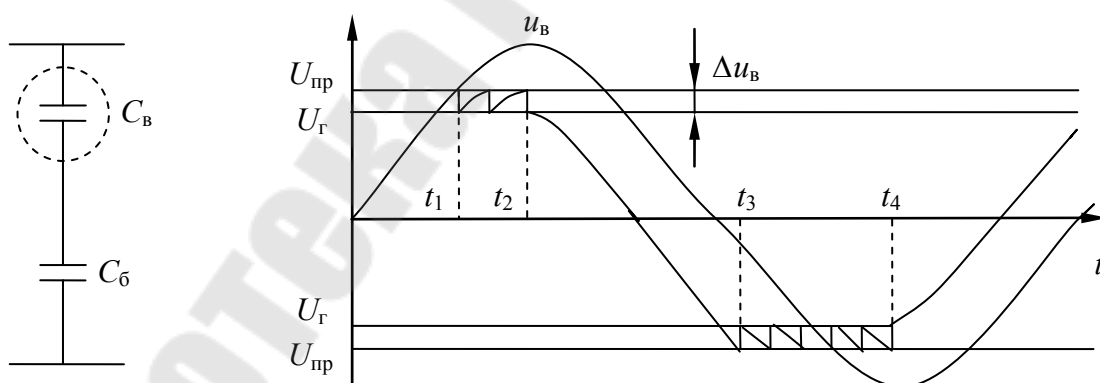


Рис. 2.5. Напряжение на газовом включении при частичных разрядах

Напряжение на газовом включении изменяется по закону

$$u_B = U_B \sin \omega t C_6 / (C_6 + C_B), \quad (2.1)$$

где  $C_B$  — емкость газового включения;  $C_6$  — емкость изоляции, расположенной последовательно с газовым включением.

Если напряжение  $u_B$  в момент времени  $t_1$  превысит напряжение пробоя  $U_{пр}$  газового включения, то в нем произойдет частичный разряд (ЧР). Напряжение на включении при этом мгновенно снижается до напряжения гашения  $U_{г}$ , при котором ЧР гаснет. Обычно  $U_{г} = (0,5 - 0,8)U_{пр}$ . Далее напряжение на газовом включении будет нарастать по закону

$$u_B = U_B \sin \omega t C_{\sigma} / (C_{\sigma} + C_B) + \Delta U_B, \quad (2.2)$$

где  $\Delta U_B = U_{пр} - U_{г}$  – скачек напряжения на включении при ЧР.

При дальнейшем росте напряжения до  $U_{пр}$  вновь произойдет ЧР. И так будет продолжаться до амплитудного значения  $U_{B \max}$ . После этого напряжение на включении начинает снижаться по синусоидальному закону, но это напряжение не будет совпадать по фазе с напряжением источника питания за счет многократного ЧР. Поэтому оно достигнет отрицательного значения  $U_{пр}$  значительно раньше и число ЧР во втором полупериоде будет в 2 раза больше, чем в первом.

Из рис. 2.5 видно, что число ЧР за один полупериод, не считая первого, равно  $n = 2(U_{B \max} - U_{г}) / \Delta U_B$ , а количество ЧР в единицу времени составит  $N = 4fn$ .

Следовательно, если напряжение на газовом включении возрастет на величину  $\Delta U_B$ , то число ЧР увеличится на  $4f = 4 \cdot 50 = 200$ .

В реальной изоляции может быть множество газовых включений с различными пробивными напряжениями. При ЧР они излучают высокочастотные электромагнитные и акустические волны, по интенсивности которых можно оценить дефекты изоляции.

Температура на внутренней поверхности газового включения при ЧР мгновенно возрастает до нескольких сотен градусов. В твердой изоляции появляются обугленные локальные углубления, которые со временем разрастаются в древовидные щели (дендриты) и процесс завершается полным пробоем изоляции.

Накапливание дефектов в изоляции за длительный промежуток времени называется кумулятивным эффектом.

В трансформаторном масле повышение температуры начального ЧР приводит к увеличению размера газового включения за счет разложения масла. При возникновении перенапряжения скорость выделения газа может превысить скорость его растворения в масле. В этом случае образуются крупные газовые включения, а в них – кри-



тические ЧР. Появление критических ЧР даже на короткое время приводит к образованию большого количества газовых включений и электрическая прочность жидкой изоляции в целом резко снижается. Поэтому критические ЧР продолжают образовываться и при снижении напряжения до рабочего значения. В итоге масло вытесняется и изоляция пробивается.

В бумажно-масляной изоляции кабеля начальные ЧР возникают в тонких прослойках масла возле жилы, где напряженность поля наибольшая. Бумага препятствует развитию разряда в радиальном направлении. Поэтому ЧР развиваются в длину кабеля по масляным прослойкам между слоями бумаги, находят слабые места в бумажной изоляции и постепенно достигают оболочки кабеля. Такой пробой называется ветвистым. Длина ветвистого пробоя может достигать двух метров и длиться несколько лет.

При постоянном напряжении число ЧР значительно меньше, чем при переменном. Объясняется это тем, что увеличение напряжения на включении после первого ЧР происходит не по синусоидальному закону, а по экспоненте с постоянной времени пропорциональной сопротивлению утечки по изоляции, значение которого очень большое (десятки МОм).

#### **2.4.2. Тепловое старение внутренней изоляции**

При длительном воздействии на изоляцию повышенной температуры происходит постепенное ее разрушение. Твердый диэлектрик теряет пластичность, разрушается его структура (деструкция) и при механических нагрузках происходит растрескивание или расслоение диэлектрика. В жидких диэлектриках усиливаются окислительные процессы, приводящие к его загрязнению продуктами химических реакций.

Для каждого типа диэлектрика установлена допустимая температура, т. е. нагревостойкость, при которой он может нормально работать в течение всего срока службы 25–30 лет. По нагревостойкости все диэлектрики делятся на 7 классов с допустимой температурой от 90 до 180 °С и выше. Если рабочая температура диэлектрика увеличится по сравнению с допустимой всего на 8–10 °С, то срок службы изоляции сокращается в 2 раза.

#### **2.4.3. Увлажнение внутренней изоляции**

Влага влияет на длительную электрическую прочность изоляции. Она может образовывать с различными загрязнениями слабые электролиты. В результате возрастает ток утечки по изоляции и, как

результат, увеличивается нагрев и скорость теплового старения. В присутствии влаги за счет химических реакций могут образоваться газовые включения, а в них – частичные разряды. Например, если температура трансформаторного масла кратковременно возрастет до 100 °С, то растворенная в масле вода вскипает, превращается в пар и резко возрастает число газовых включений.

Для ограничения увлажнения внутренней изоляции создают уплотнения и герметизацию сосудов, волокнистые материалы пропитывают лаками, в расширитель трансформатора, масло в котором соприкасается с воздухом, встраивают силикагелевый воздухоосушитель.

## 2.5. Кратковременная электрическая прочность внутренней изоляции

Способность изоляции выдерживать значительные перенапряжения в течение нескольких минут характеризует ее кратковременную электрическую прочность. При этом различают электрический пробой и тепловой пробой внутренней изоляции.

Электрический пробой, как правило, наступает при воздействии на изоляцию очень больших по величине перенапряжений. При значительной напряженности поля на электродах возникает автоэлектронная эмиссия. Свободные электроны разгоняются настолько, что разрушают кристаллическую решетку твердого диэлектрика. В жидком диэлектрике быстро развиваются ионизационные процессы, приводящие к возникновению лавинно-стримерному разряду. Процесс завершается полным пробоем изоляции и длится в течение нескольких микросекунд.

Для теплового пробоя необходимо некоторое время, чтобы диэлектрик разогрелся. Если при этом темп нарастания тепловыделения превысит темп нарастания отвода тепла в окружающую среду, то возникает термическое разрушение изоляции, т. е. тепловой пробой.

Количество выделяемого тепла при переменном напряжении пропорционально диэлектрическим потерям в изоляции  $\text{tg} \delta$  и зависит от квадрата приложенного напряжения

$$Q_{\text{выд}} = \omega C U^2 \text{tg} \delta. \quad (2.3)$$

Отвод тепла пропорционален поверхности изоляции  $S$  и разности температуры с окружающей средой

$$Q_{\text{отв}} = kS(T - T_0). \quad (2.4)$$

Значение  $\operatorname{tg}\delta$  сильно зависит от температуры изоляции. При нормальной температуре  $\operatorname{tg}\delta \approx 1-3\%$ . С ростом температуры этот показатель возрастает в несколько раз. В результате при некоторой температуре диэлектрика наступает лавинообразный процесс выделения тепла и в итоге – тепловой пробой. Как правило, толчком к началу развития теплового пробоя силовых кабелей и электрических машин является нагрев проводника большими токами нагрузки. От проводника нагревается изоляция, растет  $\operatorname{tg}\delta$  и при относительно небольших внутренних перенапряжениях развивается тепловой пробой. В трансформаторах с повышением токов нагрузки или температуры масла более  $80-90\text{ }^\circ\text{C}$  автоматически включается обдув радиаторов охлаждения. В электрических машинах малой мощности на ротор устанавливают вентилятор воздушного охлаждения, который постоянно продувает работающую машину. Для охлаждения машин большой мощности в качестве теплоносителя применяют водород или воду.

*Изоляционные конструкции внутренней изоляции типового электрооборудования высокого напряжения необходимо изучить самостоятельно по [1], [2].*

### **Контрольные вопросы**

1. Как зависит электрическая прочность внутренней изоляции от времени воздействия напряжения?
2. Что такое кратковременная и длительная электрическая прочность внутренней изоляции?
3. Назовите методы регулирования электрического поля во внутренней изоляции.
4. В чем сущность теплового и электрического старения изоляции?
5. Назовите причины возникновения газовых включений во внутренней изоляции.
6. Как развиваются частичные разряды в газовых включениях?
7. От чего зависит число и мощность частичных разрядов?
8. Что такое критические частичные разряды в жидких диэлектриках?
9. Как влияет влага на электрическую прочность внутренней изоляции?
10. Назовите причину теплового пробоя внутренней изоляции.
11. Как возникает электрический пробой внутренней изоляции?
12. Конструкция изоляции силовых трансформаторов.
13. Конструкция изоляции электрических машин.
14. Конструкция изоляции силовых высоковольтных кабелей.

### 3. МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Изоляция нового электротехнического изделия подвергается заводским испытаниям, результаты которого заносятся в протокол приемосдаточных испытаний и являются исходными показателями, с которыми сравниваются все дальнейшие испытания, проводимые в эксплуатации: пусконаладочные, послеремонтные и профилактические, согласно графику планово-предупредительного ремонта (ППР). Периодичность и нормы испытания изоляции типового оборудования регламентируются Правилами устройств электроустановки.

Все существующие испытания разделяются на два вида:

- неразрушающие методы контроля при относительно низких напряжениях;
- испытания повышенным напряжением с пробоем дефектной изоляции, не обнаруженной при первом виде испытаний.

Дефекты изоляции бывают распределенные (увлажнение и загрязнение) и сосредоточенные (проколы, трещины, раковины, газовые включения). Распределенные дефекты обнаруживают первым видом испытаний, а сосредоточенные – вторым.

#### 3.1. Неразрушающие методы контроля изоляции

##### 3.1.1. Контроль изоляции по величине тангенса угла диэлектрических потерь

Внутреннюю изоляцию электрооборудования можно представить упрощенной схемой замещения, состоящей из геометрической емкости  $C$  и активного сопротивления утечки  $R$  (рис. 3.1, а).

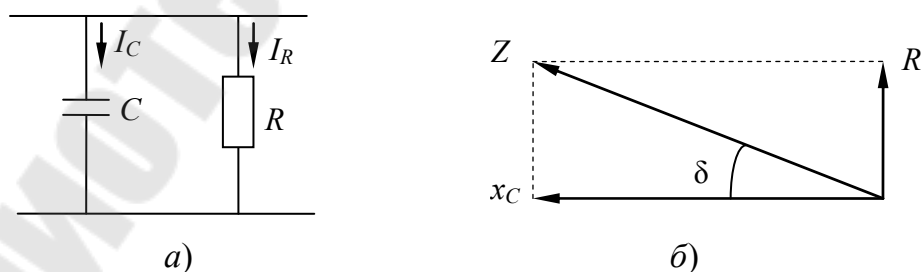


Рис. 3.1. Упрощенная схема замещения изоляции  
и векторная диаграмма сопротивлений

Если к такой изоляции приложить переменное напряжение, то через нее будут проходить токи: активный  $I_R$  и емкостной  $I_C$ . Отношение  $I_R/I_C = \operatorname{tg} \delta$ .

Рассмотрим векторную диаграмму сопротивлений схемы замещения (рис. 3.1, б).

Из диаграммы видно, что угол  $\delta$  расположен между векторами полного сопротивления  $Z$  и емкостного сопротивления  $X_C$ , отсюда

$$\operatorname{tg} \delta = R/X_C = \omega RC, \quad (3.1)$$

где  $X_C = 1/(\omega C)$ .

Для нормальной изоляции значение  $\operatorname{tg} \delta$  составляет сотые доли единицы. Поэтому  $\operatorname{tg} \delta$  принято измерять в процентах (1–5 %).

Тангенс угла диэлектрических потерь является универсальным показателем для изоляции, работающей на переменном напряжении. Он не зависит от геометрических размеров изоляции, а только от ее качества и состояния. Например, если расстояние между электродами и соответственно толщину изоляции увеличить в 2 раза, то емкость  $C$  уменьшится в 2 раза, а сопротивление ее увеличится тоже в 2 раза. Произведение  $(\omega RC)$  останется неизменным. Следовательно,  $R$  и  $C$  можно считать удельными значениями объемного сопротивления и емкости данной изоляции.

Для измерения  $\operatorname{tg} \delta$  применяют мост переменного тока (мост Шеринга), например, типа Р5026 (рис. 3.2).

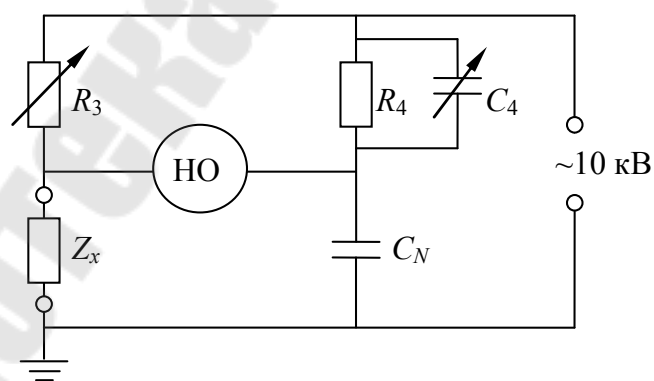


Рис. 3.2. Схема моста переменного тока для измерения  $\operatorname{tg} \delta$

На рис. 3.2 обозначены:  $Z_x$  – испытуемая изоляция;  $C_N$  – эталонный воздушный конденсатор; НО – нуль-орган (высокочувствительный

гальванометр). Для питания моста применяется напряжение 10 кВ независимо от номинального напряжения испытуемой установки.

При измерении  $\operatorname{tg} \delta$  регулируют значения  $R_3$  и  $C_4$  до тех пор, пока НО не покажет нуль. Токи в плечах моста выравниваются как по величине, так и по фазе, при этом величина  $\operatorname{tg} \delta = \omega R_4 C_4$ . Приняв значение  $R_4 = 10^4 / \pi = 3184$  Ом, получим  $\operatorname{tg} \delta = 10^6 \cdot C_4$ , т. е. значение емкости  $C_4$ , выраженное в микрофарадах, численно равно величине  $\operatorname{tg} \delta$ .

Мостом Шеринга можно также измерять емкость изоляции

$$C_x = R_4 C_N / R_3. \quad (3.2)$$

Токи, протекающие через плечи моста и нуль-орган, имеют очень малые значения (доли миллиампера). Поэтому электрические и магнитные поля, создаваемые работающим оборудованием подстанции, вносят значительные погрешности измерения. Для уменьшения ошибки проводят два измерения с поворотом фазы испытательного напряжения на  $180^\circ$ .

Изображенная схема моста на рис. 3.2 называется перевернутой схемой измерения. Ее применяют, когда испытуемый объект невозможно изолировать от земли, например, силовой трансформатор. При такой схеме измерения регулировочные элементы  $R_3$  и  $C_4$  находятся под высоким напряжением 10 кВ. Поэтому при проведении таких испытаний необходимо применять повышенные меры безопасности: используют изолирующие штанги, резиновые перчатки, боты и т. д.

### 3.1.2. Миграционная поляризация неоднородной изоляции

Внутренняя изоляция всегда неоднородная, так как состоит из комбинации нескольких диэлектриков. Рассмотрим схему замещения изоляции, состоящей из двух слоев различных диэлектриков (рис. 3.3).

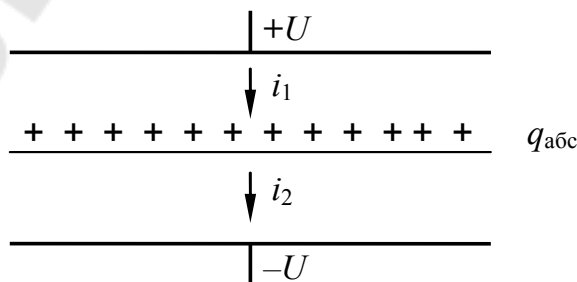


Рис. 3.3. Схема замещения двухслойной изоляции

При приложении к изоляции постоянного напряжения  $U$  плотности токов  $i_1$  и  $i_2$  в отдельных слоях в первый момент времени будут неодинаковые, так как удельные объемные сопротивления каждого диэлектрика различные. Предположим, что  $i_1 > i_2$ , тогда к границе слоев подходят больше зарядов, чем от нее уходят и на границе скапливаются заряды абсорбции  $q_{\text{абс}}$ .

Накопление заряда абсорбции аналогично процессу заряда конденсатора. Поэтому полная схема замещения неоднородной изоляции состоит из следующих элементов (рис. 3.4):  $R_y$  – сопротивление сквозного тока утечки;  $C_r$  – геометрическая емкость изоляции;  $r$  и  $\Delta C$  – сопротивление и емкость, характеризующие заряды абсорбции.

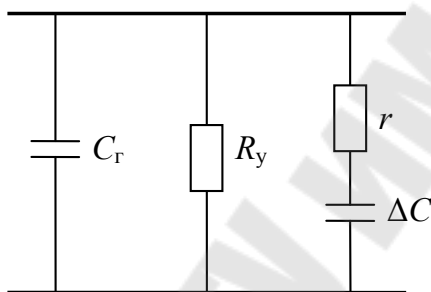


Рис. 3.4. Схема замещения неоднородной изоляции

Данную схему замещения в дальнейшем будем использовать при описании неразрушающих методов контроля изоляции.

При неравномерном загрязнении или увлажнении возникают дополнительные слои в изоляции. В результате неоднородность изоляции возрастает и увеличивается абсорбционная емкость  $\Delta C$ .

Свойство миграционной поляризации широко используется в следующих методах неразрушающего контроля изоляции.

### 3.1.3. Контроль изоляции по возвратному напряжению

По данному методу испытания изоляцию длительно заряжают постоянным высоким напряжением. Затем отсоединяют от источника питания и кратковременно на доли секунды замыкают электроды изоляции накоротко. За это время успевает разрядиться только геометрическая емкость  $C_r$  (рис. 3.4). Емкость  $\Delta C$  за счет большого сопротивления  $r$  остается заряженной, и эти заряды постепенно появляются на электродах в виде возвратного напряжения, которое измеряют вольт-

метром через определенные промежутки времени и строят график, показанный на рис. 3.5.

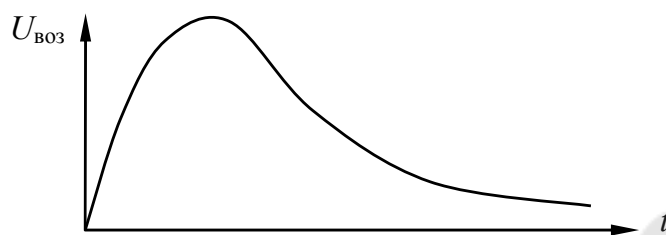


Рис. 3.5. Кривая возвратного напряжения

Качество изоляции оценивают как по амплитуде, так и по форме кривой возвратного напряжения. Для неравномерно увлажненной изоляции значение возвратного напряжения больше, чем для изоляции хорошего качества. При равномерном увлажнении  $U_{\text{воз}}$  может быть меньше.

Возможность появления возвратного напряжения на кабеле после его испытания высоким напряжением следует учитывать с точки зрения соблюдения техники безопасности. Накладывать заземление на жилы кабеля после проведения испытаний необходимо изолирующими штангами и на длительное время не менее 10 минут.

#### 3.1.4. Контроль изоляции по кривой саморазряда

По данному методу, так же, как и в предыдущем, изоляцию длительно заряжают постоянным высоким напряжением. После этого отсоединяют от источника питания и электроды изоляции не соединяют накоротко, а сразу к ним подключают вольтметр и измеряют напряжение через определенные промежутки времени. Затем строят график кривой саморазряда, показанной на рис. 3.6.

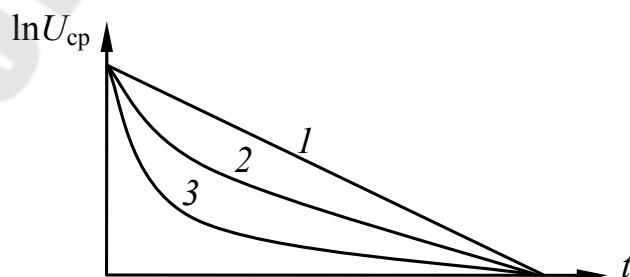


Рис. 3.6. Кривые напряжения саморазряда



Заряженные емкости  $C_r$  и  $\Delta C$  (см. схему замещения изоляции на рис. 3.4) постепенно разряжаются через свои сопротивления утечки  $R_y$  для  $C_r$  и  $R_y + r$  для  $\Delta C$ . Если бы абсорбционная емкость  $\Delta C$  в изоляции отсутствовала, то разряд геометрической емкости  $C_r$  происходил по простой экспоненте, которая построена в полулогарифмическом масштабе  $\ln U_{cp}$  и представляет собой прямую линию (прямая 1 на рис. 3.6). Для неоднородной изоляции с учетом  $\Delta C$  кривая саморазряда состоит из суммы нескольких экспонент и в том же полулогарифмическом масштабе она уже будет не прямой линией. Чем больше кривая 2 или 3 отличается от прямой, тем больше неоднородность изоляции.

Отметим, что оба метода контроля по возвратному напряжению и кривой саморазряда применяют только на заводах изготовителях, так как полученные кривые есть с чем сравнивать при серийном выпуске изделий.

### 3.1.5. Контроль изоляции по сопротивлению утечки и коэффициенту абсорбции

Если к неоднородной изоляции (см. рис. 3.4) подключить постоянное напряжение и измерять ток заряда, то он будет изменяться во времени по следующему закону:

$$I(t) = \frac{U_0}{R_y} + \frac{U_0}{r} e^{-t/\tau}, \quad (3.3)$$

где  $U_0$  – величина приложенного напряжения;  $\tau = r \cdot \Delta C$  – постоянная времени абсорбционных емкостей.

Отсюда следует, что и сопротивление утечки по изоляции также будет изменяться во времени

$$R(t) = \frac{U_0}{I(t)} = \frac{R_y r}{r + R_y e^{-t/\tau}}. \quad (3.4)$$

Зависимости изменения тока заряда и сопротивления изоляции во времени показаны на рис. 3.7.

Величину сопротивления изоляции измеряют мегомметром. Измерение производят непрерывно в течение времени не менее 60 с. При этом отсчет показаний мегомметра выполняют через 15 с и через 60 с после начала измерения. О качестве изоляции судят по двум показателям  $R_{60}$ , которое соответствует сквозному сопротивлению

утечки  $R_y$  и показателю  $K_{абс} = R_{60}/R_{15}$ , называемому коэффициентом абсорбции.

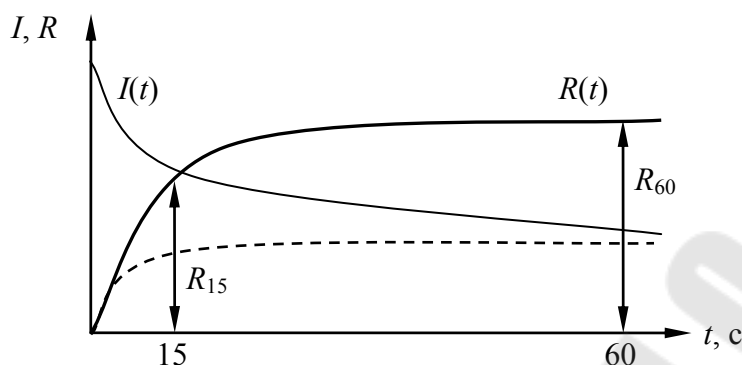


Рис. 3.7. Зависимости величин тока и сопротивления изоляции от времени воздействия постоянного напряжения

Сопротивление  $R_{60}$  находится в обратно пропорциональной зависимости от температуры. Для изоляции трансформаторов и электрических машин нормируются значения показателя  $R_{60}$  в зависимости от температуры изоляции, при которой выполняют измерение, но не ниже  $+10^\circ\text{C}$ . При этом можно руководствоваться правилом, что на каждые  $10^\circ\text{C}$  понижения температуры сопротивление изоляции увеличивается примерно в 1,5 раза. Значение коэффициента абсорбции для нормальной изоляции должно быть  $K_{абс} \geq 1,3$ , а для увлажненной – близким к единице (см. пунктирную линию на рис. 3.7).

Измерение мегомметром наиболее простой и достаточно информативный метод контроля изоляции. Его применяют при любых испытаниях практически любого вида изоляции, в том числе и внешней.

Схема мегомметра приведена на рис. 3.8.

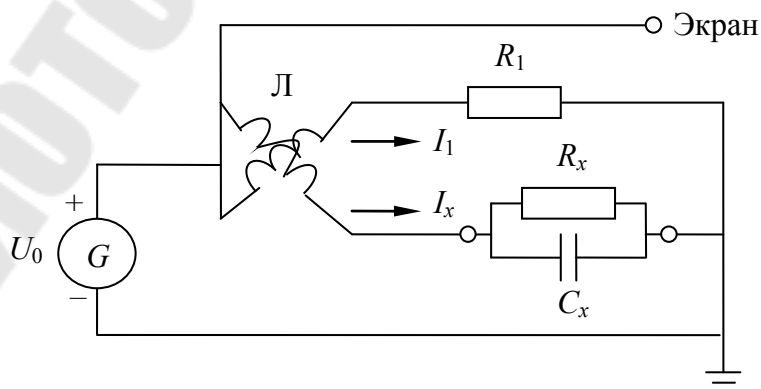


Рис. 3.8. Схема мегомметра

Мегомметр имеет встроенный источник постоянного напряжения  $U_0$  на различные стандартные напряжения 100, 250, 500, 1000 и 2500 В в зависимости от типа мегомметра. Источником постоянного напряжения может быть генератор с ручным приводом или аккумуляторная батарея с высокочастотным преобразователем напряжения с низкого в высокое (конвертор). В качестве измерительного прибора в мегомметре применяется логометр Л магнитоэлектрической системы.

Угол отклонения стрелки логометра Л пропорционален отношению токов  $I_1/I_x$  и однозначно определяется лишь величиной измеряемого сопротивления  $R_x$ , не зависит от напряжения источника питания. Для исключения влияния на результат измерения токов утечки по поверхности внешнего изолятора на него надевают охранное кольцо, которое подключают к зажиму «Экран» мегомметра.

Современными на сегодня являются цифровые мегомметры, например, тип МС-2500. Они кроме  $R_{60}$  и  $K_{абс}$  способны измерять еще коэффициент поляризации  $K_{пол} = R_{600}/R_{60}$ .

### 3.1.6. Емкостно-температурный метод контроля изоляции

По данному методу с помощью моста переменного тока Шеринга измеряют емкость изоляции при температуре  $+20^\circ\text{C}$ . Затем изоляцию нагревают до температуры  $+70^\circ\text{C}$  и снова измеряют ее емкость. С повышением температуры уменьшаются сопротивления  $R_y$  и  $r$ , особенно заметно для увлажненной изоляции из-за увеличения проводимости примесей во влаге. Вследствие этого уменьшается постоянная времени абсорбционных емкостей ( $r \cdot \Delta C$ ) и она, забегая вперед, согласно выражению (3.5), увеличивает суммарную емкость изоляции.

Критерием неувлажненности изоляции считается

$$C_{гор}/C_{хол} \leq 1,15.$$

Такие испытания проводят на трансформаторных заводах.

### 3.1.7. Контроль изоляции методом емкость-частота

Этот метод основан на измерении суммарной (эквивалентной) емкости неоднородной изоляции при различных частотах приложенного напряжения. Величина эквивалентной емкости зависит от частоты напряжения  $\omega = 2\pi f$ :

$$C_3 = C_r + \frac{\Delta C}{1 + \omega^2 (r \cdot \Delta C)^2}. \quad (3.5)$$

Графически эта зависимость изображена на рис. 3.9.

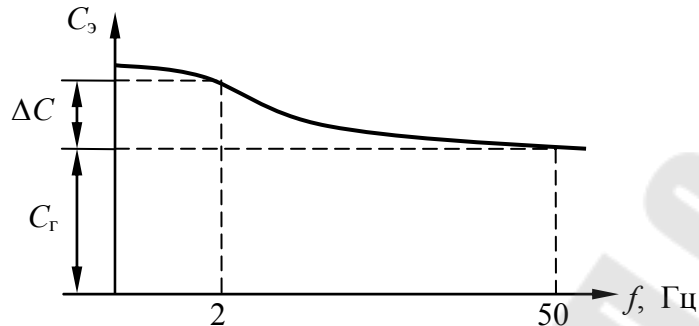


Рис. 3.9. Зависимость эквивалентной емкости изоляции от частоты

При большой частоте абсорбционные емкости не успевают перезаряжаться за счет большой постоянной времени  $r \cdot \Delta C$  и эквивалентная емкость стремится к значению геометрической емкости  $C_r$ .

Схема прибора для измерения емкости на разных частотах приведена на рис. 3.10.

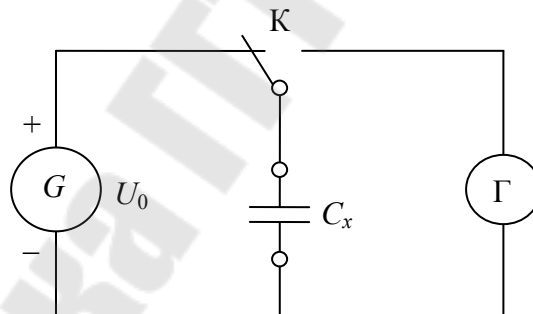


Рис. 3.10. Схема прибора для измерения отношения  $C_2/C_{50}$

Испытуемая емкость изоляции  $C_x$  с помощью переключающих контактов К периодически подключается на заряд к источнику постоянного напряжения  $U_0$  и на разряд к гальванометру Г. Частота переключения контактов при первом измерении 2 Гц и при втором – 50 Гц. Средний ток, протекающий через гальванометр зависит от частоты переключения и значения емкости  $C_x$ :

$$I = 2\pi f C_x U_0.$$

Качество изоляции оценивают по отношению

$$\frac{C_2}{C_{50}} = \frac{50 I_2}{2 I_{50}}.$$

Для нормальной изоляции отношение  $C_2/C_{50} = 1-1,2$ ; для увлажненной  $C_2/C_{50} > 1,2$ . Для измерения этого показателя применяется прибор контроля влажности типа ПКВ-13 и ПКВ-7.

### 3.1.8. Контроль изоляции методом емкость-время

По данному методу отдельно измеряют сначала абсорбционную емкость  $\Delta C$ , а затем геометрическую  $C_r$ .

Схема прибора приведена на рис. 3.11.

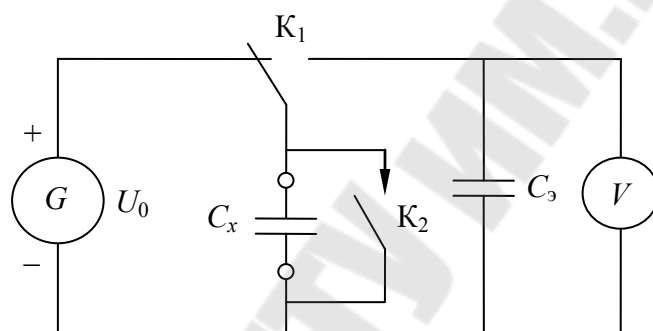


Рис. 3.11. Схема прибора для измерения отношения  $\Delta C/C_r$

При измерении абсорбционной емкости контактом  $K_1$  подключают испытуемую емкость изоляции  $C_x$  к источнику питания  $U_0 = 400$  В на заряд. Время заряда около 1 минуты. Затем отключают от источника и кратковременно около 10 мс замыкают емкость  $C_x$  накоротко с помощью контактов  $K_2$ . За это время успевает полностью разрядиться только геометрическая емкость  $C_r$ . После этого контактом  $K_1$  подключают  $C_x$  к эталонному конденсатору  $C_0$  на длительное время, в течение которого заряды от емкости  $\Delta C$  переходят к  $C_0$  и напряжение, измеряемое вольтметром  $V$ , будет пропорционально абсорбционной емкости  $\Delta C$ .

Для измерения геометрической емкости изоляцию  $C_x$  повторно заряжают от источника  $U_0$ , затем контактом  $K_1$  кратковременно ее подключают к конденсатору  $C_0$  в течение времени около 10 мс. За это короткое время к конденсатору  $C_0$  успевает перейти только заряд

геометрической емкости  $C_T$ . Емкость эталонного конденсатора  $C_9$  выбирают заведомо больше емкости  $C_T$ . Поэтому напряжение, измеренное вольтметром, будет пропорционально  $C_T$ .

Показателем качества изоляции служит отношение  $\Delta C/C_T$ , которое для нормальной изоляции не превышает 0,1. При увлажненной изоляции  $\Delta C/C_T > 0,1$ .

Схема прибора для измерения  $\Delta C/C_T$  мало отличается от прибора для измерения  $C_2/C_{50}$ . Поэтому выпускается комбинированный прибор для измерения обоих этих показателей. Тип прибора ПКВ-8 или его электронный аналог ЕВ-3.

Итак, были рассмотрены все существующие методы неразрушающего контроля изоляции. В эксплуатации применяют следующие измерения:  $\text{tg} \delta$ ,  $R_{60}$ ,  $K_{\text{абс}}$ ,  $C_2/C_{50}$ ,  $\Delta C/C_T$ . Причем весь комплекс испытаний проводят только для сложного оборудования: трансформаторы, реакторы, электрические машины. Для остального оборудования ограничиваются измерениями  $\text{tg} \delta$  и  $R_{60}$ . У трансформаторов и реакторов кроме того берут пробу масла и в лабораторных условиях проводят его анализ на содержание воды, смол, окислов и различных примесей.

В последнее время появился новый метод испытания – хроматографический анализ газов, растворенных в масле, с помощью которого можно оценить состояние бумажно-масляной изоляции в трансформаторе. Выпускается переносной газовый хроматограф типа *Mobil GC*. Применяют так же тепловизионный контроль для дистанционного измерения избыточной температуры в локальных местах оборудования, изоляторов, контактных соединений, подшипников и т. п.

### **3.2. Испытания изоляции повышенным напряжением**

Целью таких испытаний является проверка отсутствия местных сосредоточенных дефектов в изоляции. Повышенным напряжением изоляцию испытывают только после проведения комплекса неразрушающих испытаний и при их положительных результатах.

Испытания делятся на два вида: испытания импульсными напряжениями и повышенным переменным, либо для силовых кабелей – повышенным постоянным напряжением.

### 3.2.1. Испытания изоляции импульсными напряжениями

Схема испытательной установки приведена на рис. 3.12, а.

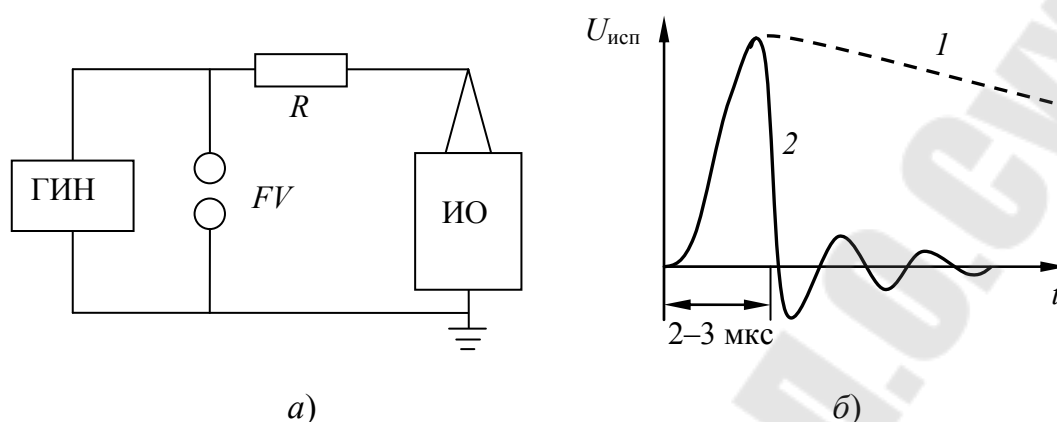


Рис. 3.12. Схема испытания изоляции импульсными напряжениями и формы полного и срезанного импульсов

На испытуемый объект (ИО), например, трансформатор, от генератора импульсных напряжений (ГИН) подается полный стандартный импульс 1,2/50, имитирующий грозовую волну перенапряжения (кривая 1 на рис. 3.12, б).

Амплитуда полого импульса рассчитывается по формуле

$$U_{\text{мах п}} = 1,1U_{\text{ост}} + 15,$$

где  $U_{\text{ост}}$  – остающееся напряжение разрядника, установленного вблизи трансформатора, кВ.

Однако в эксплуатации возможны случаи перекрытия внешней изоляции вблизи трансформатора. При этом на трансформатор воздействует срезанный импульс, форма которого приведена на рис. 3.12, б кривая 2. Срезанный импульс имеет большой градиент (перепад) напряжения за счет переходного процесса, который опасен для продольной (витковой) изоляции трансформатора.

Для создания срезанного импульса в схеме установлен шаровой разрядник  $FV$ , который одновременно служит ограничителем допустимой амплитуды полного импульса. Шаровой разрядник срабатывает с предразрядным временем 2–3 мкс в соответствии со своей вольт-секундной характеристикой. Амплитуда срезанного импульса должна быть больше полного на 20–25 %.

Внутреннюю изоляцию испытывают трехударным методом. К объекту прикладывается по 3 импульса положительной и отрицательной

полярности сначала полных, а затем срезанных с интервалами между импульсами 1 мин. Внешнюю изоляцию испытывают пятнадцатиполупериодным методом полных импульсов, при этом допускается 2 перекрытия внешней изоляции в первой серии испытаний.

Ввиду громоздкости ГИН испытания импульсными напряжениями выполняют только в стационарных условиях на заводах изготовителях.

### **3.2.2. Испытания изоляции повышенным переменным или постоянным напряжением**

Повышенное переменное напряжение имитирует внутренние перенапряжения в электроустановках. Его получают от специальных однофазных испытательных трансформаторов. Уровень испытательного напряжения регламентируется нормами ПУЭ для каждого вида оборудования. Обычно оно составляет от 2 до  $3,5U_{ном}$ . Выдержка времени испытания переменным напряжением составляет 1 мин. Во время испытания рекомендуется оценивать интенсивность частичных разрядов электромагнитным методом измерения или с помощью акустического детектора типа М 4204 с ультразвуковым направленным микрофоном, улавливающим частоты до 80 кГц.

В условиях эксплуатации повышенным переменным напряжением испытывают изоляцию оборудования с номинальным напряжением до 35 кВ. Сюда не входят силовые кабели и конденсаторы, изоляция которых обладает большой емкостью. Мощность испытательного трансформатора зависит от этой емкости, и трансформатор становится нетранспортабельным:  $S_{тр} = \omega C U_{исп}^2$ . Поэтому кабели и конденсаторы вынужденно испытывают повышенным постоянным напряжением от компактных испытательных установок, например, АИИ-70, ток нагрузки которых зависит только от тока утечки по изоляции. Вместе с тем, при таких испытаниях распределение напряженностей полей в отдельных диэлектриках комбинированной изоляции получается иным, чем при рабочем переменном напряжении. Для компенсации этого недостатка уровень испытательного постоянного напряжения значительно, в 2–3 раза, увеличивают по сравнению с переменным напряжением, и продолжительность испытания увеличивают до 5–15 мин. При испытании постоянным напряжением можно получить дополнительную информацию – величины токов утечки в разных фазах трехфазного кабеля и оценить их симметрию в изоляции разных жил.



В последнее время для кабелей с полиэтиленовой изоляцией применяют новый метод испытания переменным напряжением сверхнизкой частоты 0,1 Гц. У таких кабелей после испытания их повышенным постоянным напряжением долго сохраняется заряд абсорбции. Были случаи, когда при включении кабеля, прошедшего такие испытания, изоляция пробивалась в нескольких местах из-за скопления зарядов абсорбции. Сверхнизкие частоты позволяют, с одной стороны, уменьшить ток нагрузки на испытательный трансформатор, и с другой, уменьшить величину испытательного напряжения и продолжительность испытания, что снижает риск пробоя изоляции во время и после испытания.

### Контрольные вопросы

1. Как классифицируются существующие виды испытания изоляции?
2. Что такое диэлектрические потери изоляции, и каким показателем они характеризуются?
3. Как и каким прибором измеряется  $\operatorname{tg} \delta$  и емкость изоляции?
4. Назовите причины возникновения зарядов абсорбции во внутренней изоляции.
5. Нарисуйте схему замещения неоднородной изоляции и поясните назначение каждого ее элемента.
6. В чем заключаются методы контроля изоляции по возвратному напряжению и кривой саморазряда?
7. Каким прибором измеряют сопротивление изоляции?
8. Как измеряют значения  $R_{60}$  и коэффициента абсорбции изоляции?
9. Объясните метод испытания изоляции «емкость-частота».
10. Объясните метод испытания изоляции «емкость-время».
11. Как и зачем испытывают изоляцию импульсным напряжением?
12. Нарисуйте формы полного и срезанного импульса напряжения.
13. Как и зачем испытывают изоляцию повышенным переменным напряжением?
14. Почему изоляцию кабеля испытывают повышенным постоянным напряжением?
15. В чем преимущество нового метода испытания кабеля переменным напряжением сверхнизкой частоты?

## 4. ГРОЗОВЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ И ЗАЩИТА ОТ НИХ

### 4.1. Молния как источник грозовых перенапряжений

Возникновению молнии предшествует процесс электризации облаков. Существуют разные теории этого процесса. Непременным условием электризации облаков является образование восходящего потока теплого воздуха, насыщенного водяными парами. По одной из теорий, электризация капелек воды восходящего потока происходит за счет неравномерного их замерзания в зоне низких температур верхних слоев атмосферы. По другой теории – за счет сталкивания их с каплями дождя или града, движущимися навстречу с большой скоростью. Как бы то ни было, но в итоге нижние облака накапливают отрицательные заряды, а верхние – положительные. Граница зоны разделения заряженных противоположно облаков служит изотерма с температурой воздуха минус 10 °С.

Грозное облако и земля образуют конденсатор гигантских размеров. Средняя напряженность поля этого конденсатора невысока, около 1 кВ/см. Однако на отдельных выступах облака она может достигать 10 кВ/см, при которой возникает ударная ионизация воздуха в зоне низкого давления.

Разряд молнии начинается с прорастания лидера, движущегося к земле со скоростью около 150 км/с. По мере продвижения лидера в земле, под действием созданного им поля, скапливаются заряды противоположного знака. Обычно в облаке – отрицательные заряды, в земле, а точнее на возвышенных объектах, – положительные. После того, как лидер достигнет земли, начинается главный или обратный разряд, т. е. молния. Обратный разряд преодолевает расстояние в несколько километров за время 30–70 мкс, что и определило среднюю длительность стандартного испытательного импульса напряжения.

Основными количественными характеристиками молнии являются значение тока молнии, протекающего через пораженный объект, и крутизна его фронта. Вероятность возникновения того или иного значения тока молнии определяется по формуле

$$P_i = 10^{-I_m/60}, \quad (4.1)$$

где  $I_m$  – значение ток молнии, кА.

За расчетное значение тока молнии принято считать 100 кА. Вероятность его появления по (4.1) равна 0,02.

Интенсивность грозовой деятельности характеризуется средним числом грозовых часов в году ( $T$ ) над данной местностью. Например, в Сибири  $T \approx 20$ , а в районе г. Сочи более 100 грозовых часов в году. При  $T = 100$  один квадратный километр поверхности земли в среднем поражается молнией 6,7 раза, т. е. на один грозовой час приходится 0,067 ударов.

## 4.2. Защита от прямых ударов молнии

Основным средством защиты являются молниеотводы, которые делятся на стержневые для защиты сосредоточенных объектов и тросовые для защиты линий электропередач. Молниеотвод собирает на себя удары молнии, лидер которых появился в радиусе от молниеотвода, равном 3,5 его высоты. Пространство вокруг молниеотвода, удары молнии в которое маловероятно, называется зоной защиты молниеотвода. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода рассчитывается по формуле

$$r_x = 1,6hp(h - h_x)/(h - h_x), \quad (4.2)$$

где  $h$  – высота молниеотвода;  $h_x$  – высота защищаемого объекта;  $r_x$  – максимальное допустимое расстояние от молниеотвода до защищаемого объекта;  $p$  – коэффициент, равный 1 при  $h < 30$  м и  $p = 5,5/\sqrt{h}$  при  $h > 30$  м.

Два молниеотвода, расположенные на расстоянии друг от друга на более  $7h$ , называются спаренными молниеотводами. У них зона защиты в два раза больше, чем простая сумма двух одиночных молниеотводов. При числе молниеотводов больше двух они должны быть расположены по окружности с диаметром  $D \leq 8p(h - h_x)$ .

Зона защиты тросового молниеотвода характеризуется защитным углом  $\alpha$ . Это угол между вертикалью и прямой линией, соединяющей трос и крайний на опоре провод линии (рис. 4.1). Допустимый защитный угол линий находится в пределах  $\alpha = 20\text{--}30^\circ$ .

Наличие молниеотвода не обеспечивает 100%-ную защиту от прямых ударов молнии. Всегда существует вероятность прорыва молнии в зону защиты молниеотвода.

### 4.3. Грозозащитное заземление

Молниеотвод отводит ток молнии в землю через заземлитель, расположенный в земле. При ударе молнии напряжение на молниеотводе относительно земли определяется по закону Ома:  $U_M = I_M R_3$ . Например, при токе молнии, равном 100 кА и сопротивлении заземлителя 30 Ом, величина напряжения на молниеотводе составит 3 миллиона Вольт.

Сопротивление заземлителя характеризуется двумя величинами: стационарным сопротивлением  $R_{ст}$  для тока промышленной частоты и импульсным сопротивлением  $R_{и}$  для импульсного тока молнии. Отношение  $\alpha = R_{и}/R_{ст}$  называется импульсным коэффициентом заземления. Если заземлитель сосредоточенный, например, металлическая труба, вбитая в землю под молниеотводом, то при протекании через него импульсного тока молнии в грунте возникают искровые процессы. Искровые процессы связаны с возникновением ударной ионизации пузырьков воздуха, расположенных в грунте вокруг заземлителя. Искровая зона как бы увеличивает поверхность заземлителя и сопротивление его уменьшается, при этом  $\alpha < 1$ . С другой стороны, если заземлитель протяженный, например, вбитая в землю труба соединена с молниеотводом металлической полосой длиной 10–15 м, то ток в трубе будет ограничен индуктивным сопротивлением металлической полосы. В результате для протяженного заземлителя  $\alpha > 1$ . В зависимости от типа заземлителя, величины тока молнии и удельного сопротивления грунта в [1] приведены значения импульсного коэффициента заземления, которые находятся в пределах от 0,25 до 1,2.

### 4.4. Грозозащита линии электропередач

При ударе молнии в провод на нем возникает высокий потенциал, который может привести к перекрытию линейных изоляторов и возникновению устойчивой электрической дуги вследствие сопровождающего тока короткого замыкания в линии. В этом случае срабатывает релейная защита, которая отключает линию. Число грозовых отключений линии не должно превышать 1–4 раза в год в зависимости от категории потребителей.

Грозоупорность линии оценивается удельным числом грозовых отключений в год  $n_{откл}$  линии длиной 100 км, проходящей в районе с числом грозовых часов в году, равным 100:

$$n_{\text{откл}} = NP_{\text{пер}}\eta, \quad (4.3)$$

где  $N$  – общее число ударов молнии в линию длиной 100 км;  $P_{\text{пер}}$  – вероятность импульсного перекрытия изоляции линии или, что то же самое, вероятность появления такого критического тока молнии  $I_{\text{кр}}$ , при котором происходит импульсное перекрытие изоляции;  $\eta$  – вероятность перехода импульсного перекрытия в силовую дугу, созданную сопровождающим током короткого замыкания.

Общее число ударов молнии в линию зависит от средней высоты подвеса провода  $h_{\text{ср}}$  и определяется по формуле

$$N = 4h_{\text{ср}}. \quad (4.4)$$

Например, при  $h_{\text{ср}} = 25$  м линия длиной 100 км соберет на себя 100 ударов молнии в год. Однако не все удары молнии приведут к перекрытию изоляции линии. Необходимо, чтобы значение тока молнии составило такую критическую величину, при которой напряжение на пораженном проводе превысит импульсную электрическую прочность гирлянды подвесных изоляторов на опоре линии. Например, на ВЛ-110 кВ, одна гирлянда имеет импульсную электрическую прочность  $U_{50\%} = 700$  кВ.

При ударе молнии в провод ток молнии в обе стороны от места удара распространяется поровну  $I_{\text{м}}/2$ . Сопротивление ему оказывают провода, соединенные параллельно слева и справа от места удара. Таким образом, напряжение на проводе по закону Ома составит

$$U_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{м}} Z_{\text{л}}}{2}, \text{ при } Z_{\text{л}} = 400 \text{ Ом} \quad U_{\text{пр}} = 100 I_{\text{м}}, \quad (4.5)$$

где  $Z_{\text{л}}$  – волновое сопротивление проводов линии.

Для перекрытия гирлянды подвесных изоляторов напряжение на проводе должно превысить значение  $U_{\text{пр}} \geq U_{50\%}$ .

Следовательно, критический ток молнии для ВЛ-110 кВ по (4.5) составит

$$I_{\text{кр}} = U_{50\%}/100 = 700/100 = 7 \text{ кА}. \quad (4.6)$$

Вероятность появления критического тока молнии по (4.1), а значит и импульсного перекрытия гирлянды, равна

$$P_{\text{пер}} = 10^{-7/60} = 0,76. \quad (4.7)$$

Вероятность возникновения силовой дуги  $\eta$  зависит от длины пути перекрытия  $l_{\text{пер}}$ , по которому проходит ток короткого замыкания

$$\eta = \left( 1,5 \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot l_{\text{пер}}} - 4 \right) 10^{-2}. \quad (4.8)$$

На рис. 4.1 показаны возможные пути перекрытия изоляции, по которым проходят токи короткого замыкания (КЗ) в линии.

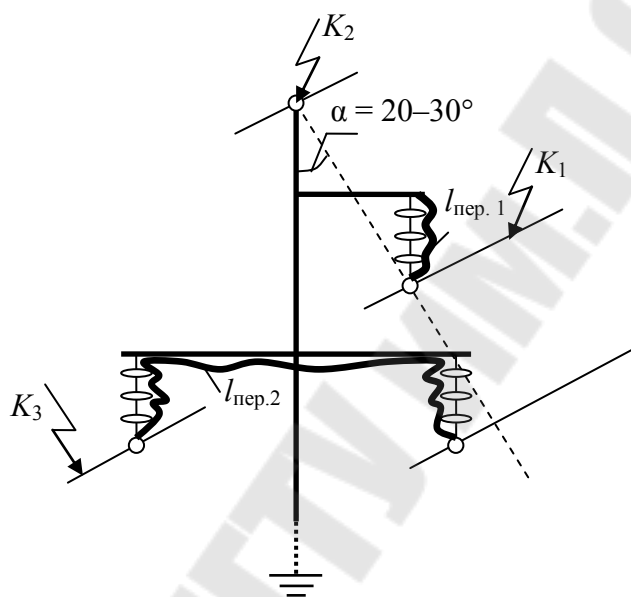


Рис. 4.1. Возможные пути перекрытия изоляции линии при грозовых перенапряжениях

Линия 110 кВ работает с заземленной нейтралью, поэтому для возникновения однофазного КЗ на землю при ударе молнии в точку  $K_1$  достаточно перекрыть одну гирлянду изоляторов на металлической или железобетонной опоре  $l_{\text{пер.1}}$ .

Длина гирлянды ВЛ-110 кВ равна  $l_{\text{пер.1}} = 1,3$  м, тогда по (4.8):

$$\eta = \left( 1,5 \frac{110}{\sqrt{3} \cdot 1,3} - 4 \right) 10^{-2} = 0,69.$$

Таким образом, для ВЛ-110 кВ без грозозащитного троса удельное число грозовых отключений по (4.3) составит

$$n = 100 \cdot 0,76 \cdot 0,69 = 52.$$

Это недопустимо большое число, поэтому линии 110 кВ и выше на металлических или железобетонных опорах обязательно должны иметь грозозащитный трос по всей длине.

Однако трос не обеспечивает 100%-ную защиту. Существует вероятность прорыва молнии через тросовую защиту, которая определяется по выражению

$$P_a = 10^{\frac{\alpha\sqrt{h}}{75}-3,95}, \quad (4.9)$$

где  $\alpha$  – защитный угол линии;  $h$  – высота подвеса троса, м.

Для нашего примера при  $\alpha = 30^\circ$  получим:

$$P_a = 10^{\frac{30\sqrt{h}}{75}-3,95} = 0,01.$$

Следовательно, число грозовых отключений от удара молнии в провод при наличии троса уменьшится в 100 раз и составит  $n_{\text{откл}} = 0,52$ .

Вместе с тем, на линиях с тросом наибольшую опасность перекрытия изоляции представляют удары молнии в металлическую или железобетонную опору (точка  $K_2$ ). При этом возможно обратное перекрытие гирлянды изоляторов по тому же пути  $l_{\text{пер.1}}$  из-за высокого потенциала на опоре. Для этого случая критический ток молнии определяется по формуле

$$I_{\text{кр}} = U_{50\%} / (R_{\text{и}} + 0,3h), \quad (4.10)$$

где  $R_{\text{и}}$  – импульсное сопротивление заземления опоры,  $R_{\text{и}} = 10\text{--}30$  Ом;  $h$  – высота опоры, м.

При  $R_{\text{и}} = 20$  Ом и  $h = 25$  м, получим:

$$I_{\text{кр}} = 700 / (20 + 0,3 \cdot 25) = 25,5 \text{ кА}.$$

Вероятность появления такого тока молнии по (4.1) составит

$$P_{\text{пер}} = 10^{-25,5/60} = 0,38.$$

Общее число ударов молнии в опору примерно на порядок меньше, чем в трос или в провод линии, т. е.  $N = 10$ , тогда по (4.3):

$$n_{\text{откл}} = 10 \cdot 0,38 \cdot 0,69 = 2,6.$$

Суммарное число грозových отключений линии с тросом будет равно  $n_{\text{откл}} = 0,52 \cdot 2,6 = 3,1$ , что допустимо.

Аналогично определим число грозových отключений линии напряжением 35 кВ, работающей в системе с изолированной нейтралью.

Если для отключения ВЛ-110 кВ достаточно перекрыть одну гирлянду изоляторов, то на линии 35 кВ такое перекрытие не приведет к возникновению короткого замыкания и отключение линии от релейной защиты не произойдет. Для отключения линий 6–35 кВ необходимо создать двухфазное или трехфазное КЗ. Процесс перекрытия изоляции при этом происходит следующим образом. Вначале при ударе молнии в провод (точка  $K_3$  на рис. 4.1) перекрывается одна гирлянда изоляторов. Опора при этом приобретает высокий потенциал и происходит обратное перекрытие второй гирлянды в другой фазе. Путь перекрытия  $l_{\text{пер.2}}$  состоит из суммы: гирлянда одной фазы – траверса – гирлянда другой фазы, т. е. длина  $l_{\text{пер.2}}$  увеличится как минимум в два раза на металлических или железобетонных опорах, а на деревянных опорах добавляется еще изоляция деревянной траверсы.

Таким образом, линии напряжением до 35 кВ имеют значительно выше *защитный уровень изоляции* по сравнению с линиями 110 кВ. В этой связи определим, требуется ли на этих линиях применять грозо-защитный трос.

Допустим, линия 35 кВ на железобетонных опорах имеет следующие параметры:  $h_{\text{ср}} = 12$  м; длина одной гирлянды изоляторов  $l = 0,6$  м; ее импульсное напряжение перекрытия  $U_{50\%} = 350$  кВ; импульсное сопротивление заземления опоры  $R_{\text{и}} = 10$  Ом.

Для обратного перекрытия одной гирлянды критический ток молнии должен составить

$$I_{\text{кр}} = U_{50\%} / (0,7 \cdot R_{\text{и}}) = 350 / (0,7 \cdot 10) = 50 \text{ кА}.$$

Вероятность его появления по (4.1):

$$P_{\text{пер}} = 10^{-50/60} = 0,15.$$

Вероятность  $\eta$  при длине пути перекрытия  $l_{\text{пер.2}}$  по (4.8):

$$\eta = \left( 1,5 \frac{35}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot 0,6} - 4 \right) 10^{-2} = 0,21.$$



Число ударов молнии в линию длиной 100 км по (4.4):

$$N = 4 \cdot 12 = 48.$$

Удельное число грозových отключений линии по (4.3)  
 $n_{\text{откл}} = 48 \cdot 0,15 \cdot 0,21 = 1,5$ , что допустимо.

Можно сделать вывод, что линии 6, 10, 35 кВ, работающие в системе с изолированной нейтралью, не требуют применения грозозащитного троса по всей длине. Линии на деревянных опорах имеют более высокий защитный уровень, поэтому также не требуют применения троса, даже при номинальном напряжении линии 110 кВ, так как среднее разрядное напряжение мокрого дерева составляет достаточно большую величину 100 кВ/м. Перекрытие изоляции в этом случае на линии 110 кВ происходит не по стойке опоры, а по пути провод – деревянная траверса – провод, т. е. как и на линии, работающей в системе с изолированной нейтралью.

#### 4.5. Грозозащита станций и подстанций

К грозозащите подстанции предъявляются более жесткие требования, чем к линии. Перекрытие изоляции на подстанции вблизи сборных шин может привести к системным авариям и выходу из строя дорогостоящего оборудования. Грозовые перенапряжения на подстанции обусловлены тремя причинами: прямыми ударами молнии; обратным перекрытием изоляции с пораженного молниеотвода на токоведущие части электроустановки; набегаящими с линий волнами грозových перенапряжений.

##### 4.5.1. Перенапряжения от прямых ударов молнии

Число ударов молнии в год, которые принимают на себя стержневые молниеотводы при 100 грозových часах в году, определяется по формуле

$$N = 6,7(a + 7h)(b + 7h)10^{-6},$$

где  $h$  – высота молниеотводов, м;  $a$  и  $b$  – длина и ширина площади защищаемой территории, м.

Например, при  $a = b = 100$  м и  $h = 15$  м,  $N = 0,28$ .

Подстанция защищается стержневыми молниеотводами, при этом вероятность прорыва молнии в зону защиты молниеотвода составляет не более 5 %, т. е. число прорывов молнии на подстанцию в среднем составит 1,4 раза за 100 лет эксплуатации. Таким образом,

подстанция от прямых ударов молнии надежно защищена. Мало того, на небольших по размеру подстанциях напряжением 35–110 кВ, если они расположены в районах с числом грозových часов в году менее 20, или на грунтах с большим удельным сопротивлением, допускается вообще не устанавливать стержневые молниеотводы.

#### 4.5.2. Обратные перекрытия изоляции на подстанции

С целью экономии металла и уменьшения грозозащитного сопротивления заземления на некоторых подстанциях молниеотводы присоединяют к общему контуру заземления подстанции или их устанавливают на порталах сборных шин открытого распределительного устройства (ОРУ) подстанции (рис. 4.2).

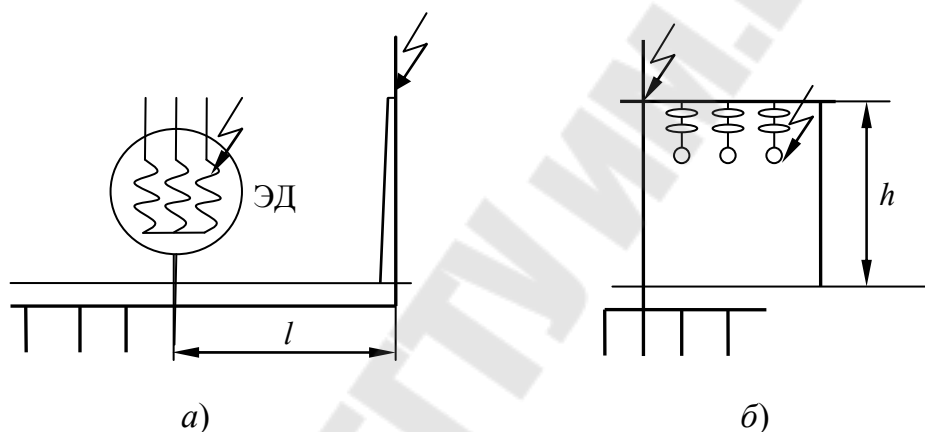


Рис. 4.2. Обратные перекрытия изоляции на подстанции при ударах молнии

Если расстояние  $l$  (рис. 4.2, а) от молниеотвода до контура заземления небольшое, то при ударе молнии в молниеотвод в ближайших заземлителях контура возникает высокий потенциал. В случае, если к этому месту контура подключено заземление корпуса электрической машины или другого оборудования, то произойдет обратное перекрытие изоляции с корпуса машины на ее обмотки. Для исключения обратного перекрытия расстояние  $l$  должно быть не менее 10–15 м. В этом случае индуктивное сопротивление соединяющей полосы оказывается достаточным для ограничения потенциала на корпусе машины. Рекомендуется так же установить индивидуальный заземлитель под молниеотводом с сопротивлением заземления не более 25 Ом. Если прожекторная мачта на подстанции используется для установки молниеотвода, то кабель питания прожектора должен быть помещен в металлическую

трубу, причем эта труба должна быть проложена в земле на расстоянии не менее 10 м от мачты.

При установке молниеотвода на портале (рис. 4.2, б) возможно обратное перекрытие гирлянды изоляторов портала при ударе молнии в молниеотвод. При этом напряжение на спуске молниеотвода на высоте  $h$  от поверхности земли определяется по формуле

$$U_m = I_m R_{\text{и}} + 50h. \quad (4.11)$$

Например, если контур заземления подстанции, с которым соединен портал, имеет импульсное сопротивление заземления  $R_{\text{и}} = 0,5$  Ом, то приняв  $I_m = 60$  кА и  $h = 15$  м, получим:  $U_m = 60 \cdot 0,5 + 50 \cdot 15 = 780$  кВ, что превышает импульсную электрическую прочность гирлянды изоляторов напряжением 110 кВ ( $U_{50\%} = 700$  кВ). Поэтому в ОРУ напряжением 220 кВ и выше молниеотводы допускается устанавливать на порталах без всякого расчета, так как гирлянда изоляторов на напряжение 220 кВ имеет  $U_{50\%} = 1300$  кВ. Для ОРУ-110 кВ должен быть произведен специальный расчет с учетом высоты портала, вероятности появления критического тока молнии и числа их ударов. В ОРУ-35 кВ внешняя изоляция на подстанции во всех случаях должна быть выполнена на напряжение 110 кВ.

#### **4.5.3. Защита подстанции от набегающих волн перенапряжения**

Основную опасность для изоляции подстанционного оборудования представляют набегающие волны грозových перенапряжений, возникающих в линиях, отходящих от подстанции, так как запас электрической прочности изоляции оборудования на подстанции намного меньше, чем на линиях. Основным средством защиты от таких перенапряжений являются вентильные разрядники или ОПН, установленные на шинах подстанции. Разрядник надежно защитит изоляцию оборудования только в том случае, если его импульсный ток при срабатывании не превысит допустимого тока координации и крутизна фронта падающей волны не превысит допустимого значения.

##### **4.5.3.1. Ограничение импульсного тока разрядника**

Если импульсный ток, протекающий через разрядник, превысит значение 5–14 кА, то остающееся напряжение на нем станет больше электрической прочности защищаемой изоляции. Величину импульс-

ного тока разрядника можно приближенно определить на основании схем, представленных на рис. 4.3.

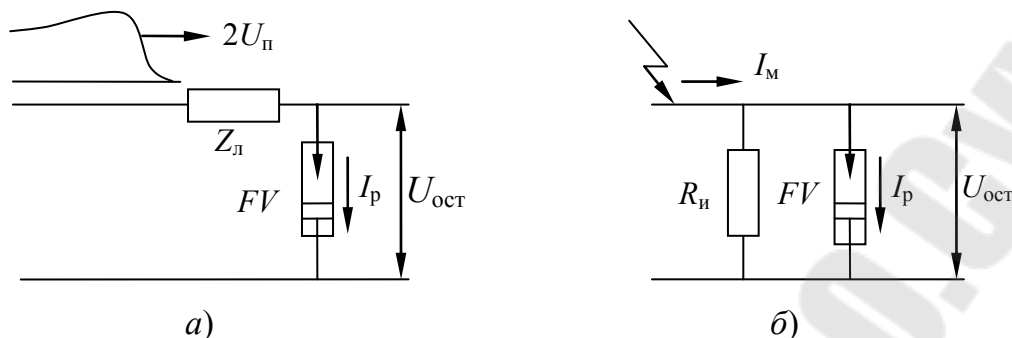


Рис. 4.3. Схемы к расчету значения импульсного тока, протекающего через разрядник при ударах молнии вдали и вблизи подстанции

Если молния ударила в линию вдали от подстанции (рис. 4.3, а), то импульсный ток разрядника определяется по формуле

$$I_p = (2U_{\text{п}} - U_{\text{ост}}) / Z_{\text{л}}, \quad (4.12)$$

где  $U_{\text{п}}$  – напряжение падающей волны, для линии 110 кВ, равное  $U_{50\%} = 700$  кВ линейной изоляции;  $U_{\text{ост}}$  – остающееся напряжение, например, для разрядника РВС-110,  $U_{\text{ост}} = 400$  кВ;  $Z_{\text{л}}$  – волновое сопротивление линии,  $Z_{\text{л}} = 400$  Ом.

Набегающая волна при срабатывании разрядника отражается с обратным знаком, поэтому принимается величиной  $2U_{\text{п}}$ . Подставив в формулу численные значения, получим:

$$I_p = (2 \cdot 700 - 400) / 400 = 2,5 \text{ кА},$$

что допустимо, так как меньше тока координации 5–14 кА.

Если молния ударила в линию вблизи подстанции (рис. 4.3, б), то сопротивлением линии  $Z_{\text{л}}$  можно пренебречь, тогда импульсный ток разрядника определяется по формуле

$$I_p = I_{\text{м}} - U_{\text{ост}} / R_{\text{и}}, \quad (4.13)$$

где  $I_{\text{м}}$  – расчетный ток молнии, равный 100 кА;  $R_{\text{и}}$  – импульсное сопротивление заземления ближайшей к месту удара опоры,  $R_{\text{и}} = 10$  Ом.

Подставив в формулу численные значения, получим:

$$I_p = 100 - 400/10 = 60 \text{ кА},$$

что значительно превышает ток координации разрядника.

Таким образом, для ограничения импульсного тока разрядника необходимо исключить удары молнии в линию вблизи подстанции. С этой целью участки линии длиной 1–3 км, прилегающие к подстанции, должны быть особенно тщательно защищены от прямых ударов молнии, т. е. обязательно должны иметь грозозащитный трос, если его нет по всей длине линии, то защитный угол троса должен быть минимальным  $\alpha = 20^\circ$ , а также сопротивление заземления опор – не более 10 Ом. Такие участки линии называют защищенным подходом.

На рис. 4.4 изображена схема защищенного подхода линии, не имеющей грозозащитный трос по всей длине. Он подвешивается только в пределах защищенного подхода.

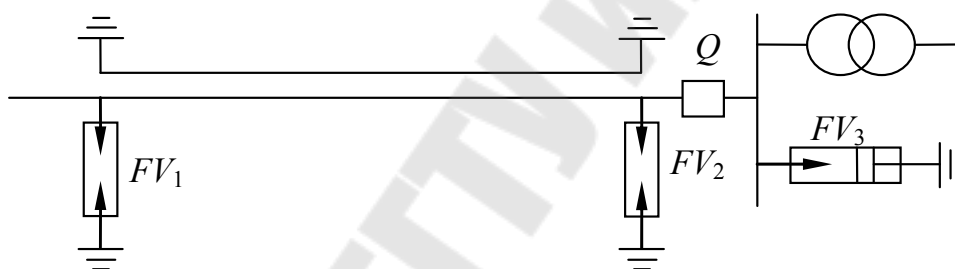


Рис. 4.4. Схема защищенного подхода линии

Опоры, по которым проходят спуски заземления троса, имеют ослабленную изоляцию. Поэтому на них устанавливаются трубчатые разрядники или ОПН. Если сопротивление заземления опор невозможно выполнить минимальным из-за большого удельного сопротивления грунта, то между опорами прокладывают противовесы.

#### 4.5.3.2. Ограничение крутизны фронта падающей волны

Защищенный подход не только ограничивает импульсный ток разрядника, но и крутизну фронта падающей волны. Дело в том, что при движении волны по линии происходит ее деформация за счет импульсного коронного разряда на проводах. Форма деформированной волны показана на рис. 4.5, б.

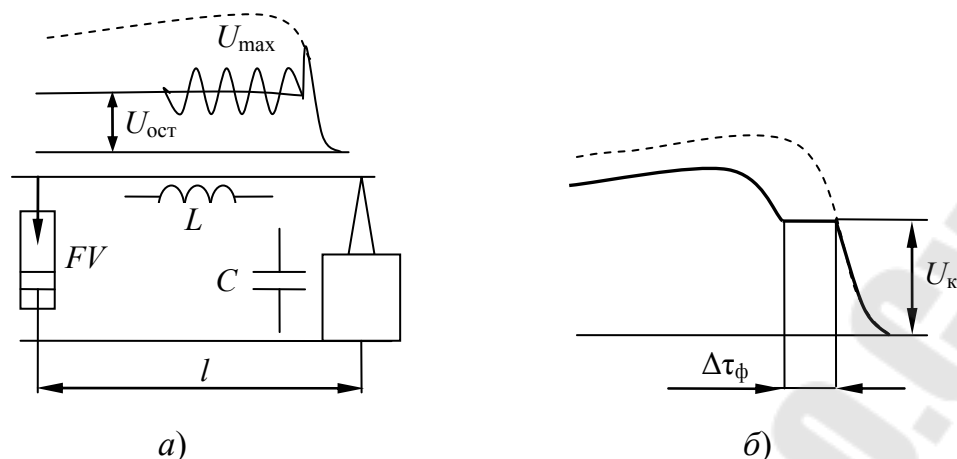


Рис. 4.5. Схема колебательного контура разрядник-трансформатор и форма деформированной волны перенапряжения

При напряжении набегающей волны, превышающей критическое значение  $U_k$ , потери энергии на корону смещают фронт волны на величину, зависящую от длины ее пробега:

$$\Delta\tau_\phi = (0,5 + 0,008U_\Pi/h_{cp})L, \quad (4.14)$$

где  $U_\Pi$  – амплитуда набегающей волны;  $h_{cp}$  – средняя высота подвеса провода;  $L$  – длина пробега.

Например, для ВЛ-110 кВ при пробеге волны 1 км смещение фронта составит  $\Delta\tau_\phi = 1$  мкс, что соизмеримо со средней длительностью фронта стандартного импульса 1,2 мкс.

Рассмотрим, в чем заключается опасность падения на подстанцию волны с крутым фронтом (рис. 4.5, а).

Ошиновка подстанции, обладающая индуктивностью  $L$ , вместе с емкостью изоляции  $C$  силового трансформатора образуют колебательный контур. При срабатывании разрядника  $FV$  в указанном контуре возникают собственные высокочастотные колебания напряжения, которые накладываются на остающееся напряжение разрядника. В результате этого огибающая максимальных потенциалов ( $U_{max}$ ) может превысить импульсную прочность изоляции трансформатора. Величина  $U_{max}$  зависит от крутизны фронта падающей волны  $dU/dt$  и расстояния  $l$  от разрядника до трансформатора. Предельное допустимое расстояние  $l$  от трансформатора до разрядника нормируется Правилами устройства электроустановок (ПУЭ), а крутизну фронта волны ограничивают до допустимого значения с помощью защищенного подхода.

Таким образом, длина защищенного подхода выбирается большей из двух условий: по условию ограничения амплитуды импульсного тока (4.12) и по условию ограничения крутизны фронта падающей волны

$$L_{\text{подх}} = U_{50\% \text{ п/ст}} / (a_{\text{доп}} \cdot \Delta\tau_{\text{ф}}),$$

где  $a_{\text{доп}}$  – допустимая крутизна фронта по монограммам.

В зависимости от размеров подстанции и номинального напряжения защищенный подход может иметь длину от 300 м до 3 км.

#### 4.5.4. Переходные процессы в обмотках трансформатора при грозовых перенапряжениях

Схема замещения первичной обмотки трансформатора приведена на рис. 4.6, где приняты следующие обозначения:  $L$  – индуктивность витков обмотки;  $K_0$  – емкость изоляции между витками (катушками);  $C_0$  – емкость изоляции витков относительно земли;  $SN$  – разъединитель в нейтрали трансформатора.

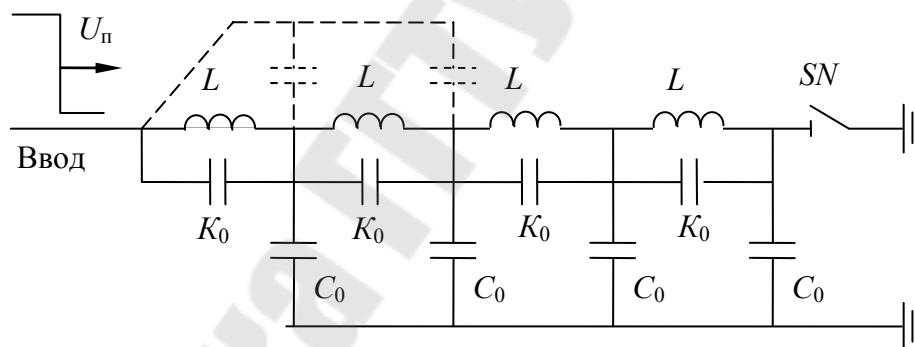


Рис. 4.6. Схема замещения обмотки высокого напряжения трансформатора

Предположим, что на обмотку трансформатора воздействует прямоугольный импульс волны перенапряжения  $U_{\text{п}}$  бесконечной длины. В первый момент времени за счет индуктивности ток в обмотке трансформатора отсутствует, а начальное распределение напряжения по виткам из-за наличия емкостей будет неравномерным (аналогично распределению напряжения по гирлянде подвесных изоляторов) и подчиняется экспоненциальному закону

$$U_{\text{нач}} = U_{\text{п}} e^{-\alpha N(n/N)}, \quad (4.15)$$

где  $\alpha = \sqrt{C_0/K_0}$ ;  $N$  – количество витков в обмотке;  $n$  – номер витка по порядку.

На рис. 4.7 изображены кривые распределения напряжения по виткам при заземленной нейтрали трансформатора (рис. 4.7, а) и при изолированной нейтрали (рис. 4.7, б). Как видно из рисунков начальное распределение напряжения  $U_{\text{нач}}$  в обоих случаях одинаковое и не зависит от режима работы нейтрали.

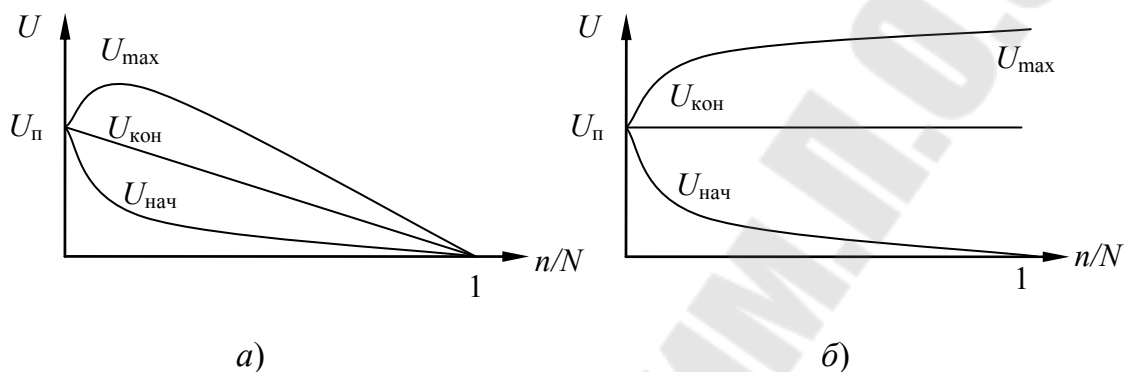


Рис. 4.7. Распределение напряжений по виткам обмотки трансформатора:

а – при заземленной нейтрали; б – при изолированной нейтрали

При бесконечно длинной волне (воздействует постоянное напряжение) токи через емкости не будут проходить и конечное напряжение по виткам  $U_{\text{кон}}$  распределится пропорционально активному току в обмотке. При заземленной нейтрали  $U_{\text{кон}}$  представляет собой наклонную прямую, а при изолированной – горизонтальную.

В промежуточные моменты времени токи будут пропускать и емкости, и индуктивности. Возникнет целый ряд колебательных контуров, а в них – гармонические колебания напряжения на разных частотах. Эти гармоники будут накладываться на конечное напряжение  $U_{\text{кон}}$  и, следовательно, огибающая максимальных потенциалов в каждой точке будет равна

$$U_{\text{max}} = U_{\text{кон}} + \sum U_k, \quad (4.16)$$

где  $U_k$  – текущие значения гармонических колебаний в данный момент времени.

Амплитуды гармонических колебаний определяются по следующим выражениям:



– для трансформатора с заземленной нейтралью

$$A_k = 2U_{\text{п}} / \left\{ k\pi \left[ 1 + \left( \frac{k\pi}{\alpha N} \right)^2 \right] \right\}; \quad (4.17)$$

– для трансформатора с изолированной нейтралью

$$A_k = 3,2U_{\text{п}} / \left\langle (2k-1)\pi \left\{ 1 + \left[ \frac{\pi(2k-1)}{\alpha N} \right]^2 \right\} \right\rangle, \quad (4.18)$$

где  $k$  – порядковый номер гармоники.

При заземленной нейтрали максимальные потенциалы  $U_{\text{max}}$  возникают в первой трети длины обмотки и превышают амплитуду подающей волны примерно на 30 %. При изолированной нейтрали наибольшие перенапряжения возникают в последних витках нейтрали и составляют около  $1,8U_{\text{п}}$ .

Таким образом, трансформаторы напряжением до 35 кВ, работающие в сетях с изолированной нейтралью, должны иметь усиленную изоляцию последних витков, а трансформаторы 110 кВ и выше – наоборот, ослабленную изоляцию нейтрали, но усиленную изоляцию начальных витков. При этом применяют специальные меры для снижения перенапряжений на начальных витках. Рассмотрим подробно эти меры.

Как следует из выражений (4.17) и (4.18), уменьшить амплитуду гармоник можно только за счет уменьшения коэффициента  $\alpha$ . Согласно (4.15), коэффициент  $\alpha$  уменьшается при увеличении межвитковой емкости  $K_0$ . Следовательно, одной из мер снижения напряжения  $U_{\text{max}}$  является переплетения витков или катушек обмотки. В конструкции таких обмоток удаленные по порядковому номеру катушки располагаются рядом или применяются слоевые обмотки. Другой мерой снижения напряжения  $U_{\text{max}}$  для трансформаторов, работающих с заземленной нейтралью, является экранирование первых витков. В качестве экранов применяют разрезные некороткозамкнутые кольца, охватывающие первую треть обмотки и электрически соединенные с электродом ввода трансформатора. При такой конструкции в схеме замещения обмотки появляются дополнительные емкости витков относительно ввода (пунктирные линии на рис. 4.6). Экранирование способствует более равномерному распределению начального напряжения, аналогично распределению напряжения при наличие металлической арматуры в гирлянде подвесных изоляторов [4, лаборатор. работа № 4].

#### 4.5.5. Защита разземленной нейтрали трансформатора

В сетях 110–220 кВ, работающих с заземленной нейтралью, нейтрали некоторых трансформаторов (по усмотрению энергодиспетчера) могут быть временно или постоянно разземлены с целью уменьшения токов однофазного КЗ. Нейтрали таких трансформаторов имеют ослабленную изоляцию, поэтому для ее защиты включают вентильный разрядник или ограничитель перенапряжений (ОПН) параллельно заземляющему разъединителю  $SN$  (рис. 4.8).

Разрядник  $FV$  в нейтрали выбирают с классом напряжения примерно в два раза меньше номинального напряжения трансформатора. Особое внимание при этом обращают на напряжение гашения разрядника  $U_{\text{гаш}}$ . Оно должно быть больше напряжения смещения нейтрали трансформатора при однофазных КЗ.

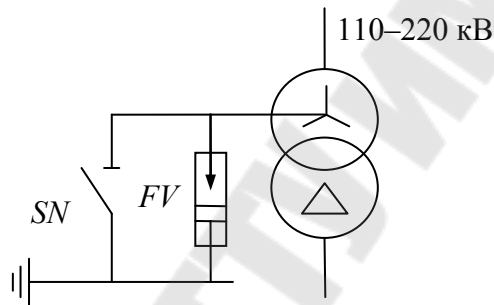


Рис. 4.8. Схема защиты разземленной нейтрали трансформатора

Для трансформаторов 220 кВ разрядник в нейтрали применяют с номинальным напряжением 110 кВ (РВС-110). Для трансформаторов 110 кВ требуется иметь разрядник с  $U_{\text{гаш}} = 50$  кВ. Этому условию удовлетворяют два последовательно включенных разрядника типа РВС-20. ОПН имеют более широкую номенклатуру выбора.

В нейтрали трансформаторов, изоляция которых не допускает разземления, установка разъединителя не допускается. К ним относятся все трансформаторы и автотрансформаторы напряжением 330 кВ и выше, а также некоторые трансформаторы меньшего напряжения, у которых все обмотки выполнены с ослабленной изоляцией.

#### 4.5.6. Защита разомкнутых обмоток низкого напряжения трансформаторов

В процессе эксплуатации обмотки низкого напряжения (НН) или среднего напряжения (СН) трансформаторов могут быть отклю-

чены от нагрузки на длительное время. Схема замещения трансформатора с разомкнутой обмоткой НН приведена на рис. 4.9.

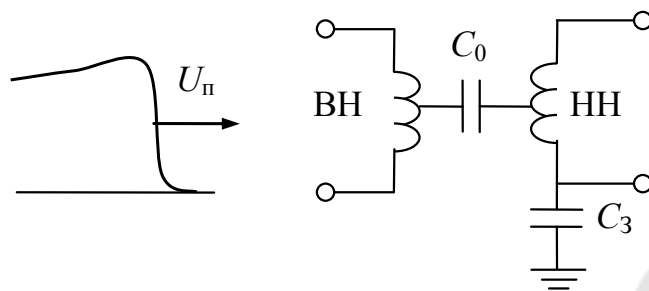


Рис. 4.9. Схема замещения разомкнутой обмотки низкого напряжения трансформатора

При падении волны с крутым фронтом на обмотку высокого напряжения (ВН) трансформатора, на обмотке НН могут возникнуть опасные перенапряжения за счет емкостной связи между обмотками ВН и НН. При этом напряжение на обмотке НН определяется по формуле

$$U_{п.НН} = U_{п.ВН} C_0 / (C_0 + C_3),$$

где  $C_0$  – входная емкость трансформатора;  $C_3$  – емкость обмотки НН относительно земли.

Отношение  $(C_0 + C_3)/C_0$ , как правило, значительно меньше коэффициента трансформации трансформатора и, следовательно, наведенное напряжение  $U_{п.НН}$  превышает уровень изоляции обмотки НН. Для предупреждения пробоя к обмоткам НН и СН трансформатора должны быть постоянно подключены разрядники или ОПН с классом напряжения, соответствующим номинальным напряжениям этих обмоток.

Защита разомкнутой обмотки НН не требуется, если к ней постоянно подключена кабельная вставка длиной не менее 30 м. В этом случае суммарная емкость кабеля и обмотки НН относительно земли  $C_3$  значительно превосходит входную емкость  $C_0$  и наведенные перенапряжения снижаются до безопасного уровня.

#### 4.5.7. Грозозащита комплектных подстанций и распределительных устройств

Комплектные трансформаторные подстанции (КТП) имеют небольшие размеры и, как правило, подключаются к линиям с помощью отпаек. Защита КТП от набегающих волн перенапряжений выполняется так же, как и защита больших подстанций с помощью разрядников и защищенного подхода, но длина защищенного подхода в этом

случае небольшая 150–200 м, что составляет 1 или 2 пролета линии. Кроме того, на таком же расстоянии от подхода устанавливают еще один комплект трубчатых разрядников (рис. 4.10).

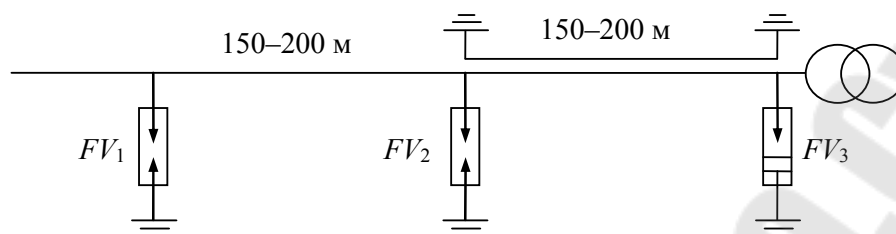


Рис. 4.10. Схема защищенного подхода КТП

Защита от прямых ударов молнии в этом случае не требуется, так как трансформатор КТП располагается в зоне действия тросового молниеотвода линии.

Для защиты распределительных устройств (РУ) напряжением 3–10 кВ достаточно установить один комплект трубчатых разрядников на расстоянии 150–200 м от РУ. Это объясняется низкой импульсной прочностью изоляторов линий 3–10 кВ, которые сами ограничивают максимальные значения грозовых перенапряжений.

Исследования последних лет показали, что экономически выгодно на подстанциях и на подходах применять ОПН вместо трубчатых разрядников. Графическое условное изображение ОПН показано на рис. 4.11.

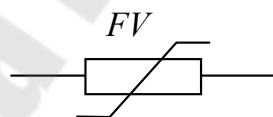


Рис. 4.11. Условное изображение ОПН

До 10–15 % грозовых отключений линий приходится на повреждения трубчатых разрядников из-за неправильной их установки, заполнения дождевой водой, разрушения вследствие динамических ударов при протекании больших импульсных токов молнии, необходимости перекалибровки после большого числа срабатываний и т. п.

#### 4.5.8. Грозозащита электрических машин, подключенных к воздушным линиям

К воздушным линиям непосредственно без трансформаторов разрешается подключать электрические машины мощностью до 50 МВт,

к линиям на деревянных опорах – до 25 МВт. По сравнению с трансформатором генераторы и электродвигатели напряжением 3–10 кВ имеют меньший запас электрической прочности изоляции, поэтому защита от набегающих волн перенапряжения имеет следующую особенность.

Значения импульсного тока вентильного разрядника или ОПН должна быть ограничена до 1,5 кА, а крутизна фронта падающей волны – до 1–2 кВ/мкс. Для глубокого ограничения крутизны фронта и исключения гармонических колебаний в обмотках статора машины, параллельно разряднику включают высоковольтные конденсаторы емкостью 0,2–0,5 мкФ на фазу. Воздушный подход линии длиной 500–600 м защищают отдельно стоящими стержневыми молниеотводами и двумя комплектами трубчатых разрядников или ОПН. Подвешивать грозозащитный трос на линиях 3–10 кВ бесполезно, так как при ударе молнии в трос или опору происходит обратное перекрытие воздушных промежутков трос – провод или опора – провод в виду их малого расстояния. Вместо стержневых молниеотводов более эффективно применить короткую кабельную вставку длиной не менее 100 м.

Схема такой грозозащиты приведена на рис. 4.12.

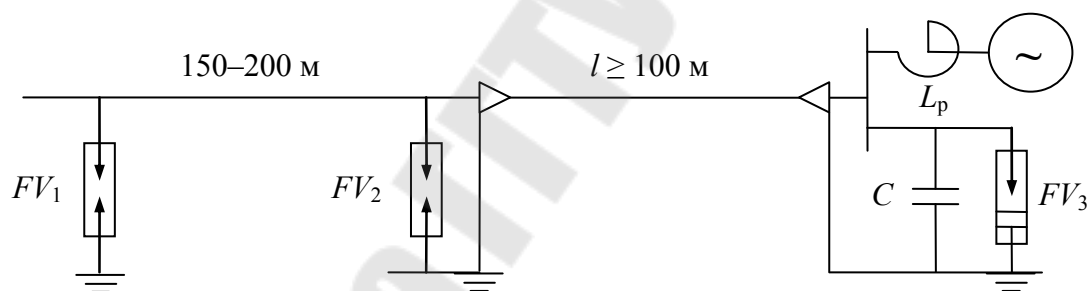


Рис. 4.12. Схема грозозащиты электрической машины, подключенной к воздушной линии

Металлическая оболочка кабеля должна быть с двух сторон соединена с заземлителями разрядников  $FV_2$  и  $FV_3$ . В этом случае большая часть импульсного тока набегающей волны ответвляется в оболочку кабеля за счет поверхностного эффекта.

Для машин большой мощности рекомендуется также включать токоограничивающий реактор между машиной и шинами. Индуктивность реактора  $L_p$  в этом случае уменьшает крутизну фронта падающей волны на обмотки машины и повышает напряжение на шинах, что способствует ускоренному срабатыванию разрядника  $FV_3$ .

## Контрольные вопросы

1. Как развивается электрический разряд молнии между облаком и землей? Какие вы знаете количественные характеристики молнии?
2. Как определяются зоны защиты стержневых и тросовых молниеотводов?
3. Чем характеризуется грозозащитное заземление?
4. Как определяется удельное число грозовых отключений линий?
5. Как определить вероятность импульсного перекрытия изоляции линии при ударах молнии в провод или опору линии?
6. Что такое защитный уровень изоляции линии, и у какой из линий он больше: линии 35 кВ, линии 110 кВ, линии на железобетонных или деревянных опорах?
7. Что делают, если число грозовых отключений данной линии превышает допустимое?
8. Как происходит обратное перекрытие изоляции подстанции при прямых ударах молнии?
9. Какими устройствами защищается изоляция подстанции от набегающих волн грозовых перенапряжений?
10. Как ограничить импульсный ток разрядника и крутизну фронта падающей волны?
11. Что такое защищенный подход линии и для чего он нужен?
12. Объясните, как протекают переходные процессы в обмотках трансформатора при импульсных перенапряжениях.
13. Какие способы применяют для ограничения перенапряжений на продольной (межвитковой) изоляции трансформаторов?
14. Как защищают разземленную нейтраль трансформатора 110 кВ?
15. По какому пути проникают падающие волны грозовых перенапряжений во вторичную обмотку низкого напряжения трансформатора?
16. В чем особенность грозозащиты комплектных подстанций?
17. Как защищают изоляцию электрической машины при ее подключении к воздушной линии?

## 5. ВНУТРЕННИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

### 5.1. Общая характеристика внутренних перенапряжений

Термином «внутренние» как бы подчеркивается, что перенапряжения эти не зависят от внешних атмосферных явлений.

Все внутренние перенапряжения разделяются на два вида:

- 1) установившиеся перенапряжения резонансного характера, длящиеся неограниченное время (квазистационарные);
- 2) коммутационные перенапряжения, существующие короткое время, т. е. на время переходного процесса.

Установившиеся перенапряжения обусловлены тремя причинами:

- емкостным эффектом в длинных линиях;
- несимметричными короткими замыканиями;
- феррорезонансными явлениями при неполнофазных режимах.

Коммутационные перенапряжения возникают при различных коммутациях выключателей: оперативное включение или отключение от релейной защиты, автоматическое повторное включение и т. п.

В особую группу коммутационных перенапряжений относят дуговые перенапряжения, которые вызваны повторными зажиганиями дуги в выключателях или при замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью.

Наибольшую опасность представляют наложенные перенапряжения, т. е. когда на перенапряжения установившегося режима накладываются коммутационные перенапряжения. Максимальные перенапряжения при этом характеризуются следующим выражением:

$$U_{\max} = K_{\text{уд}} U_{\text{уст}} = K_{\text{уд}} K_{\text{уст}} U_{\phi} = K_{\text{п}} U_{\phi}, \quad (5.1)$$

где  $K_{\text{уд}}$  – ударный коэффициент, характеризующий коммутационные перенапряжения;  $K_{\text{уст}}$  – коэффициент превышения установившегося перенапряжения ( $U_{\text{уст}}$ ) над номинальным фазным напряжением сети ( $U_{\phi}$ );  $K_{\text{п}} = K_{\text{уд}} K_{\text{уст}}$  – кратность внутренних перенапряжений.

В таблице 5.1 приведены допустимые кратности внутренних перенапряжений в электроустановках различного номинального напряжения.

## Допустимые кратности внутренних перенапряжений

$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	$K_{\text{п.доп}}$
3–10	4,5
35	3,5
110–220	3,0
330	2,7
500	2,5
750	2,1
1150	1,8

В установках сверхвысокого напряжения (330 кВ и выше), как правило, фактическая кратность перенапряжений  $K_{\text{п}}$  превышает допустимую ( $K_{\text{п.доп}}$ ). Поэтому на линиях СВН применяются специальные устройства для ограничения внутренних перенапряжений, такие как шунтирующие реакторы, коммутационные разрядники и т. п.

## 5.2. Перенапряжения установившегося режима

### 5.2.1. Перенапряжения за счет емкостного эффекта

Емкостной эффект (Феранти-эффект) в длинных линиях проявляется при работе линии на холостом ходу, когда нагрузка в конце линии отключена.

Любая линия обладает распределенными удельными индуктивностью  $L'$  и емкостью  $C'$  (рис. 5.1).

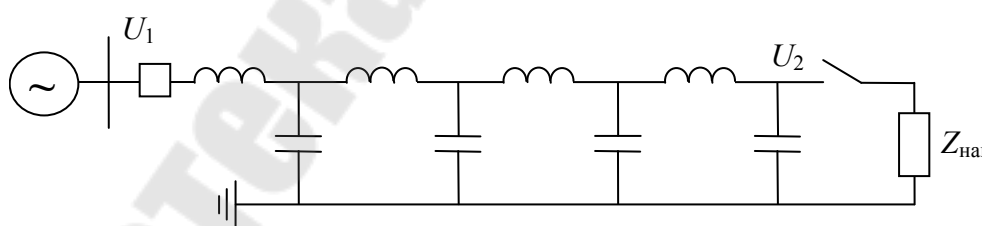


Рис. 5.1. Схема замещения разомкнутой линии

При отключении нагрузки  $Z_{\text{наг}}$  в контурах  $LC$  возникают колебательные процессы, которые накладываются на напряжение питания и повышают напряжение в конце линии. Отношение напряжений в конце линии к началу линии называется коэффициентом передачи напряжения. Для холостой линии без потерь этот коэффициент определяется по формуле



$$K_{\text{н}} = U_2/U_1 = 1/(\cos\beta \cdot l), \quad (5.2)$$

где  $\beta = \omega\sqrt{L'C'}$  – угол изменения фазы напряжения на единицу длины линии;  $\beta \approx 6^\circ$  на 100 км длины линии  $l$ .

При  $l = 1500$  км  $\beta \cdot l = 90^\circ$  и  $K_{\text{н}} = \infty$ , т. е. наступает резонанс напряжения на частоте 50 Гц. При резонансе напряжение в конце линии, работающей без потерь, стремится к бесконечности. Однако за счет активного сопротивления линии и источника питания  $R'$  гармонические колебания затухают и в этом случае

$$U_2 = QU_1,$$

где  $Q = \omega L'/R'$  – добротность линии, значение которой обычно равно  $Q = 10\text{--}15$ .

Реальные перенапряжения при резонансе еще меньше за счет возникновения коронного разряда на проводах и в связи с этим увеличением емкости линии. Вследствие этого перенапряжения емкостного эффекта составляют  $U_{\text{уст}} = (3\text{--}3,5)U_{\text{ф}}$  при длине линии 1200–1300 км.

С уменьшением длины линии емкостные перенапряжения монотонно уменьшаются. Для линий напряжением до 220 кВ, имеющие длины не более 300 км, такие перенапряжения составляют  $1,1\text{--}1,2U_{\text{ф}}$ , что неопасно для изоляции. Однако на линиях СВН перенапряжения за счет емкостного эффекта, как правило, превышают допустимый уровень. Отметим, что расщепленные провода на линиях СВН обладают большой емкостью относительно земли.

Основной мерой ограничения таких перенапряжений является применения на длинных линиях компенсирующих устройств. Для компенсации емкости параллельно ей включают шунтирующие реакторы  $L_{\text{р}}$ , а для компенсации индуктивности – устройства продольной компенсации (УПК) в виде последовательно включенных с линией конденсаторов. Типовая схема дальней электропередачи напряжением 750 кВ приведена на рис. 5.2.

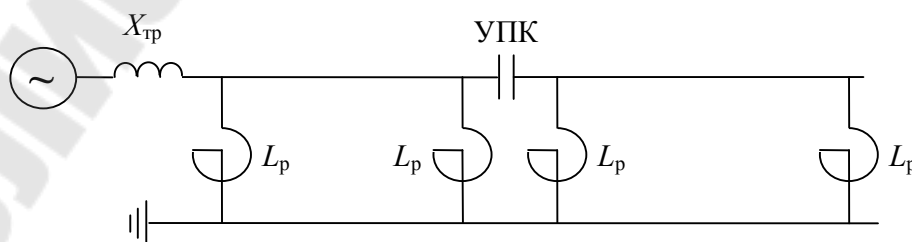


Рис. 5.2. Типовая схема дальней электропередачи напряжением 750 кВ

Выбор мощности и места установки компенсирующих устройств производится не только по условию ограничения емкостных перенапряжений, но и для выравнивания напряжения вдоль линии при включенной нагрузке, а также для увеличения ее пропускной способности.

### 5.2.2. Перенапряжения при несимметричных коротких замыканиях на землю

При однофазном замыкании на землю в электрической сети повышаются напряжения в здоровых фазах относительно земли. Это объясняется наложением на симметричный режим составляющих напряжения нулевой последовательности  $U_0$ . Векторная диаграмма напряжения при замыкании на землю фазы  $A$  приведена на рис. 5.3.

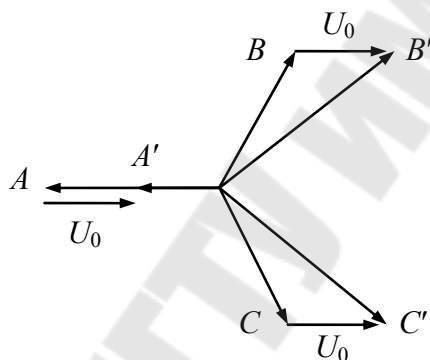


Рис. 5.3. Векторная диаграмма напряжения при однофазном коротком замыкании фазы  $A$

Напряжение на здоровых фазах определяется по выражению

$$U'_B = U'_C = U_\phi \sqrt{\left[ \frac{3m}{2(m+2)} \right]^2 + \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \right)^2}, \quad (5.3)$$

где  $m = Z_0/Z_1$  – отношение сопротивлений соответственно нулевой и прямой последовательностей в сети.

В сетях с заземленной нейтралью 110 кВ и выше значение  $m \approx 3$ , тогда  $U'_B = U'_C = 1,3U_\phi$  или  $U_{уст} = 1,3U_\phi$ . В сетях изолированной нейтралью 6–35 кВ значение  $m$  стремится к бесконечности и  $U'_B = U'_C = \sqrt{3} \cdot U_\phi$ , т. е. равны линейному напряжению относительно земли.

Перенапряжения за счет несимметрии на линиях до 220 кВ не превышают допустимого значения. На линиях СВН может возникнуть режим однофазного КЗ на землю на холостой линии. В этом случае в здоровых фазах на перенапряжения емкостного эффекта накладываются перенапряжения за счет несимметрии до 30 %. Учитывая это обстоятельство, число шунтирующих реакторов, постоянно подключенных к линии, увеличивают. Забегая вперед, отметим, что на линиях СВН помимо постоянно подключенных к линии реакторов, несколько шунтирующих реакторов нормально отключены. Они мгновенно подключаются к линии во время переходного процесса. В этой связи суммарная мощность шунтирующих реакторов на линиях СВН почти равна натуральной мощности электропередачи.

### 5.2.3. Феррорезонансные перенапряжения в электрических сетях

Феррорезонансные перенапряжения в сетях возникают при неполнофазных режимах и при работе приемного трансформатора на холостом ходу или с малой нагрузкой.

Рассмотрим трехфазную сеть и ее схему замещения, в которой произошел обрыв одного провода с заземлением его со стороны источника питания (рис. 5.4). При данном неполнофазном режиме появляется замкнутая цепь, состоящая из последовательно включенных активного сопротивления  $R$ , емкости поврежденного провода относительно земли  $C_0$  и нелинейной индуктивности ветви намагничивания приемного трансформатора  $L_\mu$ .

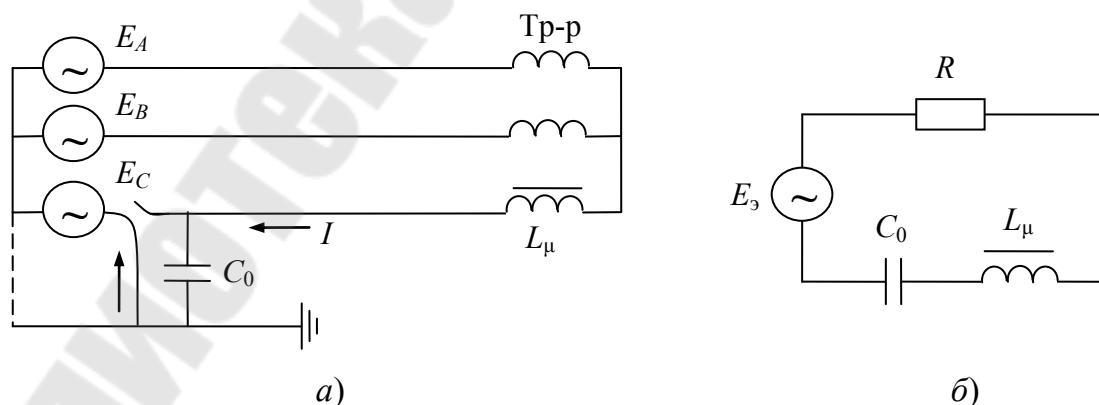


Рис. 5.4. Неполнофазный режим в сети и его схема замещения

При переменном напряжении справедливо равенство

$$E_3 = \sqrt{(U_L - U_C)^2 + U_R^2}.$$

Решив данное уравнение относительно  $U_L$ , получим:

$$U_L = U_C \pm \sqrt{E_3^2 - U_R^2}. \quad (5.4)$$

Построим график (рис. 5.5) и нанесем на нем вольт-амперную характеристику нелинейной индуктивности  $U_L(I)$ .

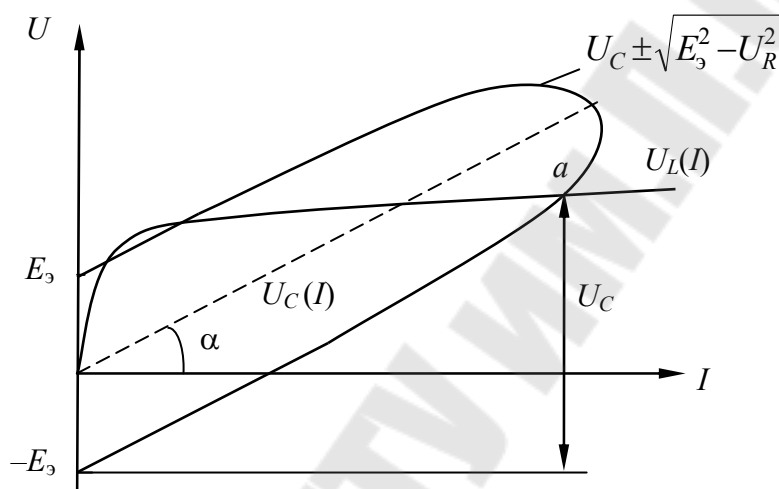


Рис. 5.5. Вольт-амперные характеристики элементов схемы по рис. 5.4

Правая часть выражения (5.4) представляет собой эллипс. Угол наклона эллипса зависит от величины емкости  $\operatorname{tg} \alpha = 1/(\omega C_0) \operatorname{tg}$ .

Длина большой полуоси эллипса зависит от величины активного сопротивления и равна  $E_3/R$ . При малом значении  $R$  эллипс пересекается с вольт-амперной характеристикой нелинейной индуктивности. Ордината от точки пересечения «а» до  $-E_3$  определяет величину напряжения на емкости линии при феррорезонансе. Значение этого напряжения может достигать 3–4-кратного фазного напряжения линии  $U_{\text{уст}} = (3-4)U_\phi$ . Наибольшее перенапряжение возникает в сетях с изолированной нейтралью. При заземленной нейтрали источника питания, как показано на рис. 5.4, а пунктирной линией, феррорезонанс наступает при обрыве провода без его заземления. В этом случае эквивалентная ЭДС ( $E_3$ ) в схеме замещения уменьшается и перенапряжение при феррорезонансе не превышает  $U_{\text{уст}} = (2,5-2,7)U_\phi$ .

В случае, если приемный трансформатор будет загружен хотя бы на 25 %, то при неполнофазном режиме феррорезонанс не наступит. Включение нагрузки равносильно тому, что в схеме замещения увеличивается активное сопротивление  $R$  и при некотором его значении большая полуось эллипса уменьшится настолько, что он не будет пересекаться с вольт-амперной характеристикой нелинейной индуктивности.

В обоих случаях мы рассматривали приемный трансформатор, работающий с изолированной нейтралью. В случае ее заземления при неполнофазном режиме так же могут возникнуть феррорезонансные перенапряжения до  $U_{уст} = 2U_{\phi}$ . При этом виде феррорезонанса на поврежденном проводе наводится ЭДС через междуфазовые емкости  $C_{м.ф}$  (на схеме они не показаны) и за счет обратной трансформации напряжения с вторичной обмотки трансформатора, соединенной по схеме треугольник. По треугольнику проходят токи нулевой последовательности по всем трем фазам вторичной обмотки. Один из этих токов за счет обратной трансформации наводит ЭДС в оборванном проводе.

Более подробно теория феррорезонансных перенапряжений изложена в [4, лаборатор. работа № 5].

### **5.3. Коммутационные перенапряжения**

Коммутационные перенапряжения сопровождаются переходными процессами в момент включения или отключения выключателя и характеризуются ударным коэффициентом  $K_{уд} = U_{max} / U_{уст}$ .

Существуют шесть основных видов коммутационных перенапряжений. Рассмотрим их по порядку.

#### **5.3.1. Перенапряжения при включении разомкнутой линии**

Любая линия обладает распределенными емкостью и индуктивностью и потенциально обладает колебательными свойствами (см. рис. 5.1). При включении холостой линии под напряжение в первый момент не все распределенные индуктивности пропускают ток. С течением времени увеличивается число подключенных к линии  $LC$  контуров, а в них возникают гармонические колебания напряжения на различных частотах. Максимальные перенапряжения появляются в тот момент времени, когда с амплитудой установившегося напряже-

ния совпадают амплитуды отдельных составляющих гармонических колебаний. Тогда без учета затуханий

$$U_{\max} = A_{\text{уст}} + A_1 + A_2,$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – амплитуды первой и второй гармоник.

Однако такое совпадение происходит не в первый момент после включения линии, а по истечении некоторого времени. Чем больше время запаздывания таких совпадений, тем больше будет сказываться эффект затухания. Характер изменения напряжения на линии при ее включении показан на рис. 5.6.

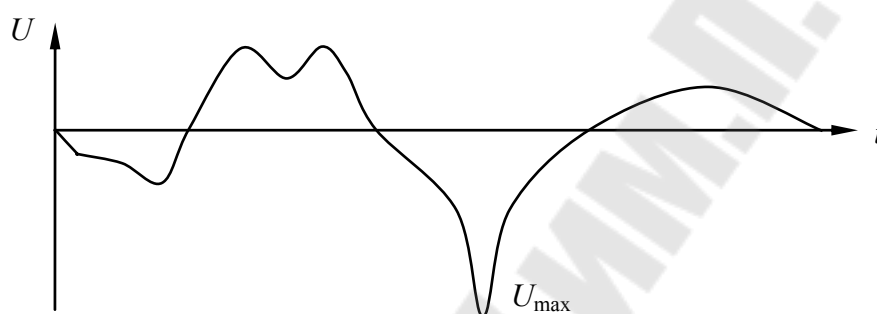


Рис. 5.6. Форма напряжения при включении разомкнутой линии

На величину  $U_{\max}$  сильно влияет фаза питающего напряжения в момент включения выключателя. Наибольшие перенапряжения появляются при включении выключателя в момент амплитуды питающего напряжения. Таким образом, величина  $K_{\text{уд}}$  носит статистический, вероятностный, характер. Максимальное значение  $K_{\text{уд}} \approx 2$  появляется с вероятностью 0,023.

На линиях СВН необходимо учитывать, что установившиеся перенапряжения  $U_{\text{уст}}$  превышают напряжение источника питания за счет емкостного эффекта. Следовательно, такие коммутационные перенапряжения практически всегда опасны для изоляции линий СВН и требуют применения специальных мер для их ограничения.

### 5.3.2. Перенапряжения при автоматическом повторном включении выключателя (АПВ)

Рассмотрим цикл АПВ на линии при однофазном КЗ в точке  $K$  вблизи выключателя  $Q_1$  (рис. 5.7).

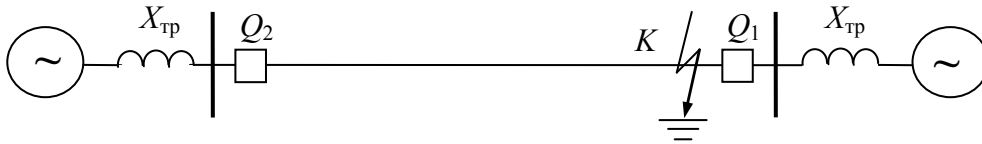


Рис. 5.7. Схема замещения линии при однофазном коротком замыкании

Первым от релейной защиты отключится ближайший к месту КЗ выключатель  $Q_1$  и в здоровых фазах на линии появятся перенапряжения за счет емкостного эффекта и несимметрии. После отключения КЗ выключателем  $Q_2$  емкость проводов здоровых фаз окажется заряженной до напряжения в общем случае больше напряжения источника питания. В течение паузы АПВ ( $t_{\text{АПВ}} = 0,5 \text{ с}$ ) этот заряд уменьшится на 30–40 % за счет токов утечки.

В момент включения выключателя  $Q_2$  от автоматики АПВ наибольшее перенапряжение появится в том случае, если знак заряда линии и знак питающего переменного напряжения в момент включения  $Q_2$  имеют противоположные значения. При этом возникает сложный переходной процесс, состоящий из двух процессов: разряд заряженной линии через источник питания, обладающего индуктивностью, и включение разомкнутой линии под напряжение (п. 5.3.1). Ударный коэффициент при этом носит статистический характер, и максимальное его значение составляет  $K_{\text{уд}} = 2-2,5$  для линий до 220 кВ и  $K_{\text{уд}} = 2,5-3$  для линий СВН.

Меры ограничения таких перенапряжений направлены на снижение остаточного заряда линии в период паузы АПВ. Для этой цели на линиях до 220 кВ можно применить выносной измерительный трансформатор напряжения (ТН). В этом случае остаточный заряд линии стекает через активное сопротивление ТН. Для линий СВН такой способ не подходит, так как заряженная емкость линии и шунтирующие реакторы образуют колебательный контур и в период паузы АПВ в линии происходят собственные колебания напряжения с частотой около 45 Гц. Для такой частоты ТН обладает большим сопротивлением, и разряда емкости не происходит. На контактах выключателя  $Q_2$  при этом появляется напряжение биения с частотой  $50-45 = 5 \text{ Гц}$  и если выключатель включится в максимум напряжения биения, то и  $K_{\text{уд}}$  достигнет наибольшего значения.

### 5.3.3. Перенапряжения при отключении трехфазного короткого замыкания

На рис. 5.8 изображен фрагмент схемы сети с трехфазным КЗ вблизи выключателя  $Q_1$  и диаграмма напряжения в конце линии  $W_1$  до и после отключения этого выключателя.

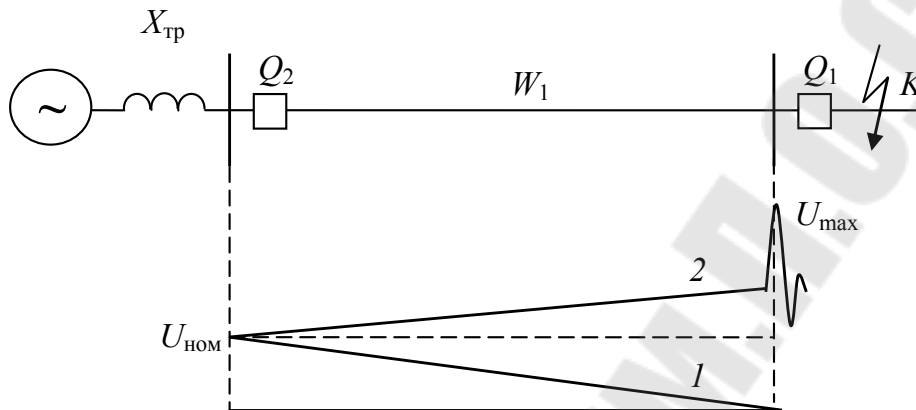


Рис. 5.8. Схема замещения линии при трехфазном коротком замыкании

В момент трехфазного короткого замыкания напряжение в конце линии снижается до нуля (кривая 1). После отключения выключателя  $Q_1$  это напряжение в установившемся режиме будет больше напряжения источника питания  $U_{ном}$  за счет емкостного эффекта (кривая 2).

Установившемуся режиму предшествует переходной процесс, который обусловлен тем, что напряжение в конце линии скачком переходит из одного режима  $U_{W_1} = 0$  в другой режим  $U_{W_1} = U_{уст}$ . Ударный коэффициент переходного процесса достигает  $K_{уд} = 1,9$  и возникающие при этом максимальные перенапряжения  $U_{max}$  представляют опасность для изоляции линий СВН.

Аналогично этому виду перенапряжения, существует вероятность одновременного срабатывания релейной защиты по концам линии при качаниях в энергосистеме. В этом случае кривая 1 в конце линии проходит не через нуль, а через точку с напряжением противоположного знака ( $-U_{ном}$ ). Однако перенапряжения такого рода чрезвычайно редкие, так как релейная защита в режиме качаний не должна срабатывать.



### 5.3.4. Перенапряжения при отключении однофазного короткого замыкания на землю

Рассмотрим схему линии с коротким замыканием на землю в точке  $K$  фазы  $A$  (см. рис. 5.7 в п. 5.3.2).

Векторная диаграмма напряжения в конце линии (в точке  $K$ ) до отключения выключателя  $Q_1$  и после его отключения от релейной защиты приведена на рис. 5.9.

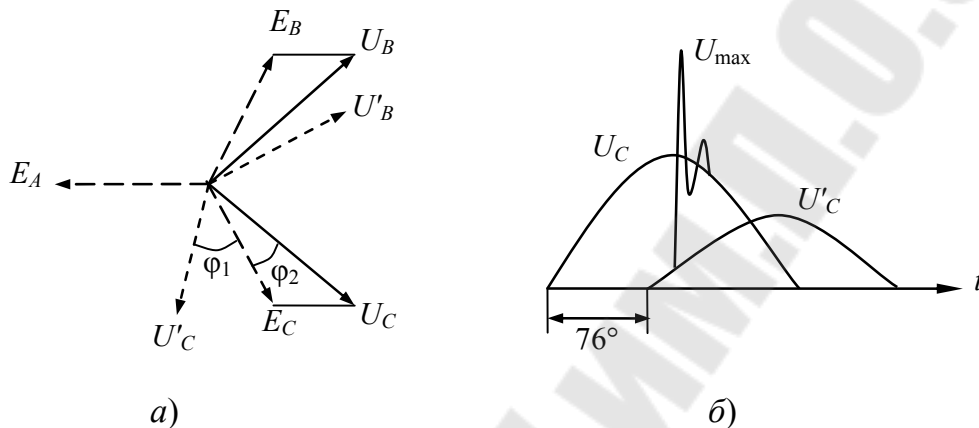


Рис. 5.9. Диаграммы напряжения при отключении однофазного короткого замыкания

На данном рисунке обозначены следующие векторы напряжений:  
 $E_A, E_B, E_C$  – симметричная звезда источника питания;  
 $U'_B, U'_C$  – напряжения на неповрежденных фазах до отключения выключателя  $Q_1$ ;  
 $U_B, U_C$  – то же после отключения выключателя  $Q_1$ ;  
 $\varphi_1$  – угол сдвига фазы напряжения в начале и в конце линии в нормальном режиме работы линии под нагрузкой ( $\varphi_1 \approx 60^\circ$ );  
 $\varphi_2$  – угол, характеризующий сдвиг фазы напряжения при несимметрии ( $\varphi_2 \approx 60^\circ$ ).

Как видно из диаграммы после отключения короткого замыкания в неповрежденных фазах, например в фазе  $C$ , скачком изменяется не только амплитуда, но и фаза напряжения, что и обуславливает переходной процесс с ударным коэффициентом  $K_{уд} = 1,4-1,6$ . Учитывая установившееся перенапряжение за счет несимметрии ( $K_{уст} = 1,3U_\phi$ ), максимальные перенапряжения в этом случае могут превышать двух кратных величин.

### 5.3.5. Перенапряжения при отключении индуктивности

На рис. 5.10 изображена схема замещения цепи отключения выключателем  $Q$  ненагруженного трансформатора, обладающего индуктивностью намагничивания  $L$  и емкостью  $C$  изоляции и ошиновки.

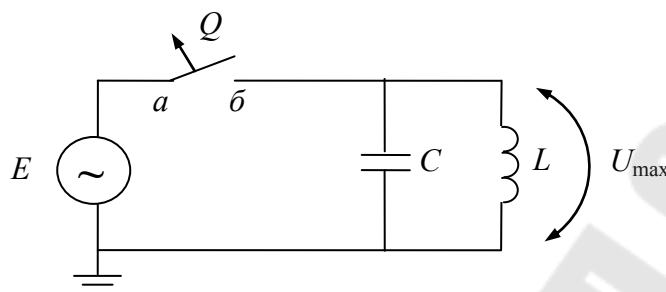


Рис. 5.10. Схема замещения процесса отключения индуктивности

При отключении трансформатора, работающего без нагрузки, происходит так называемый «срез тока», т. е. дуга между контактами выключателя гаснет раньше, чем ток проходит через нулевое значение. В масляных выключателях срез тока наблюдается при отключении токов менее 10 А. В вакуумных выключателях – при значительно больших токах и даже при отключении нагруженного трансформатора или электродвигателя.

При срезе тока в индуктивности и емкости была накоплена электрическая энергия, которая в контуре  $LC$  создает собственные затухающие колебания напряжения с частотой  $\omega' = 1/\sqrt{LC}$ . Периодически с частотой  $\omega'$  происходит перекачка энергии с индуктивности в емкость и наоборот.

Исходя из баланса энергии без учета потерь, имеем:

$$\frac{CU_0^2}{2} + \frac{LI_0^2}{2} = \frac{CU_{\max}^2}{2},$$

где  $I_0$  – значение тока в индуктивности в момент среза;  $U_0$  – напряжение на емкости в момент среза.

Отсюда максимальная амплитуда собственных колебаний составит

$$U_{\max} = \sqrt{U_0^2 + \frac{I_0^2 L}{C}}.$$

Так как значение  $C$  намного меньше  $L$ , то  $U_{\max}$  во много раз превышает номинальное напряжение. Такое же явление повышения

напряжения наблюдается при внезапном разрыве тока в индуктивности вследствие ЭДС самоиндукции.

В действительности, напряжение на изоляции трансформатора не достигает максимальных значений за счет повторных зажиганий дуги между расходящимися контактами  $a$  и  $b$  выключателя  $Q$ . На контакты выключателя воздействует напряжение  $U_{\max} - E$ , так называемое восстанавливающееся напряжение. Если восстанавливающееся напряжение окажется больше электрической прочности еще не полностью разошедшихся контактов, то происходит первое повторное зажигание дуги. Напряжение на трансформаторе при этом становится равным номинальному значению, и снова происходит срез тока, а затем второе повторное зажигание дуги. И так будет продолжаться до тех пор, пока восстанавливающееся напряжение не станет меньше электрической прочности расходящихся контактов выключателя.

Очевидно, что предельное перенапряжение определяется равенством

$$U_{\text{м.пред}} = U_{\text{пр max}} + E,$$

где  $U_{\text{пр max}}$  – максимальное пробивное напряжение полностью разошедшихся контактов выключателя.

При использовании масляных выключателей, у которых процесс нарастания электрической прочности контактов происходит достаточно медленно, а ток среза при повторных зажиганиях дуги достигает нулевого значения значительно быстрее, перенапряжения предельного значения не достигают. Однако при использовании вакуумных выключателей такие перенапряжения могут достигать семикратных значений фазного напряжения. Поэтому в типовых ячейках КРУ с вакуумными выключателями обязательно устанавливают ограничители перенапряжений ОПН. При этом виде перенапряжений ОПН рассеивает небольшую энергию, поскольку длительность процесса повторных зажиганий дуги меньше полупериода промышленной частоты.

### 5.3.6. Перенапряжения при отключении емкости

Рассмотрим случай отключения выключателем  $Q$  емкости, например, батареи статических конденсаторов или длинной холостой линии (рис. 5.11).

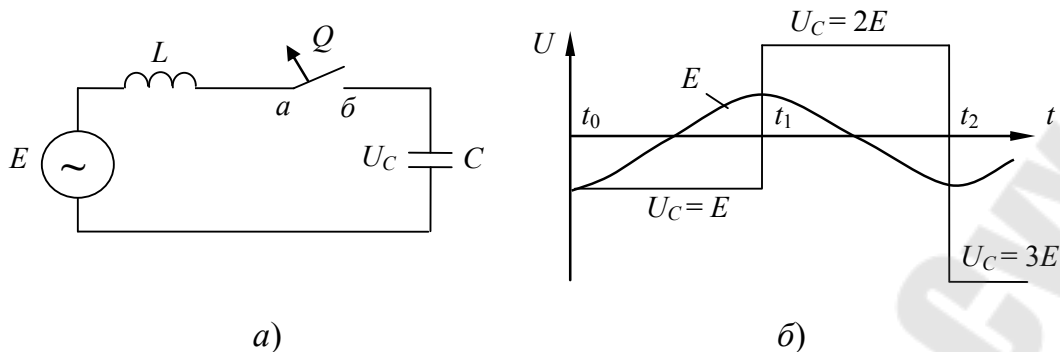


Рис. 5.11. Схема замещения процесса отключения емкости

При отключении достаточно большого емкостного тока среза тока в выключателе не происходит, и дуга гаснет при естественном прохождении тока через нулевое значение.

Поскольку вектор напряжения на емкости  $C$  отстает от емкостного тока на  $90^\circ$ , то в момент отключения выключателя при  $I_C = 0$  емкость будет заряжена до амплитудного значения напряжения источника питания  $E$  (момент времени  $t_0$ ). Через полпериода в момент времени  $t_1$  источник поменяет знак напряжения, и к расходящимся контактам выключателя будет приложено удвоенное напряжение  $2E$ . Происходит первое повторное зажигание дуги между контактами  $a$  и  $b$ . При этом возникает переходной процесс перезаряда емкости  $C$  через источник питания, обладающего индуктивностью  $L$ . В контуре  $LC$  возникают собственные высокочастотные гармонические колебания разрядного тока и при прохождении его через нулевое значение дуга в выключателе снова гаснет. Дуга при этом горит практически в течение доли миллисекунды. Как и в первом случае  $t_0$  при гашении дуги емкость остается заряженной до напряжения  $2E$ , но с противоположным знаком. Через полпериода в момент  $t_2$  восстанавливающееся напряжение на контактах выключателя достигнет значения  $3E$  и произойдет второе повторное зажигание дуги. Переходной процесс повторяется, дуга гаснет, и напряжение на емкости станет равным  $3E$ . Таким образом нарастание напряжения будет продолжаться до тех пор, пока электрическая прочность расходящихся контактов не превысит восстанавливающегося напряжения.

Для ограничения опасного повышения напряжения одной из мер является применение быстродействующего выключателя, у которого через  $20$  мс (один период) после начала расхождения контактов электрическая прочность промежутка  $a$ – $b$  возрастает более  $3U_{\phi \max}$ . Такой

скоростью отключения обладают вакуумные и малогабаритные элегазовые выключатели.

Другой мерой ограничения таких перенапряжений является постоянное подключение параллельно конденсатору разрядного сопротивления или трансформатора напряжения (ТН). В этом случае в паузе между повторными зажиганиями дуги остаточный заряд емкости снижается за счет токов утечки через разрядное сопротивление или активное сопротивление ТН и очередного повторного зажигания дуги не происходит.

Ограничивать такие перенапряжения с помощью вентильных разрядников или ОПН не рекомендуется, поскольку величина и длительность разрядного тока большой по величине емкости может привести к тепловому разрушению разрядников.

#### 5.4. Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью

Этот вид перенапряжений по продолжительности можно отнести к установившимся перенапряжениям, но причина их возникновения вызвана частой коммутацией (прерыванием) дуги в месте замыкания сети на землю.

В сетях 6–35 кВ, работающих с изолированной нейтралью, при однофазных замыканиях на землю короткого замыкания не происходит. По линиям протекают небольшие по величине емкостные токи и на приемниках такой режим никак не сказывается. Согласно Правилам (ПУЭ), линию с поврежденной изоляцией разрешается не отключать в течение двух часов (рис. 5.12).

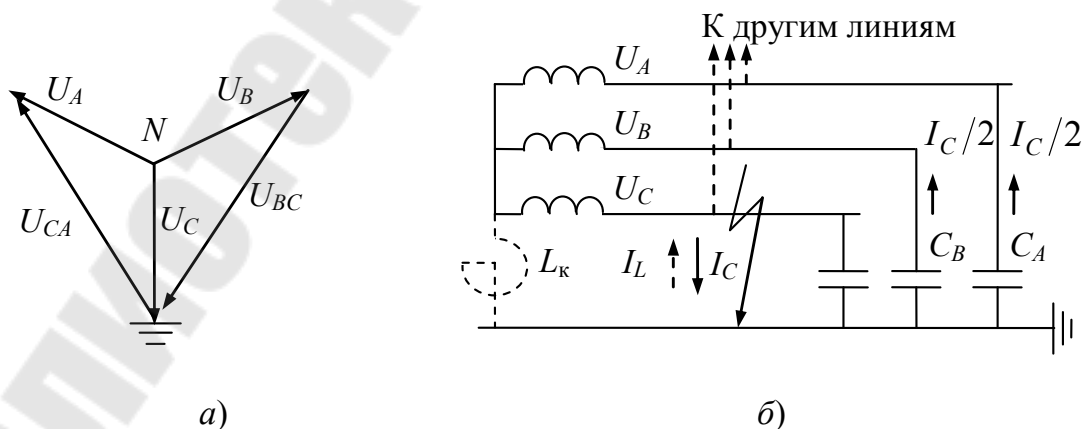


Рис. 5.12. Схема замещения при дуговом замыкании на землю

При металлическом замыкании на землю одной фазы, в здоровых фазах данной линии и всех остальных, гальванически связанных линиях, увеличивается напряжение относительно земли до линейного значения за счет несимметрии (п. 5.3). В случае неплотного контакта с землей в точке замыкания появляется электрическая дуга, которая при переходе тока замыкания на землю через нуль гаснет, а затем вновь зажигается. Такую неустойчивую дугу называют перемежающей дугой.

Емкости проводов линий в здоровых фазах относительно земли при перемежающей дуге периодически подзаряжаются аналогично тому, как мы рассматривали в предыдущем случае при отключении емкости (п. 5.3.6). В результате напряжения в здоровых фазах относительно земли увеличиваются до такой величины, при которой происходит интенсивное стекание остаточных зарядов в землю через сопротивления утечки по изоляторам линии, т. е. пока процесс не уравновесится.

Существуют 3 теории развития перенапряжений при дуговых замыканиях на землю, которые отличаются друг от друга в основном моментом времени гашения дуги.

По теории Петерсена (20-е гг. XX в.) гашение дуги происходит при переходе через нуль высокочастотного тока переходного процесса разряда емкости, т. е. также как и в п. 5.3.6. По теории Петерса и Слепяна дуга гаснет при переходе через нуль емкостного тока замыкания на землю промышленной частоты. По теории Беякова (СССР) – при переходе через нуль суммарного емкостного и высокочастотного токов и в зависимости от напряжения смещения нейтрали при однофазном замыкании.

По Петерсену максимальные перенапряжения достигают семикратного значения  $U_{\phi}$ , по Беякову – четырехкратного значения. Опыт эксплуатации показал, что перенапряжения, равные  $3,9U_{\phi}$ , появляются с вероятностью не более 3–5 % (сказываются потери на корону).

Дуговые перенапряжения воздействуют на всю сеть в целом и опасны не только величиной, но и длительностью. Пробой изоляции в здоровых фазах может произойти в любой точке сети, гальванически связанной с поврежденной линией. Такие виды повреждений характерны для высоковольтных электродвигателей, подключенных к сетям 6–10 кВ.

Для ограничения дуговых перенапряжений применяются два способа: классический – нейтраль сети заземляют через дугогасящую ка-

тушку Петерсена  $L_k$  и более современный – резистивное заземление нейтрали.

По первому способу (см. пунктирные линии на рис. 5.12, б) индуктивный ток  $I_L$  дугогасящей катушки в месте замыкания на землю проходит навстречу емкостному току  $I_C$ . При равенстве этих токов  $I_L - I_C = 0$  наступает резонанс, при котором восстанавливающееся напряжение в точке замыкания на землю после погасания дуги медленно нарастает и дуга если и зажигается, то через очень большие промежутки времени, достаточные для полного стекания в землю остаточного заряда линии через сопротивления утечки. Дугогасящие катушки (зеземляющие реакторы) типа ЗРОМ рекомендуется применять в сетях, у которых значение суммарного емкостного тока замыкания на землю превышают 10, 20, 30 А, соответственно при номинальных напряжениях 35, 10, 6 кВ.

По второму способу в нейтраль сети включают бетеловый резистор (активное сопротивление). При этом применяют либо высокоомное сопротивление резистора, величина которого выбирается достаточной для быстрого стекания остаточного заряда линии при перемежающейся дуге, либо низкоомное сопротивление порядка 100–180 Ом, которое не только нейтрализует остаточный заряд линии, но и создает активный ток замыкания на землю около 40 А, достаточный для четкого срабатывания релейной защиты от замыкания на землю.

Следует отметить, что остаточный заряд линии при перемежающейся дуге накладывается на переменное напряжение источника питания. Поэтому трансформатор напряжения, подключенный к шинам подстанции, оказывает большое сопротивление переменному току и стекания остаточных зарядов линии в землю через его активное сопротивление не происходит.

## 5.5. Ограничение внутренних перенапряжений

В установках до 220 кВ координацию изоляции, т. е. согласование ее уровня с возможными перенапряжениями, экономически выгодно выполнять за счет усиления изоляции, не прибегая к специальным защитным средствам ограничения внутренних перенапряжений. В то же время в эксплуатации должны быть предусмотрены следующие организационные и технические мероприятия, направленные на снижение некоторых видов внутренних перенапряжений.

1. Стараются уменьшить вероятность возникновения неполнофазного режима путем отказа от применения предохранителей в уста-

новках высокого напряжения, а также не допускать длительную работу трансформаторов на холостом ходу (феррорезонанс).

2. В цепях отключения батарей статических конденсаторов (БСК) применяют быстродействующие выключатели, а на длинных линиях – выносные трансформаторы напряжения, снижающие перенапряжения при отключении емкости.

3. Устанавливают грозозащитные разрядники или ОПН в цепях отключения трансформаторов и двигателей, для ограничения перенапряжений при отключении индуктивности. В этом случае разрядник рассеивает небольшую энергию, так как продолжительность таких перенапряжений не превышает 10 мс.

4. Применяют компенсированную или резистивно-заземленную нейтраль в разветвленных сетях напряжением 6–35 кВ.

В установках сверхвысокого напряжения (СВН) идут по другому пути. Уменьшают запас по изоляции, но при этом применяют радикальные меры, ограничивающие внутренние перенапряжения. К ним относятся использование шунтирующих реакторов на длинных линиях и специальных коммутационных или комбинированных разрядников.

Почти все коммутационные перенапряжения превышают уровень изоляции линий СВН. Для их ограничения применяют разрядники с повышенной пропускной способностью, позволяющие срезать пики перенапряжений переходного процесса в течение 3–4 периодов промышленной частоты. К ним относятся вентильный разрядник с тервитовым сопротивлением или ОПН. Например, на линиях 330–750 кВ применяют комбинированный (грозозащитный и коммутационный) разрядник серии РВМК. Его принципиальная схема и вольт-амперная характеристика приведены на рис. 5.13.

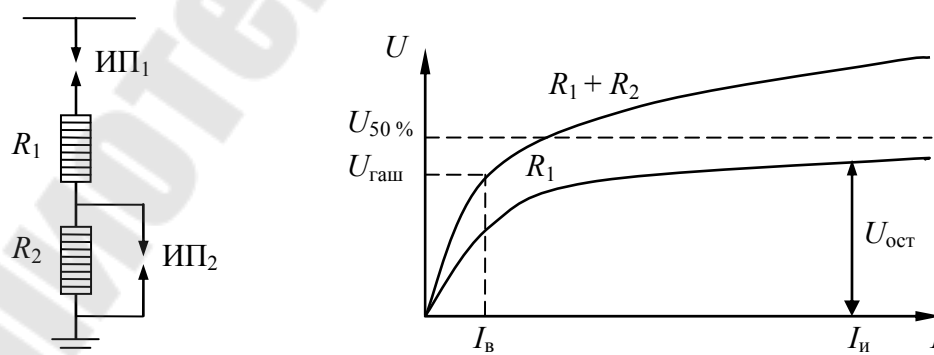


Рис. 5.13. Схема замещения и вольт-амперная характеристика комбинированного разрядника серии РВМК



При коммутационных перенапряжениях сопровождающий ток  $I_{\text{в}}$ , протекающий через разрядник, небольшой – до 2 кА. Падение напряжения на сопротивлении  $R_2$  будет недостаточное для пробоя искрового промежутка ИП<sub>2</sub> и току  $I_{\text{в}}$  соответствует повышенное напряжение гашения  $U_{\text{гаш}}$  на сопротивлениях  $R_1 + R_2$ . При грозовых перенапряжениях импульсный ток разрядника  $I_{\text{и}}$  достаточно большой (около 10 кА), падение напряжения на  $R_2$  возрастает, что приводит к пробоя ИП<sub>2</sub> и шунтированию сопротивления  $R_2$ . В результате остающееся напряжение разрядника  $U_{\text{ост}}$  на нелинейном сопротивлении  $R_2$  не превышает уровень защищаемой изоляции. Например, в разряднике типа РВМК-500 удалось повысить напряжение гашения  $U_{\text{гаш}}$  до  $2U_{\text{ф}}$  при пределе электрической прочности изоляции линии  $2,5U_{\text{ф}}$ .

На линиях СВН после коммутационных перенапряжений наступают установившиеся перенапряжения за счет емкостного эффекта, значение которых, как правило, выше  $U_{\text{гаш}}$ . Дуга в разряднике в этом случае не погаснет, и он выйдет из строя. Для успешного гашения дуги в разряднике к линии необходимо мгновенно подключить дополнительные шунтирующие реакторы, снижающие установившиеся перенапряжения ниже  $U_{\text{гаш}}$ . Для этого применяют следующую схему безынерционного подключения шунтирующих реакторов  $L_{\text{р}}$  (рис. 5.14).

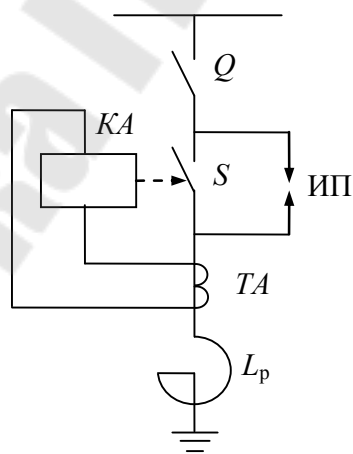


Рис. 5.14. Схема безынерционного подключения шунтирующего реактора

В нормальном режиме главный выключатель  $Q$  реактора включен, а отделитель  $S$  отключен. При перенапряжении более  $1,5U_{\text{ф}}$  пробивается искровой промежуток ИП и реактор мгновенно подключает-

ся к линии. Ток реактора приводит к срабатыванию максимального токового реле  $KA$ , которое замыкает контакты в цепи включения отделителя  $S$ , дуга в ИП гаснет и реактор остается подключенным к линии. Для восстановления исходного режима выключатель  $Q$  и отделитель  $S$  отключают, затем выключатель  $Q$  вновь включают. Этот процесс происходит автоматически или вручную после восстановления номинального напряжения в линии.

В настоящее время для линий СВН разработан и находится в опытной эксплуатации выключатель с синхронным включением. У него замыкание главных контактов при включении происходит в момент перехода синусоидального напряжения источника питания через нуль, что способствует ограничению пиковых перенапряжений при включении разомкнутой линии и при АПВ.

Есть также разработки выключателей с шунтирующими резисторами. У этих выключателей, прежде чем включить главные контакты, линию включают через резистор с помощью вспомогательных контактов. При отключении, наоборот, вначале отключаются главные контакты и линия остается включенной через резистор, а затем вспомогательные контакты окончательно отключают линию. Во всех этих случаях через шунтирующий резистор разряжается остаточный заряд линии и коммутационные перенапряжения ограничиваются.

### Контрольные вопросы

1. На какие виды разделяются внутренние перенапряжения в электроэнергетических системах?
2. Перечислите установившиеся (квазистационарные) перенапряжения.
3. Какие коммутационные перенапряжения вы знаете?
4. Что означает кратность внутренних перенапряжений, и какие допускаются кратности в сетях всех классов напряжения?
5. Объясните, в каких случаях и почему возникают установившиеся перенапряжения следующих видов:
  - перенапряжения за счет емкостного эффекта;
  - перенапряжения за счет несимметрии;
  - феррорезонансные перенапряжения.
6. Почему возникают и как ограничиваются следующие коммутационные перенапряжения:
  - при включении разомкнутой линии;
  - при автоматическом повторном включении;

- при отключении трехфазного КЗ;
- при отключении однофазного КЗ;
- при отключении индуктивности;
- при отключении емкости;
- при дуговых замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью.

7. Какие существуют способы заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ?

8. Как ограничиваются перенапряжения в электроустановках до 220 кВ?

9. Ограничение перенапряжений на линиях СВН.

10. Принцип действия и характеристики комбинированного разрядника серии РВМК.

11. Схема и назначение безынерционного искрового подключения шунтирующего реактора.

12. Почему значения коммутационных перенапряжений зависит от фазы напряжения источника питания в момент включения выключателя?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Техника высоких напряжений / под ред. Д. В. Разевига. – Москва : Энергия, 1976.
2. Степанчук, К. В. Техника высоких напряжений / К. В. Степанчук, Н. А. Тиняков. – Минск : Выш. шк., 1982.
3. Техника высоких напряжений / под ред. Г. С. Кучинского. – Санкт-Петербург : Энергоатомиздат, 2003.
4. Курганов, В. В. Техника высоких напряжений : практ. пособие к лаборатор. работам / В. В. Курганов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2002.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
Введение.....	4
<b>1. Разряды в газах и электрические характеристики внешней изоляции.....</b>	<b>6</b>
1.1. Электрическая прочность газовых промежутков.....	6
1.2. Пробивное напряжение газа в однородном поле. Закон Пашена.....	9
1.3. Коронный разряд в резконеоднородном поле.....	11
1.4. Пробивное напряжение газа в резконеоднородном поле.....	11
1.5. Влияние полярности электродов на пробивное напряжение газа.....	12
1.6. Методы повышения электрической прочности газов.....	13
1.7. Разряды в газовых промежутках при импульсных напряжениях.....	14
1.8. Коронный разряд на проводах линии электропередачи.....	17
1.9. Разряды в воздухе вдоль поверхности твердого диэлектрика.....	22
1.10. Разряды загрязненной и увлажненной поверхности диэлектрика.....	22
<b>2. Внутренняя изоляция электроустановок и ее электрические характеристики.....</b>	<b>26</b>
2.1. Особенности внутренней изоляции.....	26
2.2. Регулирование электрических полей во внутренней изоляции.....	27
2.3. Основные виды внутренней изоляции.....	29
2.4. Длительная электрическая прочность внутренней изоляции.....	31
2.5. Кратковременная электрическая прочность внутренней изоляции.....	34
<b>3. Методы и техника испытания изоляции электрооборудования высокого напряжения.....</b>	<b>36</b>
3.1. Неразрушающие методы контроля изоляции.....	36
3.2. Испытания изоляции повышенным напряжением.....	46
<b>4. Грозовые перенапряжения и защита от них.....</b>	<b>50</b>
4.1. Молния как источник грозовых перенапряжений.....	50
4.2. Защита от прямых ударов молнии.....	51
4.3. Грозозащитное заземление.....	52
4.4. Грозозащита линии электропередач.....	52
4.5. Грозозащита станций и подстанций.....	57
<b>5. Внутренние перенапряжения в электроэнергетических системах ...</b>	<b>71</b>
5.1. Общая характеристика внутренних перенапряжений.....	71
5.2. Перенапряжения установившегося режима.....	72
5.3. Коммутационные перенапряжения.....	77
5.4. Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью.....	85
5.5. Ограничение внутренних перенапряжений.....	87
Литература.....	92

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

**Курганов Владимир Васильевич**

# **ИЗОЛЯЦИЯ И ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

**Курс лекций  
по одноименной дисциплине  
для студентов специальностей 1-43 01 02  
«Электроэнергетические системы и сети»  
и 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»  
дневной и заочной форм обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

Редактор *Н. И. Жукова*  
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 26.11.10.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 5,58. Уч.-изд. л. 5,68.

Изд. № 30.

E-mail: [ic@gstu.by](mailto:ic@gstu.by)

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Издательский центр учреждения образования  
«Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0549424 от 08.04.2009 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.